



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Estudio de interoperabilidad entre sistemas Wireless  
Power Transfer según estándar SAE J2954

Study of Interoperability between Wireless Power  
Transfer systems according to SAE J2954 Standard

*Autor/es*

David Blanco Hernández

*Director/es*

Juan Luis Villa Gazulla

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
2019



## RESUMEN:

Actualmente, debido al constante esfuerzo realizado por los organismos europeos por reducir las emisiones contaminantes causadas por la circulación de todo tipo de vehículos, el vehículo eléctrico ha experimentado un importante auge, que, pese a no ser el primero, si parece ser el más destacable.

A lo largo de la historia, ya han existido diferentes momentos en los que se ha impulsado la movilidad eléctrica. Sin embargo, bien sea debido a la dificultad tecnológica, o a otro tipo de intereses de cualquier índole (política económica, etc.), el coche eléctrico ha terminado pasando a un segundo plano.

Para su definitiva consolidación, hay determinados aspectos que deben abordarse. Posiblemente, el más crítico sea la batería. El almacenamiento energético en el vehículo presenta varios problemas: por un lado, la limitada autonomía que actualmente posibilitan, la dificultad que existe en la recarga de la mismas, causada por la más que evidente falta de estaciones de recarga, la lentitud con la que se da dicho proceso y la elevada transferencia de potencia necesaria.

Todo ello supone la instalación de estaciones especializadas de carga preparadas para cumplir con esa alta demanda; las cuales deben incluir cables de elevada sección, con el impacto visual que ello conlleva, así como la necesidad de intervención del usuario.

Esta serie de inconvenientes ha derivado en un cambio en la tendencia de carga; que deriva en un sistema de carga inalámbrica (WPT) a través del aire, Este método, además de dar solución a los problemas anteriormente comentados, posibilita también una mayor seguridad y comodidad. Pese a que conocidas marcas como BMW y Siemens han creado ya un prototipo de cargador inductivo de 3,3 *KW*, parece una cantidad de energía pensada para cargar otro tipo de vehículos como híbridos.

Como el fin último del proyecto es ser construido en la nueva sede del CIRCE y por tanto ser un punto de carga para vehículos eléctricos, en el presente trabajo de fin de grado se realizará el modelado de un cargador inalámbrico de 50 *KW* (carga rápida) que también sea capaz de realizar cargas lentas a 7,7 *KW* en función del vehículo implicado; todo ello asegurando el cumplimiento de la normativa vigente. Previo a ello, se realizará una breve descripción del funcionamiento de los sistemas WPT, así como un estudio del arte de los mismos.





## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1. ANTECEDENTES Y APLICACIONES:.....	7
1.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS WPT:.....	8
1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS WPT: .....	10
<b>CAPÍTULO 2: ENTORNO DE TRABAJO .....</b>	<b>12</b>
2.1. ANÁLISIS DE LA NECESIDAD.....	12
2.2. NORMATIVA .....	13
2.3. EL PROGRAMA .....	14
2.4. OBJETIVOS .....	16
<b>CAPÍTULO 3: MODELADO Y SIMULACIÓN .....</b>	<b>17</b>
3.1. FÍSICA QUE MODELA LA CARGA INALÁMBRICA .....	17
3.2. MATERIALES USADOS Y SU INFLUENCIA .....	17
3.3. CONSIDERACIONES PREVIAS .....	18
3.4. MODELADO DEL SISTEMA WPT2 Z3 .....	20
3.5. MODELADO DEL SISTEMA WPT DE 50 KW .....	22
3.6. MODELADO DEL SISTEMA WPT COMBINADO .....	28
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
4.1. RESULTADOS DEL MODELO WPT 2 Z3.....	30
4.2. RESULTADOS DEL MODELO WPT DE 50 KW .....	35
4.3. RESULTADOS DEL MODELO WPT COMBINADO.....	39
4.4. ANÁLISIS DE LA POTENCIA TRANSFERIDA POR EL SISTEMA WPT COMBINADO.....	41
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>43</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO I: GEOMETRÍA DEL SISTEMA WPT2-Z3.....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO II: PARÁMETROS UTILIZADOS PARA DEFINIR EL SISTEMA WPT 2 Z3 EN COMSOL .....</b>	<b>50</b>
<b>ANEXO III: SCRIPT DE MATLAB PARA EL CÁLCULO DEL SISTEMA WPT DE 50 KW.....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO IV: SCRIPT DE MATLAB PARA EL CÁLCULO DE LA INTENSIDAD QUE GARANTICE LA INTEROPERABILIDAD ENTRE LOS SISTEMAS WPT .....</b>	<b>72</b>



---

# Capítulo 1: Introducción

---

## 1.1. Antecedentes y aplicaciones

La transmisión de potencia entre dos o más sistemas puede tener lugar mediante cable o bien de forma inalámbrica. Pese a que la sociedad se ha acostumbrado al primer tipo de tecnología, se lleva bastante tiempo investigando en la tecnología inalámbrica, dado que una completa instauración de la misma posibilitaría la eliminación de subestaciones entre estaciones generadoras y consumidores; y como consecuencia de ello, se reduciría el coste del transporte y suministro de energía eléctrica, así como el precio de la energía eléctrica que paga el consumidor [1].

Dentro de la tecnología inalámbrica cabe distinguir, por tanto, dos importantes vertientes, en función de la distancia que exista entre emisor y receptor [2]. Así mismo, debe tenerse en cuenta que dentro de cada subgrupo existe también variación en frecuencia, directividad, y de forma consecuente, en campo de aplicación.

- Pequeña distancia: los más destacables son los sistemas WPT, así como los ionizadores de aire.
- Gran distancia: destacan, por un lado, los sistemas de transmisión mediante microondas, que surgieron por primera vez de la mano de Nikola Tesla, quien en 1985 patentó la radio [P-1] y, por otro lado, la transmisión de potencia mediante láser.

Este trabajo de fin de grado se centra en los sistemas WPT, que se fundamentan en el extendido principio de transferir energía mediante dos bobinas acopladas magnéticamente. Diferentes tipos de máquinas eléctricas como motores o transformadores se basan también en este precepto.

Los WPT son sistemas que deben ser alimentados a altas frecuencias (*kHz-MHz*). Debe tenerse en cuenta que las pérdidas debidas al anteriormente mencionado efecto Skin, son proporcionales a la frecuencia. Por ello y con el fin de mejorar la eficiencia del proceso, en los inductores se utiliza hilo de Litz [3]. Trabajar a tan altas frecuencia también imposibilita el trabajo con núcleos de hierro, por lo que éstos han sido sustituidos por materiales ferromagnéticos o aire.

Generalmente se utilizan núcleos de ferrita puesto que posibilitan una buena relación peso-coeficiente de acoplo entre bobinas [4]. Sin embargo, cuando la carga a alimentar sea pequeña, el proceso resulta ser más eficiente con núcleo de aire [5]. Aunque en este caso la carga sea considerable, se va a ver cómo también se puede conseguir un rendimiento más que óptimo utilizando el último tipo de material.

La alta versatilidad de los sistemas WPT posibilita su aplicación en una gran variedad de campos, entre los que destacan:

- Ingeniería biomédica. Se usan en marcapasos [6], o sensores bajo la piel.
- Electrónica de consumo. Se pueden ver en cargadores de teléfonos móviles [P-2] o de cepillos eléctricos [7].
- Automoción. Son pensados para sistemas de carga de vehículo eléctrico de forma estática y dinámica [8-9-10].

## 1.2. Caracterización de los sistemas WPT

El esquema principal de los sistemas WPT es el presentado a continuación en la figura 1:

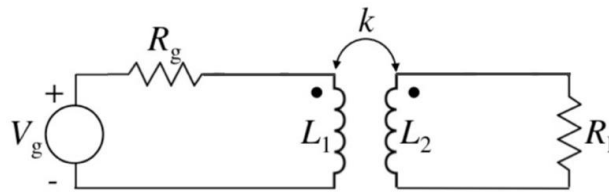


Figura 1. Circuito de un sistema WPT.

Mediante la 2ª Ley de Kirchhoff ( $\sum V_i = \emptyset$ ) se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$V_g = I_1 * (R_g + j\omega L_1) - I_2 * j\omega M \quad (1)$$

$$0 = I_2 * (R_L + j\omega L_2) - I_1 * j\omega M \quad (2)$$

La tensión que cae en el secundario se puede expresar, así mismo, de la siguiente forma:

$$V_2 = I_2 * R_L \quad (3)$$

De forma que, agrupando las ecuaciones (2) y (3), se obtiene de forma simplificada:

$$V_2 = I_2 * j\omega L_2 - I_1 * j\omega M \quad (4)$$

Además, la expresión de la potencia que capta el secundario viene dada por:

$$P_2 = V_2 * I_2 * \cos \varphi_2 \quad (5)$$

De acuerdo, por tanto, a dicha ecuación, si se desea maximizar dicha potencia, deben darse tres condiciones:

$$\bullet V_2 = V_{2 \max} = V_{2 \text{ vacio}} \quad (6)$$

$$\bullet I_2 = I_{2 \max} = I_{2 \text{ cortocircuito}} \quad (7)$$

$$\bullet \cos \varphi_2 = \cos \max \varphi_2 = 1 \quad (8)$$



Cuando el secundario trabaja en vacío (6), no circula intensidad por él, por lo cual se ha sustituido  $I_2 = 0$  en (4) y se ha obtenido esta expresión:

$$V_{2max} = I_1 * j\omega M \quad (9)$$

Así mismo, cuando éste se encuentra cortocircuitado, no existe diferencia de potencial entre sus bornes, por ello se ha sustituido  $V_2 = 0$  en (4), de donde se ha obtenido:

$$I_{2max} = \frac{(M * I_1)}{L_2} \quad (10)$$

Para que pueda darse la condición (8), se debe trabajar en resonancia, por lo que se debe incluir un sistema de compensación mediante condensadores en el secundario.

Cuando se trabaja en resonancia, aumenta la potencia, pues ésta pasa a depender también del factor de calidad del secundario,  $q_s$ , que varía en función de la topología de compensación [11]. Dicho factor es invariante ante cambios en la geometría de las bobinas, sin embargo, si experimenta variaciones ante cambios de frecuencia o de inductancia de las mismas [12].

Con todo esto se llega a la expresión final de la máxima potencia que puede ser captada por el secundario:

$$P_2 = \frac{(q_s \omega M^2 I_1^2)}{L_2} \quad (11)$$

De esta expresión, deben sacarse una serie de conclusiones para poder entender los valores que se han tomado posteriormente a la hora de realizar el modelo.

- Como se puede ver, un aumento del factor de calidad provoca un aumento también de dicha potencia, sin embargo, permanece limitado a un valor máximo de 10 por dos principales razones: valores excesivamente altos contribuyen a inestabilizar el sistema, haciéndolo impredecible. Además, como se mencionado con anterioridad, está ligado al valor de las inductancias de las bobinas, por lo que tiene restricciones térmicas y de tamaño relacionadas con las mismas [13].
- Para transferir una alta potencia, se necesitan elevados coeficientes de inducción mutua y una baja inductancia del secundario. Dichos factores son dependientes de la geometría de las bobinas, por lo que no es válido cualquier diseño.
- Dado que la inductancia del primario varía de forma inversamente proporcional a la frecuencia, existen infinitas combinaciones entre dichas variables para poder obtener una determinada potencia.

- Así mismo, un aumento de la frecuencia de excitación contribuye también a una mayor captación de potencia por parte del secundario; sin embargo, está limitada por la tecnología de los semiconductores, como se muestra en la tabla 1:

SEMICONDUCTOR	SCR	TRIAC	BJT	IGBT	DIODO	MOS
MÁX. FRECUENCIA (KHZ)	0.5	0.5	30	100	200	500

Tabla 1. Máximo valor de frecuencia admitido por los semiconductores.

### 1.3. Clasificación de los sistemas WPT

#### 1.3.1. Clasificación en función de la topología de compensación

Como se ha visto anteriormente, la necesidad de trabajar en resonancia en el primario y secundario, da lugar a una alta diversidad de topologías en función de la forma en la que los condensadores se sitúan en los dos devanados. Así, las 4 topologías básicas son **Serie-Serie**, **Serie-Paralelo**, **Paralelo-Serie** y **Paralelo-Paralelo** [14], mostradas en la Fig. 2:

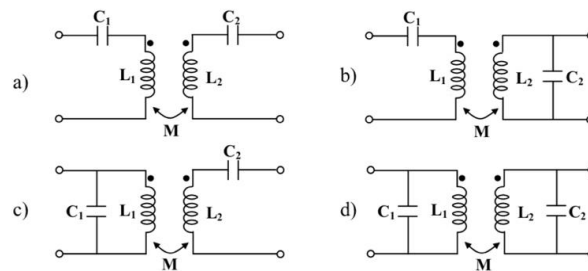


Figura 2. Topologías de compensación: a) S-S; b) S-P; c) P-S; d) P-P

Cabe destacar que tanto la topología serie-serie como la paralelo-serie actúan como fuentes de corriente; actuando las otras dos como fuentes de tensión, por lo que el comportamiento de las topologías es diferente ante posibles variaciones de parámetros como frecuencia, desalineamientos [15] etc.

Así mismo, existen 2 topologías más complejas que mejoran el rendimiento ante desalineamientos: SerieParalelo-Serie y SerieParalelo-Paralelo [P-3] patentadas, precisamente, por el director del proyecto, mostradas en la Fig. 3:

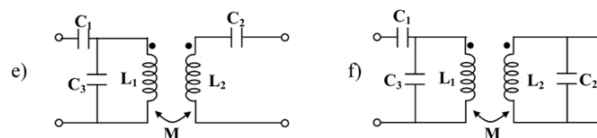


Figura 3. Topologías derivadas: e) SP-S; f) SP-P

### 1.3.2. Clasificación en función del coeficiente de acoplo entre devanados

Un aspecto fundamental a la hora de caracterizar los sistemas de transferencia de energía entre dos bobinas acopladas es el coeficiente de acoplo  $k$  definido a partir del coeficiente de inducción mutua ( $M$ ) y la media geométrica de los coeficientes de autoinducción de las bobinas ( $L_1$  y  $L_2$ ) según:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (12)$$

En función de los valores que tome dicho coeficiente pueden darse a su vez tres posibles subgrupos [16]:

- **Sistemas débilmente acoplados** ( $k < 0.2$ )
- **Sistemas de acoplo intermedio** ( $0.2 < k < 0.6$ )
- **Sistemas Fuertemente acoplados** ( $k > 0.6$ )

### 1.3.3. Clasificación en función del movimiento relativo entre primario y secundario

Debe tenerse en cuenta que este tipo de clasificación está completamente ligada a la funcionalidad del sistema. Existen dos grupos bien diferenciados.

- I. **Sistemas de secundario móvil:** existe movimiento relativo entre ambos devanados, siendo el primario el que se encuentra fijo, mientras el secundario se desplaza. Tiene una potencialidad inmensa en el ámbito ferroviario, pero, como es lógico, para su instauración definitiva requiere un rediseño del devanado del lado de tierra de forma que la longitud del mismo sea considerablemente mayor que el del vehículo [17].
- II. **Sistemas de secundario fijo:** no existe movimiento relativo durante el proceso de carga. Por ello, las dimensiones de las geometrías de ambos lados son del mismo orden de magnitud, aunque es habitual que, por temas funcionales como peso, sea ligeramente menor el devanado secundario. De forma consecuente entre los ámbitos de aplicación destacan la electrónica de consumo o los implantes transcutáneos definidos con anterioridad.

---

## Capítulo 2: Entorno de trabajo

---

### 2.1. Análisis de la necesidad

Existe una necesidad más que evidente de contribuir a reducir/acabar con el calentamiento global como problema medioambiental que atañe a toda la población.

El camino a seguir para ello es una mayor integración de las energías renovables. De hecho, según la Cátedra BP de Energía y Sostenibilidad llevada a cabo por la Universidad Pontificia Comillas; en 10 años, el 84% de la energía total producida por España podría provenir de fuentes de energías renovables [18].

Un elemento importante que puede y debe contribuir en esta descarbonización es el vehículo eléctrico, que, alimentado por una red renovable, no produciría ningún tipo de emisión contaminante. Sin embargo, existen dos factores que, a día de hoy, deben solventarse para que el coche eléctrico pueda competir con los de motor de combustión.

- **Elevado Precio:** pese a que últimamente ya ha salido al mercado algún coche eléctrico con un precio más que competente, conforme siga avanzando la tecnología se conseguirá reducir aún más el coste inicial de los mismos.
- **Autonomía/Recarga:** están íntimamente ligados. La autonomía, relacionada con la tecnología de las baterías es limitante; sin embargo, la evidencia muestra que es realmente difícil dar pasos firmes pese a las grandes inversiones en I+D que están dándose en dicho ámbito.

Esta limitación se acentúa más aún debido a una más que evidente falta de puntos de recarga. De hecho, en España, según datos consultados en la guía de movilidad eléctrica para entidades locales [19], existen a día de hoy 5.111 puntos de recarga, mientras que, según la misma fuente, el número de vehículos eléctricos circulando en el país es de 63.164, de los cuales 25.574 son automóviles [19].

Con estos datos, resulta fácil calcular la ratio automóvil eléctrico - estación de recarga:

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Nº de Automóviles Eléctricos en España}}{\text{Nº de estaciones de recarga en España}} = \frac{25574}{5111} = 5,003$$

Es decir, por cada 5 automóviles que circulan en España, existe una única estación en la que cualquiera de estos puede cargarse.

Además, según [19], tan solo existen 798 puntos de carga rápida. Si además de darse una más que evidente falta de infraestructura de carga, la posibilidad de cargar de forma rápida es limitada; aparece, por consiguiente, una gran incertidumbre que conlleva un retraso en la consolidación del vehículo eléctrico.

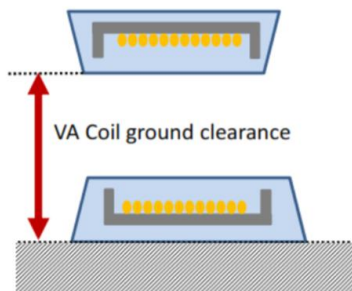
La solución a este problema pasa, por tanto, por instaurar nuevas estaciones, principalmente de carga rápida.

## 2.2. Normativa

En primer lugar, antes de proceder a realizar cualquier tipo de cálculo o aproximación se analizó la normativa correspondiente a la carga inalámbrica. Cabe destacar que en el Estándar Europeo de Carga Inductiva (IEC 61980-1/Ed.1), aparece información relevante de aspectos relacionados con el diseño de los cables, con la interoperabilidad y con el protocolo de comunicación; sin embargo, en ningún momento se hace referencia al diseño de primario y secundario (número de espiras, longitud, diámetro del conductor, etc.).

Por ello, se ha recurrido al Estándar Americano de Carga Inductiva (SAE INTERNATIONAL J2954) que, por el contrario, si aportaba datos relacionados con el diseño de ambos devanados en función de la categoría del vehículo.

Por tanto, en primer lugar, se establece una clasificación **en función de la distancia entre devanados**, acorde a la figura 4.



Z-Class	VA Coil ground clearance range (mm)
Z1	100 – 150
Z2	140 – 210
Z3	170– 250

Figura 4. Clasificación de sistemas WPT para vehículos según distancia entre devanados

Así mismo, se establece una **clasificación en función de la potencia que se va a transferir** acorde a la tabla 2:

	WPT Power Class			
	WPT1	WPT2	WPT3	WPT4
Maximum input Volt Amps	3.7kVA	7.7kVA	11.1kVA	22kVA

Tabla 2.- Clasificación de sistemas WPT para vehículos según potencia intercambiada

Antes de proseguir y para asegurar un mejor entendimiento del proyecto, debe sacarse una importante conclusión: Si se desea fabricar un sistema WPT con el fin de transferir una potencia diferente a cualquiera de las que aparecen en la tabla 2, la única limitación que deberá abordarse es la de la propia tecnología, pero no estará ligada a ninguna normativa. Si, por el contrario, se desea fabricar un sistema WPT 1,2,3 o 4 se deberán cumplir una serie de restricciones establecidas en dicha normativa.

En el caso del sistema de 7,7 KW dichas restricciones son las mostradas a continuación:

- **Frecuencia:**  $81,38 \text{ KHz} < f < 90 \text{ KHz}$
- **Inductancia del primario:**  $42,1 \mu\text{H} < L_1 < 43,2 \mu\text{H}$
- **Inductancia del secundario:**  $37,9 \mu\text{H} < L_2 < 39 \mu\text{H}$
- **Coefficiente de acoplamiento:**  $0,088 < k < 0,245$

### 2.3. El programa

Tras todo lo mencionado con anterioridad, se procede a explicar en qué consiste *COMSOL Multiphysics*, el programa utilizado para llevar a cabo este proyecto.

*COMSOL* es un potente software CAE que permite diseñar y resolver por el método de los elementos finitos diversos tipos de problemas regidos por cualquier tipo de física.

#### 2.3.1. Modelado

Pese a que permite importar modelos realizados en *AutoCAD* y *SolidWorks*, lo cual facilita considerablemente el diseño para cualquier persona habituada a trabajar con estos programas; también posee un sistema de diseño propio con el que realizar cualquier geometría. De hecho, el método de trabajo con dicho editor tiene bastante relación con la forma de trabajar en *SolidWorks*, donde se crean planos con la geometría que se considere y mediante operaciones de extrusión, revolución, simetría, e incluso operaciones booleanas, se conforma la geometría final en 3D.

Además, *COMSOL* también permite definir una serie de parámetros con los que modelar el problema, de forma que, cambiando simplemente los valores, se reconstruye el modelo.

#### 2.3.2. Físicas disponibles

Lo que realmente hace de *COMSOL* un programa con un potencial inmenso es la diversidad de físicas que permite estudiar.

Puede abordar problemas de transferencia de calor, plasma, mecánica estructural, óptica, transporte de especies químicas, electromagnetismo y radiofrecuencia entre otros. Pero además de eso, permite abordar las interacciones entre diversas físicas en el mismo modelo, por ejemplo, el calentamiento por inducción electromagnética.

### 2.3.3. Mallado

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 seleccionar el elemento o sistema a estudiar y llenarlo de triángulos o tetraedros (para cubrir un volumen en caso de ser una geometría 3D) 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.

Existen diferentes opciones de mallado, desde extremadamente fino a extremadamente grueso. Además, se puede mallar el conjunto entero o por partes. Conforme más pequeño es el tamaño de elemento que conforma la malla, más precisa es la solución; pero, consecuentemente, el tiempo de cálculo empleado para ello también se ve incrementado.

### 2.3.4. Estudio y resultados

Antes de proceder al cálculo, se debe detallar el tipo de **estudio** que va a darse y en qué condiciones (dependiente del tiempo, estacionario, variable, etc.).

Por tanto, si se pretende resolver un sistema alimentado por corriente continua, el tipo de estudio necesario es estacionario; pero si, por el contrario, se excita con corriente alterna, se debe seleccionar un estudio de dominio de la frecuencia.

El método de cálculo se basa en métodos iterativos de resolución numérica, como Runge-Kutta o Euler. Se puede observar el avance de dicho estudio en un gráfico de convergencia que aparece, donde se muestra la evolución del error en función del número de iteraciones. El estudio concluye cuando el programa obtiene un error menor de  $10^{-3}$ . Pese a que, como ha sido comentado anteriormente, dicho valor se puede modificar, se considera un valor óptimo pues un error menor supondría un coste computacional inadmisibles y un error mayor alejaría más la solución real de la obtenida con el programa.

Una vez finalizado el cálculo, *COMSOL* permite mostrar infinidad de **resultados**:

- Gráficos 3D
- Gráficos 2D
- Superficie de flechas
- Valores simples
- Valores derivados (de una integración en una dirección, en una superficie, o en un determinado volumen)
- Curvas de nivel
- Líneas de Flujo
- Trayectorias de rayos

## 2.4. Objetivos

El objetivo final del proyecto es construir un modelo físico que posibilite dos tipos de carga (rápida y lenta).

El objeto de este proyecto es validar la interoperabilidad entre sistemas WPT orientados a cargar dos vehículos eléctricos distintos, transfiriendo la potencia adecuada a cada uno de ellos: En el caso de automóviles convencionales se cargaría  $7,7\text{ KW}$ , siendo de  $50\text{ KW}$  para vehículos de mayor envergadura como buses o camiones.

Se puede dividir en tres partes diferentes:

En primer lugar, se ha modelado en *COMSOL* un cargador inductivo de  $7,7\text{ KW}$  (WPT 2 Z3) acorde a la norma existente para, precisamente y de forma posterior, llevar a cabo un estudio intensivo que permita garantizar el cumplimiento de dicha normativa.

En segundo lugar, se ha modelado en *COMSOL* un cargador inductivo de  $50\text{ KW}$ . En este caso y como se ha mencionado al hablar de la normativa, el modelo no estaba atado a ninguna ley (dada la falta de legislación existente); sin embargo, es la propia tecnología lo que ha dificultado el proceso.

Por último, se pretende comprobar la interoperabilidad entre ellos. Validar que, efectivamente, ante un cambio de dimensiones en el secundario (el vehículo), el sistema está preparado para reconocerlo y adaptar la intensidad necesaria para recargar las baterías de forma segura, es decir, sin exceder la potencia.

Tras todo ello y como se ha visto en el resumen, será montada una bancada inductiva en el nuevo laboratorio para el vehículo eléctrico de la universidad de Zaragoza en el año 2020.



## Capítulo 3: Modelado y simulación

### 3.1. Física que modela la carga inalámbrica

La física que modela el problema es el electromagnetismo. Las ecuaciones que permiten modelar el problema con las condiciones de contorno adecuadas son las **Ecuaciones de Maxwell**, presentadas a continuación de forma diferencial:

$$\nabla \times \vec{E} - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (14)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (16)$$

Donde

$\vec{E}$  : Campo Eléctrico ( $V/m$ )

$\vec{B}$  : Inducción Magnética ( $Wb/m^2$ )

$\vec{H}$  : Campo Magnético ( $A/m$ )

$\vec{D}$  : Inducción Eléctrica ( $C/m^2$ )

$\vec{J}$  : Densidad de corriente ( $A/m^2$ )

$\rho$  : Densidad volumétrica de carga ( $C/m^3$ )

### 3.2. Materiales usados y su influencia

Como se puede ver en la normativa, para cumplir las especificaciones expuestas, no bastante con el mero hecho de tener dos bobinas acopladas magnéticamente por las que circula intensidad, se requiere también el uso de ferrita y aluminio.

El **aluminio** es un material paramagnético, cuya función principal es apantallar el campo magnético de forma que éste no “escape” y que, además, no tome valores excesivamente altos que puedan poner en peligro la salud de las personas.

Sin embargo, el apantallamiento del campo magnético trae consigo una reducción de la potencia transferida. Para evitarlo se utilizan las placas de **ferrita** que, dada su alta permitividad, permiten restablecer el valor de potencia transferida. De ahí que, precisamente, sean las zonas que mayor cantidad de campo magnético absorben.

Precisamente debido a lo expuesto en el párrafo anterior, se debe comprobar que la ferrita no se sature, pues, de lo contrario, se comportaría como el aire. Esto conllevaría una transferencia de potencia considerablemente menor y generación de armónicos.

En relación a dicha **saturación magnética**, se adjunta la figura 5 donde se muestra el ciclo de histéresis típico de un material ferromagnético. Como se puede ver en el punto a de la gráfica, el campo se acerca a una asíntota horizontal siguiendo una forma “logarítmica” conforme se aumenta la intensidad. Dicha asíntota representa el máximo campo que soportar un material sin saturarse.

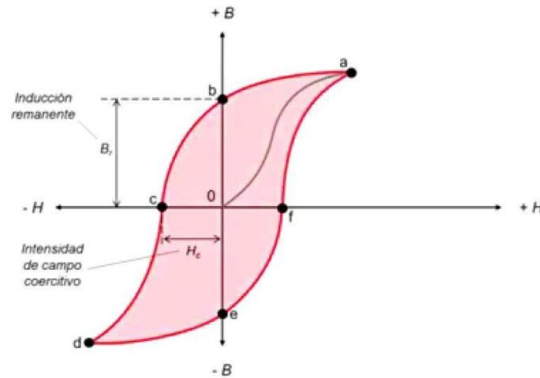


Figura 5. Ciclo de histéresis de un material ferromagnético

Además, el valor máximo de campo magnético que puede soportar una ferrita también está ligado a la temperatura como se muestra en la figura 6. Como se puede ver, para temperatura ambiente el valor máximo admisible es muy próximo a los 0,5 T; por lo que es el valor que se tomará a la hora de comprobar la saturación de la ferrita en el posterior análisis de resultados.

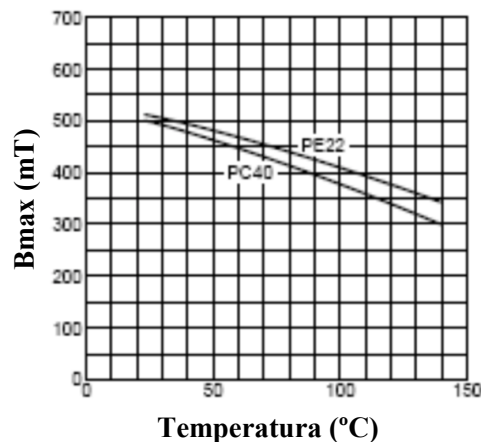


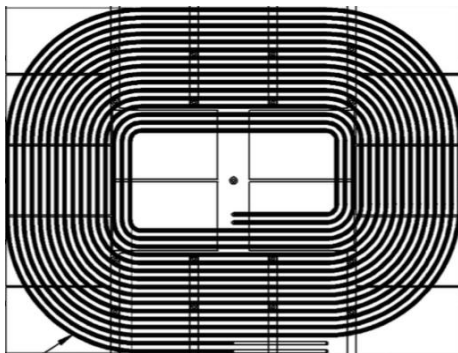
Figura 6. Variación de la máxima inducción magnética admisible en función de la temperatura para varias ferritas

### **3.3. Consideraciones previas**

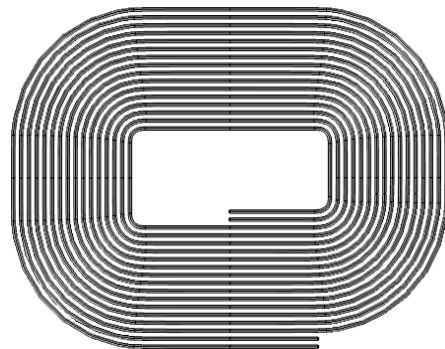
Como se ha comentado previamente, *COMSOL* es un programa con una inmensa potencialidad. Tal es así que, durante la realización del proyecto se han tenido que realizar una serie de aproximaciones, sin las cuales el problema hubiera sido incapaz de resolverse en un ordenador convencional (se necesitarían ordenadores de cientos de gigabytes). Las aproximaciones usadas se muestran a continuación:

- **Hilos de Litz:** Como se ha comentado en la introducción, en sistemas en los que la frecuencia de excitación es de varias decenas de kilohercios (como los sistemas WPT que se van a presentar), los inductores deben constar de hilos de Litz para evitar excesivas pérdidas por efecto Skin. Debido a la excesiva potencia de cálculo requerida ha sido impensable plantearse dicha modelización.
- **Geometría de los inductores:** En primera instancia y, como se puede ver en la figura 7, el modelado de las bobinas de ambos devanados, se hizo exactamente igual que en el Anexo I (para ambos devanados se muestra a la izquierda la geometría que aparece en el estándar y a la derecha la geometría modelada en *COMSOL*).

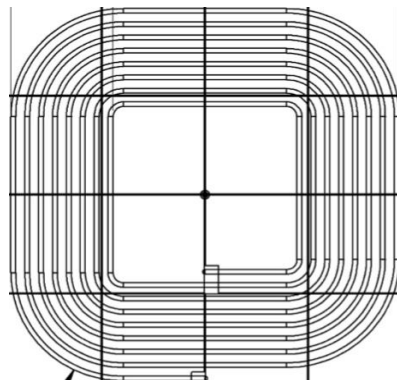
Geometría del primario según estándar



Geometría del primario con *COMSOL*



Geometría del secundario según estándar



Geometría del secundario con *COMSOL*

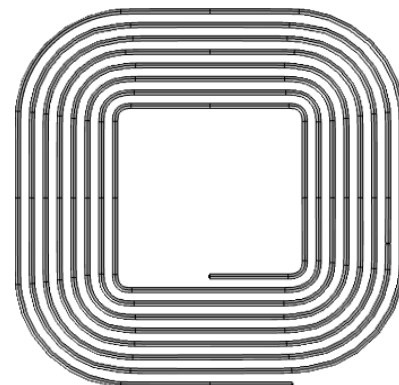


Figura 7. Comparativa entre geometría del secundario según el estándar SAE J2954 y modelada con *COMSOL*

Sin embargo y, como se puede ver en la figura 8, debido al inmenso número de elementos que existían al terminar el mallado (en torno a 30 millones, cuando lo recomendable son 300.000), se tuvo que hacer otro modelo suponiendo que todos los conductores se encontraban dentro de una pletina en la que también se tenía en cuenta la separación existente entre ellos, como se mostrará más adelante:

Malla parcial	
Vértices de malla:	6133906
Tipo de elemento:	Todos los elementos
Elementos tetraédricos:	29588573
Elementos triangulares:	4571395
Elementos de arista:	276823
Elementos de vértice:	1504
— Estadísticas del elemento de dominio	
Número de elementos:	29588573
Calidad mínima de elemento:	2.294E-4
Calidad media de elemento:	0.7458
Ratio de volumen de elemento:	1.426E-8
Volumen de malla:	4848000.0 mm <sup>3</sup>
Tasa máxima de crecimiento:	4.324
Tasa media de crecimiento:	1.738

Figura 8. Estadísticas de la malla del modelo WPT 2 Z3

### 3.4. Modelado del sistema WPT 2 Z3

#### 3.4.1. Parámetros y geometría

Con el fin de abordar posibles modificaciones posteriores, se han definido la mayoría de parámetros, que han sido reflejados en el Anexo II.

Con las aproximaciones mostradas en las consideraciones previas, se ha modelado la primera etapa del proyecto con el propio editor que tiene *COMSOL*, utilizando 5 planos y las operaciones extrusión y simetría entre otras.

Así mismo, se ha “encerrado” el conjunto creado por ambos devanados dentro de una esfera sólida de radio considerablemente mayor que las dimensiones del modelo a estudiar, para establecer los límites de cálculo y poder indicar que el sistema está rodeado por aire; sin embargo, no se muestra para que se pueda ver con claridad el sistema WPT.

La geometría (excluyendo dicha esfera) queda reflejada según las figuras 9,10 y 11.

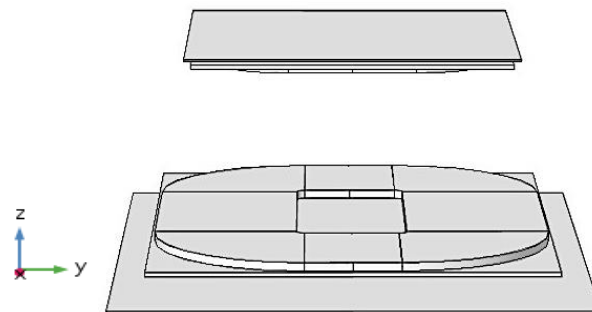


Figura 9. Sistema WPT 2 Z3: Perfil de ambos lados

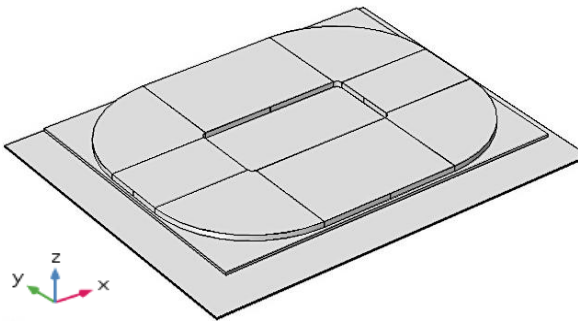


Figura 10. Sistema WPT 2 Z3: Alzado del lado primario (Inductor 1+Ferrita+Aluminio)

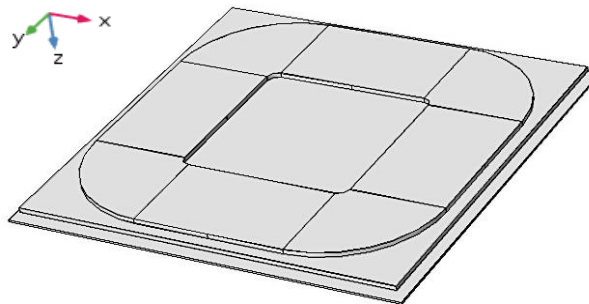


Figura 11. Sistema WPT 2 Z3: Alzado del lado secundario (Inductor 2+Ferrita+Aluminio)

### 3.4.2. Asignación de materiales y físicas

Los **materiales** que se han asignado a su correspondiente geometría son aire, aluminio, cobre y ferrita. Los tres primeros aparecen en las librerías de materiales que incorpora el programa; no ocurriendo lo mismo en el caso de la ferrita, que se ha definido a través de su permeabilidad relativa (2500), permitividad relativa (0) y conductividad (0 S/m).

En cuanto a las **físicas**, como se comentaba en el apartado anterior, se ha utilizado la relativa a campos magnéticos, según la cual, para añadir la intensidad que circulaba por las bobinas se tiene que hacer en forma de densidad de corriente (Densidad de Corriente externa) en este caso de valor  $\mathbf{J}_{ground} = 2,5472 * 10^5 \text{ A/m}^2$  definida en el Anexo II.

Debido a la complejidad de la geometría (existen tramos rectos y circulares) se tuvo que definir la densidad de corriente en la dirección correspondiente. Así, en los tramos rectos, podía definirse la dirección y sentido de dicha densidad de corriente utilizando el sistema coordenado cartesiano que aparece por defecto, teniendo en cuenta, eso sí, el eje a considerar en cada tramo. Sin embargo, en los tramos circulares, se tuvo que definir un sistema coordenado cilíndrico-polar para poder introducir la densidad de corriente en “phi”.

### 3.4.3. Mallado y estudio definido

El **mallado** se ha realizado por partes. De esta forma, si se realiza adecuadamente, se puede conseguir una excelente relación entre la precisión de la solución y al número de elementos.

Por tanto, se han definido diferentes tipos de mallas:

- El inductor del lado de tierra se ha mallado de forma “más fina”
- El inductor del vehículo se ha mallado de forma “extra fina”
- Las ferritas de ambos devanados se han mallado de forma “normal”
- Los aluminios también se han mallado de forma “normal”
- El resto de la geometría, se ha mallado de forma “extra gruesa”, pero modificando manualmente algún parámetro para reducir aún más el número de elementos

Así el mallado final se puede observar en la Figura 12:

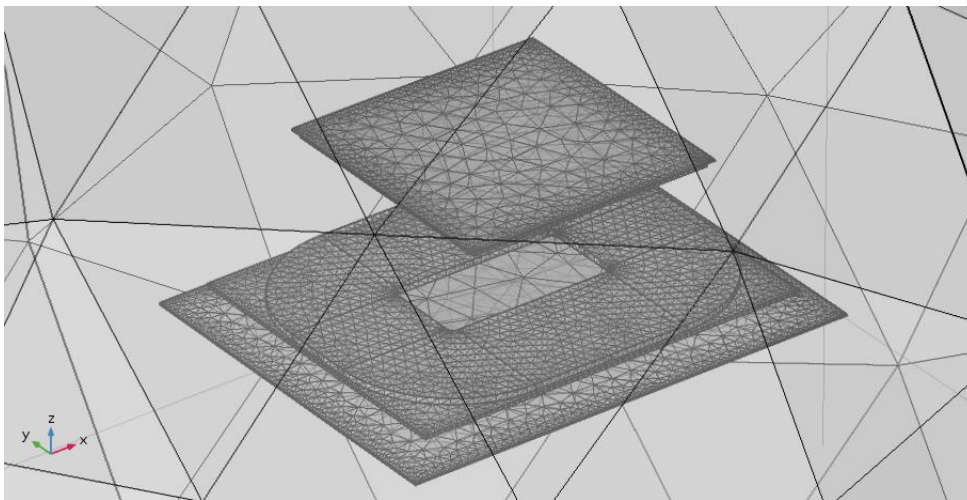


Figura 12. Mallado del Sistema WPT 2 Z3

El **estudio** definido ha sido: Dominio de la frecuencia a 85 KHz, dado que no tiene sentido el concepto de acoplamiento magnético entre bobinas para intensidades no alternas. De hecho, el comportamiento de las bobinas ante corriente continua es idéntico al de un cable, por lo que se daría un cortocircuito.

### 3.5. Modelado del sistema WPT de 50 KW

De todas las topologías mostradas en la introducción, se ha optado por utilizar la SP-S dado que, como se ha visto, tienen un comportamiento considerablemente mejor que el resto de topologías ante desalineamientos.

Los datos que se muestran a continuación han sido aportados por el director del proyecto, valiéndose para ello del script de *MATLAB* que se muestra en el Anexo III.

- Devanado Primario
  - Número de conductores: 3
  - Sección de cada conductor:  $300 \text{ mm}^2$
  - Intensidad que circula por cada conductor: 905 A
  - Distancia entre centros (longitud x anchura): 468 x 330 mm
  
- Devanado Secundario
  - Número de conductores: 13
  - Sección de cada conductor:  $48 \text{ mm}^2$
  - Intensidad que circula por cada conductor: 141 A
  - Distancia entre centros (longitud x anchura): 280 x 280 mm

Así mismo, para que la transferencia de potencia sea lo más próxima posible a los 50 KW, el director del proyecto ha establecido también los valores que deben tener, L1, L2 y M:

- L1: 7,47  $\mu\text{H}$
- L2: 93,30  $\mu\text{H}$
- M: 1,97  $\mu\text{H}$

La dificultad que presenta esta parte del presente trabajo de fin de grado reside en averiguar, mediante un proceso iterativo, cuál es la distancia que debe existir entre los conductores de ambos devanados, así como las dimensiones de la ferrita y aluminio y la distancia entre ambas, que garantice el cumplimiento de las especificaciones comentadas con anterioridad.

### 3.5.1. Parámetros y geometría

Como se ha comentado en el párrafo anterior, en este caso para definir la geometría completa se ha optado por un proceso iterativo (a diferencia de la parametrización que se realizó en el modelado del WPT 2 Z3).

Esta parte ha sido, con diferencia la más exigente del trabajo. Si bien aprender a utilizar el programa fue realmente complicado (no es un programa nada intuitivo), crear una geometría que, además de cumplir las exigencias impuestas relacionadas con los valores del coeficiente de inducción mutua y de las autoinductancias de primario y secundario, evitara la saturación magnética de la ferrita, lo ha sido aún más.

Todos los requisitos expuestos en el párrafo anterior no se podían cumplir en el lado primario con una simple placa de aluminio por muy grande que fuera, pues se comprobó que, si se conseguían cumplir los requisitos de las bobinas, la ferrita saturaba, y viceversa.

Por ello y, como se refleja en las siguientes figuras, para el aluminio del devanado de tierra, se ha recurrido a una geometría considerablemente distinta (y más compleja).

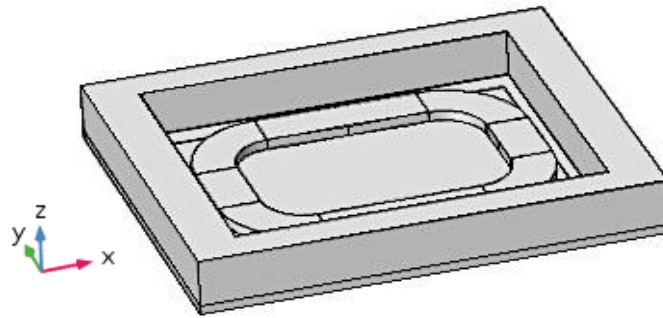


Figura 13. Sistema WPT de 50 KW: Alzado del lado primario (Inductor 1+Ferrita+Aluminio)

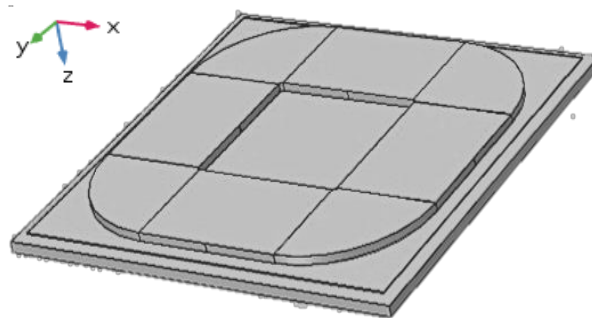


Figura 14. Sistema WPT de 50 KW: Alzado del lado secundario (Inductor 2+Ferrita+Aluminio)

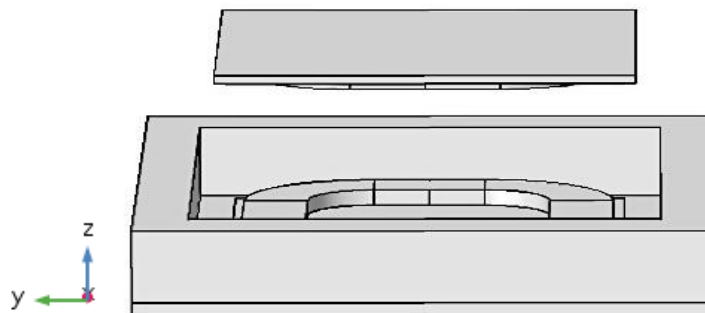


Figura 15. Sistema WPT de 50 KW: Perfil de ambos lados

Así mismo, y dada la inexistencia de una herramienta en *COMSOL* para acotar planos, se muestra a continuación dicho modelo acotado en *AutoCAD*. Esto, se hace por dos razones:

- 1) Para que el lector compare la diferencia de tamaño entre el modelo anterior y este. Como es lógico y se puede ver, conforme más potencia se desea transferir, aumentan las dimensiones y la complejidad de la geometría.
- 2) Cabe recordar que el fin último del mismo es ser construido. Resultaría imposible construir este modelo sin tener las medidas.



- **Geometría del primario:** en la figura 16 se muestra el alzado y planta sin acotar para dejar la geometría completamente definida.

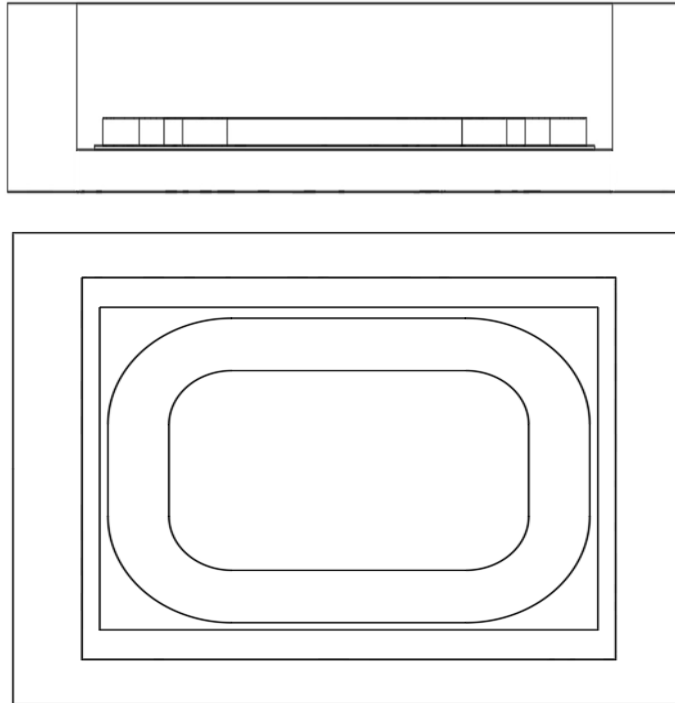


Figura 16. Alzado y planta del primario del sistema de 50 KW

En la figura 17 se muestra la planta acotada. Cabe resaltar que se han utilizado dos planos diferentes para facilitar su comprensión.

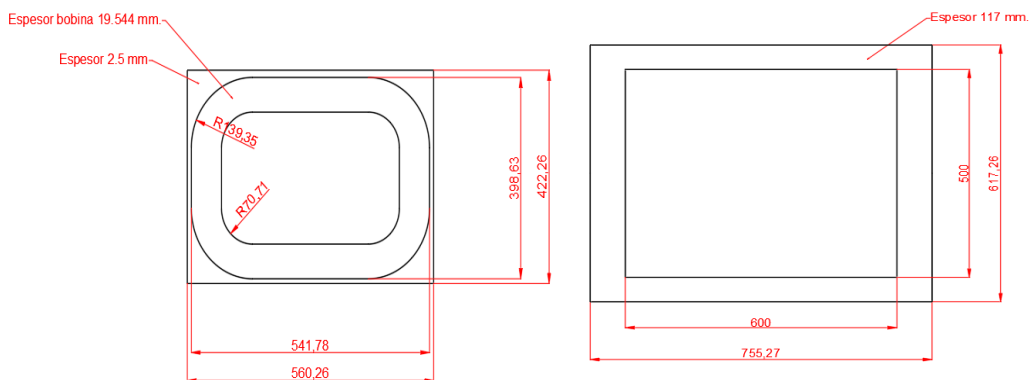


Figura 17. Planos acotados del primario del sistema de 50 KW

Siendo además la distancia medida en la vertical entre la parte inferior del bobinado y la parte inferior de la placa de ferrita: 7,55 mm y la distancia entre la parte inferior del bobinado y la parte inferior del bloque de aluminio 26,1 mm

- **Geometría del secundario:** siguiendo con el procedimiento mostrado para el primario, en la figura 18 se muestra el alzado y planta del mismo.

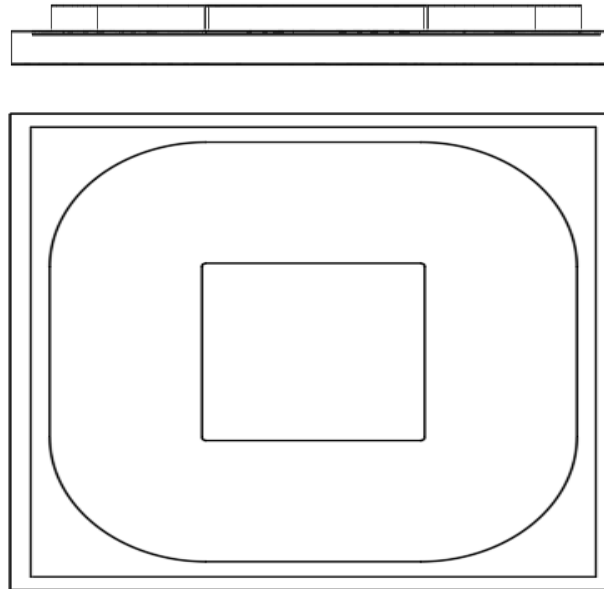


Figura 18. Alzado y planta del secundario del sistema de 50 KW

De la misma forma, en la figura 19 se muestran dos planos de la planta acotada.

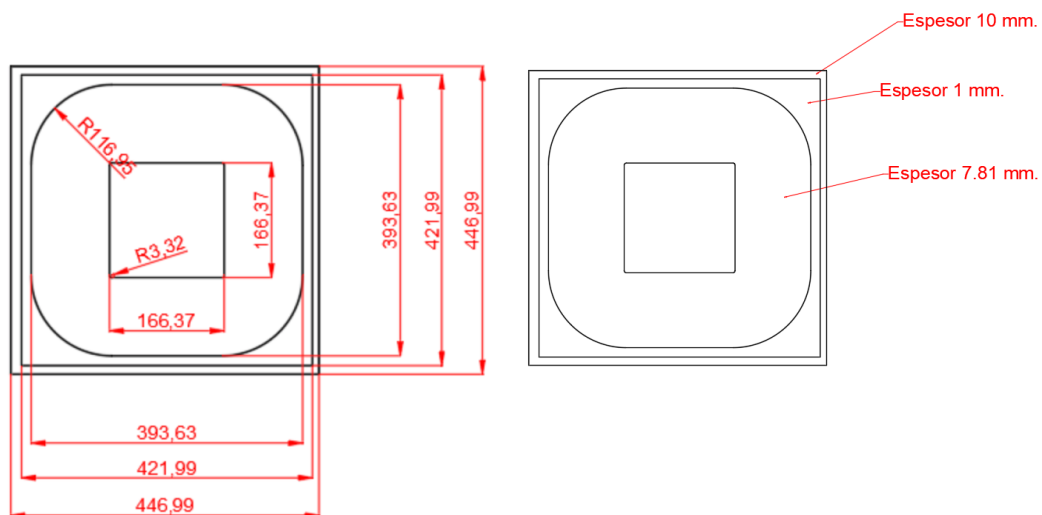


Figura 19. Planos acotados del primario del sistema de 50 KW

En este caso, la distancia medida en la vertical entre la parte superior del bobinado y la parte superior de la placa de ferrita es: 8,81 mm y la distancia entre la parte superior del bobinado y la parte superior de la placa de aluminio 22,31 mm

### 3.5.2. Asignación de materiales y físicas

En cuanto a los **materiales**, se han definido los mismos que en el modelado del sistema WPT 2 Z3: aire, aluminio, cobre y ferrita. Sin embargo, la permeabilidad de la ferrita del lado del vehículo se ha definido con una permeabilidad relativa de 2370 y la del lado de tierra con 2000.

La **física** usada para definir el problema ha sido la misma que en el caso anterior: campos magnéticos y también se ha definido la intensidad como una secuencia de densidades de corriente, eso sí de diferente valor ( $J_{ground_{50\text{ KW}}}$ ), pues tanto la intensidad que circulaba por cada conductor, como la sección de los mismos es distinta.

$$J_{ground_{50\text{ KW}}} = \frac{NumG * I_{ground}}{Diamground * LongpletG} = \frac{3 * 905}{0.068632 * 0.019544} = 2,024 * 10^6 \text{ A/m}^2$$

Donde:

**NumG:** Número de conductores del lado de tierra

**I<sub>ground</sub>:** Intensidad que circula por cada conductor

**Diamground:** Diámetro de cada conductor del lado de tierra

**LongpletG:** Longitud de la pletina equivalente del devanado primario

Cabe resaltar además que, el número de conductores y la intensidad que recorre cada uno de ellos se han mostrado previamente al principio del apartado 3.5. En lo referido al diámetro de cada uno de ellos, se ha obtenido a través de la sección de los mismos, también mostrada en dicho apartado.

Por último, la longitud de la pletina equivalente se ha calculado suponiendo que entre los tres conductores existe una separación de 5 mm dado que no existía ninguna restricción geométrica, siempre y cuando se cumplieran los requisitos expuestos (autoinductancias, inductancia mutua y campo magnético máximo admisible). Así, la formula introducida en el programa para calcular dicha longitud fue:

$$LongpletG = (NumG * Diamground) + ((NumG - 1) * 0,005) = 0,19544 \text{ m}$$

Al igual que antes, se ha tenido en cuenta que siguiera la dirección correcta en los ejes adecuados del sistema coordinado pertinente (existen dos: el cartesiano y el cilíndrico-polar, definido manualmente).

### 3.5.3. Mallado y estudio definido

El **mallado** se ha realizado por partes de nuevo garantizar que el número de elementos no fuera excesivo.

Así, se han definido diferentes tipos de mallas:

- Los dos inductores se han mallado de forma “más fina”
- Las ferritas de ambos devanados se han mallado de forma “normal”, aunque modificando manualmente algunos parámetros para optimizar aún más la malla.
- Los aluminios también se han mallado de forma “normal”, también con manipulación manual
- El resto de la geometría, se ha mallado de forma “extra gruesa”, cambiando manualmente de nuevo determinados parámetros

El estudio definido ha sido idéntico: Dominio de la frecuencia a 85 KHz.

Se ha decidido no insertar una foto del mallado en este caso dada la similitud con la Figura 10.

### **3.6. Modelado del sistema WPT combinado**

Por si cabe alguna duda, este sistema combinado consiste en el primario del modelo WPT de 50 KW y el secundario del modelo WPT 2 Z3. Es el modelo más importante ya que, de sus resultados se validará la interoperabilidad entre dos sistemas diferentes de transferencia inalámbrica de potencia destinados a la recarga de vehículos eléctricos, que es el objeto último de este proyecto, tal y como indica su propio título.

#### **3.6.1. Parámetros y geometría**

La modelización ha sido muy sencilla ya que tanto el primario como el secundario tal y como se ha visto, han sido modelados con anterioridad.

Además de esto, COMSOL permite importar modelos realizados con el mismo programa. Por lo que se han importaron ambos modelos y solo se ha tenido que definir materiales, físicas y el estudio a realizar.

#### **3.6.2. Asignación de materiales y físicas**

En cuanto a los **materiales**, se han definido los mismos que en los dos modelos anteriores aire, aluminio, cobre y ferrita. En este caso, la única variación ha sido: la ferrita del lado del vehículo se ha definido con una permeabilidad relativa de 2370 y la del lado de tierra con 2000, haciendo referencia a sus respectivos modelos.

En este caso, la intensidad (360 A) ha sido proporcionada por el director del proyecto mediante un script de matlab que se muestra en el anexo IV:

$$J_{\text{ground}}^{\text{Combinado}} = \frac{\text{NumG} * I_{\text{ground}}}{\text{Diam}_{\text{ground}} * \text{Long}_{\text{pletG}}} = \frac{3 * 360}{0.068632 * 0.019544} = 8,05 * 10^5 \text{ A/m}^2$$

La simbología es la misma que la mostrada en el apartado 3.5.2. y por ello no merece especial mención.

La física elegida: campos magnéticos y la intensidad definida en forma de una sucesión de densidades de corriente en el eje correspondiente del sistema coordinado de cada tramo.

### **3.6.3. Mallado y estudio definido:**

El **mallado** se ha hecho exactamente igual que para el sistema WPT de 50 KW. El **estudio** definido el mismo que en cualquiera de los modelos analizados: dominio de la frecuencia a 85 KHz.

## Capítulo 4: Resultados

### 4.1. Resultados del modelo WPT 2 Z3

#### 4.1.1. Sentido de la densidad de corriente

Dada la complejidad de la geometría se ha creído conveniente graficar el sentido de la corriente para comprobar si efectivamente se ha definido bien. Como se muestra en la figura 20, la densidad de corriente externa que circula por el bobinado primario sigue el sentido introducido manualmente ya comentado con anterioridad. Así mismo, la corriente inducida por el primario se da con sentido opuesto, confirmando por tanto la validez del modelo.

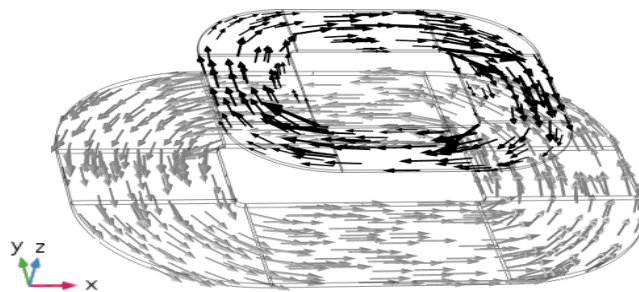


Figura 20. Densidad de corriente externa en el primario y densidad de corriente inducida en el secundario

#### 4.1.2. Densidad de corriente eje X

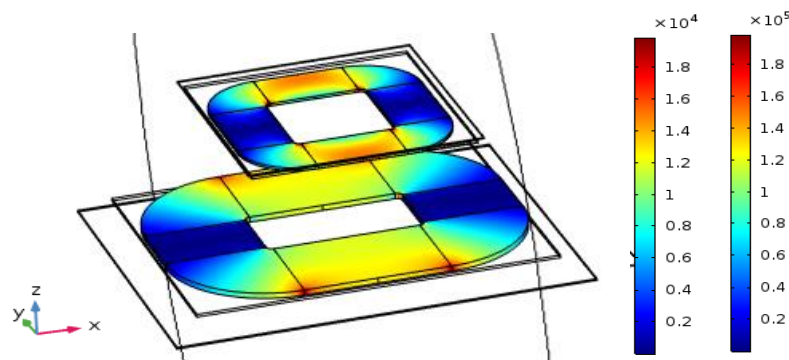


Figura 21. Densidad de corriente externa en el primario y densidad de corriente inducida en el secundario según X

Debe observarse que dicha componente de la densidad de corriente tiene valor nulo en los tramos cuya normal es completamente perpendicular al eje X.

El rango de valores de la derecha hace referencia al primario y el de la izquierda al secundario. Cabe resaltar que el valor máximo de la componente 'x' de la densidad de corriente que circula por el primario es bastante menor que  $J_{ground} = 2,5472 * 10^5 A/m^2$ , siendo la última introducida por el usuario. Esto es debido, principalmente a pérdidas por proximidad. Este efecto produce que las líneas de campo magnético se concentren alrededor del exterior de los conductores, originando pérdidas apreciables en la zona central de los mismos.

#### 4.1.3. Densidad de corriente eje Y

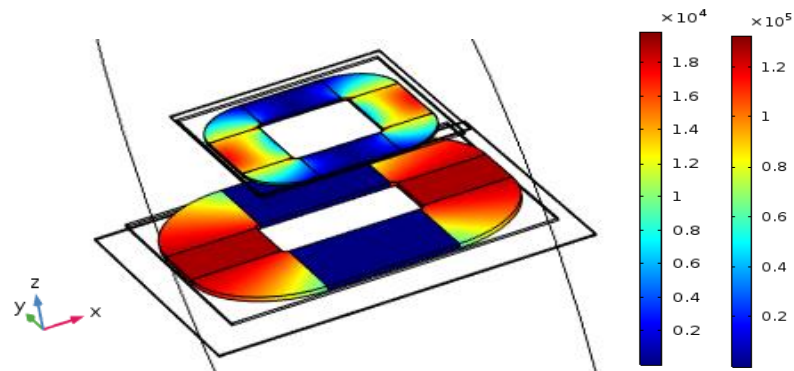


Figura 22. Densidad de corriente externa en el primario y densidad de corriente inducida en el secundario según Y

En este caso, la componente 'y' densidad de corriente que circula por ambos devanados en aquellas partes de la geometría cuya normal es totalmente perpendicular al eje Y.

#### 4.1.4. Densidad de corriente eje Z

Se ha creído innecesario graficar la componente 'z' de la densidad de corriente externa introducida en el primario y la inducida en el secundario pues dista varios órdenes de magnitud respecto a las representadas en las figuras 21 y 22 (según ejes X e Y).

#### 4.1.5 Densidad de flujo magnético en el conjunto entero

En primer lugar y como se puede ver en la imagen 23, se ha representado el vector densidad de flujo magnético en el conjunto completo para afianzar lo que se comentó en el apartado 3.2 (Materiales y su influencia).

La única comprobación que cabe realizar en este caso es si se saturan las ferritas. De los valores del gráfico se muestra que el máximo valor es  $0,03 T$ . Como  $0,03 T < 0,5 T$  siendo  $0,5 T$  el valor de saturación de la ferrita, se puede concluir que no existe saturación.

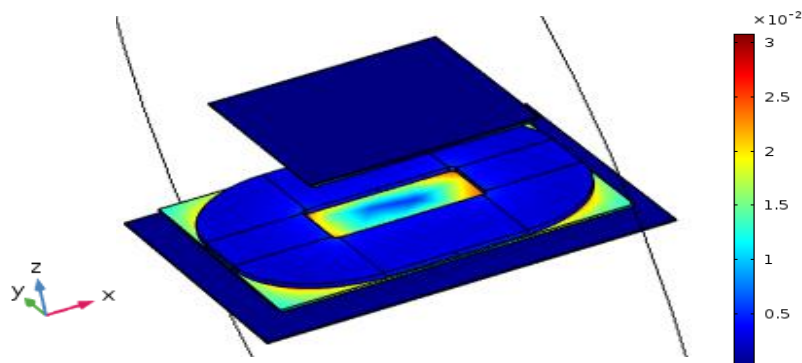


Figura 23. Vector densidad de flujo magnético en los bobinados, aluminios y ferritas

#### 4.1.6. Densidad de flujo magnético en los inductores

Pese a que, como se puede ver en la figura anterior, los valores más altos de flujo magnético se dan en las ferritas de ambos devanados, se ha creído conveniente mostrar la distribución del mismo simplemente en los devanados (Figura 24). Como se puede ver, pese a que el rango de valores es dos órdenes de magnitud menor que el mostrado en la imagen previa; los mayores valores se dan en el inductor primario, siendo esto completamente lógico, pues es el devanado por el que circula mayor intensidad.

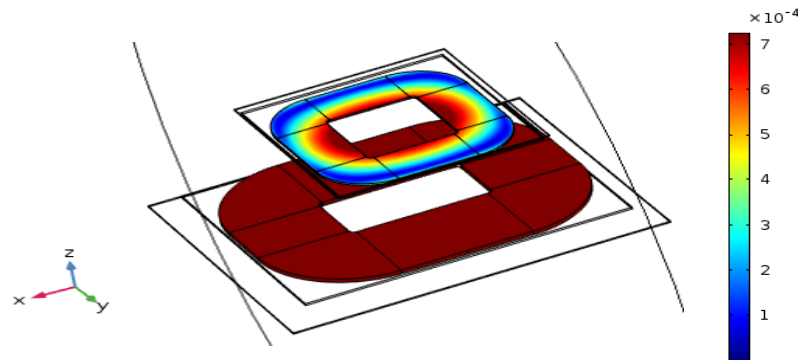


Figura 24. Vector densidad de flujo magnético en los bobinados

#### 4.1.7. Autoinductancias

Existen dos formas igual de válidas de calcular la inductancia de los inductores:

- **Mediante la Energía Magnética:**

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{1}{2} * L * I^2 \\ E &= \int \frac{1}{2} B * H^* \end{aligned} \right\} L = \frac{1}{I^2} * \int B * H^* \quad (17)$$

- **Mediante la Ley de Ohm en CA:**

$$X_L = \frac{V}{I\omega} \quad (18)$$

En este proyecto, para ambos devanados se ha obtenido de la segunda forma. Debe tenerse en cuenta, que *COMSOL* solo halla en primera instancia el valor del campo Eléctrico y Magnético en las tres direcciones del espacio; por tanto, para obtener valores derivados como en este caso el potencial eléctrico o la autoinductancia, se le debe introducir la fórmula correspondiente en base a lo ya hallado.

Antes de proceder con la fórmula que se ha introducido en el programa para calcular la inductancia de cualquier lado, cabe destacar que el campo magnético producido por  $x$  conductores de diámetro  $\phi$  separados una distancia determinada es exactamente igual que el producido por un solo conductor del mismo diámetro equivalente ( $x\phi$ ). No ocurre lo mismo en términos de tensión pues al existir varios cables en serie, la tensión total es la suma de los mismos.



$$L_G = L_{\text{CÍRCULOS}} + L_{\text{RECTANGULOS 1}} + L_{\text{RECTANGULOS 2}} =$$

$$\text{Imag}\left\{\left[4 * \iiint \frac{EV_{\text{phi}} * \text{NumG}}{\text{AreaG} * I_{\text{ground}} * mf.\omega}\right] + \left[2 * \iiint \frac{(mf.Ex + mf.Ey + mf.Ez) * \text{NumG}}{\text{AreaG} * I_{\text{ground}} * mf.\omega}\right]\right\} +$$

$$\left[2 * \iiint \frac{(mf.Ex + mf.Ey + mf.Ez) * \text{NumG}}{\text{AreaG} * I_{\text{ground}} * mf.\omega}\right]\} = 4 * 4,616 + 2 * 8,6112 + 2 * 3,9253 = \mathbf{43,537 \mu H}$$

$$L_V = L_{\text{CÍRCULOS}} + L_{\text{RECTANGULOS}} =$$

$$\text{Imag}\left\{\left[4 * \iiint \frac{EV_{\text{phi}} * \text{NumV}}{\text{AreaV} * I_{\text{vehicle}} * mf.\omega}\right] + \left[4 * \iiint \frac{(mf.Ex + mf.Ey + mf.Ez) * \text{NumV}}{\text{AreaV} * I_{\text{vehicle}} * mf.\omega}\right]\right\} =$$

$$= 4 * 3,5053 + 4 * 6,5975 = \mathbf{40,411 \mu H}$$

Donde

**mf.Ej** es el campo eléctrico en la dirección j (V/m)

**mf.omega** es la pulsación o frecuencia angular (Hz)

**EVphi** es el campo eléctrico definido en coordenadas cilíndrico polares, que en *COMSOL* se introduce de la siguiente forma:

$$EV_{\text{phi}} = (mf.Ex * \text{sys2.e\_phi1}) + (mf.Ey * \text{sys2.e\_phi2}) + (mf.Ez * \text{sys2.e\_phi3})$$

Si bien es cierto que los valores no se encuentran dentro del rango establecido por la normativa vigente ( $42,1 \mu H < L_1 < 43,2 \mu H$  y  $37,9 \mu H < L_2 < 39 \mu H$ ), distan poquísimos de pertenecer a dicho intervalo. Esta ligera discrepancia se debe a dos razones:

- La falta de información sobre el tipo de ferrita que se ha usado en la normativa para hallar dichos valores.
- El propio error debido al programa. Pese a poder reducir el error, supone un coste computacional inmenso que no cualquier ordenador es capaz de soportar.

#### 4.1.8. Coeficiente de Inducción Mutua

El coeficiente de inducción mutua se puede hallar de la siguiente forma:

$$\mathcal{M} = \frac{V_{ij}}{j\omega I_j} \quad (19)$$

Donde

$V_{ij}$  : Tensión que el bobinado 'j' induce en el bobinado 'i'

$I_j$  : Intensidad que circula por el devanado 'j'

Antes de proceder al cálculo, cabe introducir un nuevo concepto que influye en el cálculo de la inductancia mutua: el desalineamiento. **El máximo desalineamiento** del secundario respecto del primario viene también dado por el estándar SAE J2954 y **es de 100 mm en el eje X y 75 mm en el eje Y**, tal y como se muestra en la figura 25:

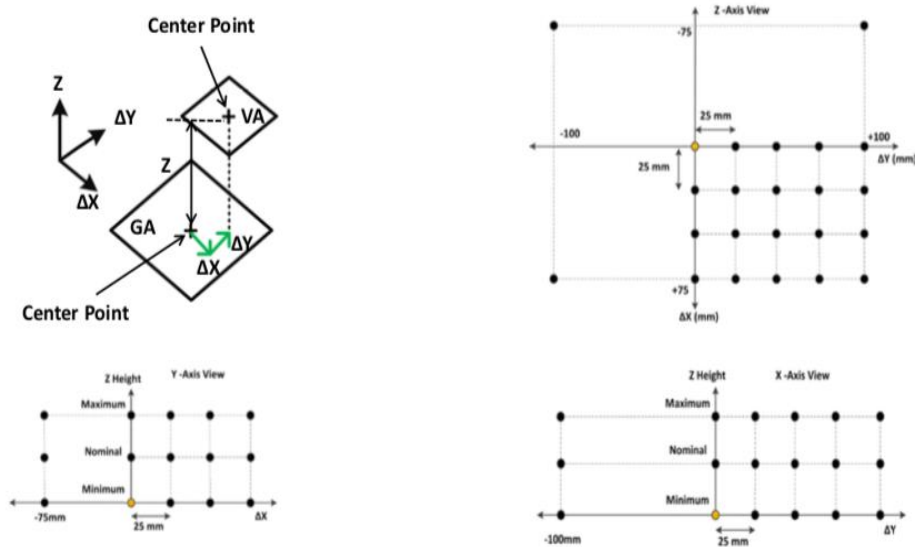


Figura 25. Máximo desalineamiento permitido en sistemas WPT

Como se comentó al hablar de la normativa, el factor de acoplamiento  $k$  que está directamente relacionado con el coeficiente de inducción mutua, debía estar comprendido en un rango de valores  $(0,088 < k < 0,245) \Rightarrow (3,691 \mu H < \mathcal{M} < 10,276 \mu H)$ . Es decir, pese a existir desalineamiento máximo, la inductancia mutua debe seguir perteneciendo a dicho intervalo.

Al igual que ocurría en el caso del cálculo de las autoinductancias, se necesita introducir la fórmula de la inductancia mutua en función de parámetros y/o magnitudes conocidas por el propio programa.

Así la fórmula introducida en *COMSOL* es:

$$\begin{aligned} & \text{Imag}\left\{\left[\iiint \frac{EV_{\phi i} \cdot \text{Num}V}{\text{Area}V \cdot I_{\text{ground}} \cdot mf \cdot \omega} \right]\right\} + \left[\iiint \frac{(mf \cdot E_x + mf \cdot E_y + mf \cdot E_z) \cdot \text{Num}V}{\text{Area}V \cdot I_{\text{ground}} \cdot mf \cdot \omega} \right] + \\ & \iiint \frac{EV_{\phi i} \cdot \text{Num}V}{\text{Area}V \cdot I_{\text{ground}} \cdot mf \cdot \omega} \right] + \left[\iiint \frac{(mf \cdot E_x + mf \cdot E_y + mf \cdot E_z) \cdot \text{Num}V}{\text{Area}V \cdot I_{\text{ground}} \cdot mf \cdot \omega} \right] + \\ & \iiint \frac{EV_{\phi i} \cdot \text{Num}V}{\text{Area}V \cdot I_{\text{ground}} \cdot mf \cdot \omega} \right] + \left[\iiint \frac{(mf \cdot E_x + mf \cdot E_y + mf \cdot E_z) \cdot \text{Num}V}{\text{Area}V \cdot I_{\text{ground}} \cdot mf \cdot \omega} \right] + \\ & \iiint \frac{EV_{\phi i} \cdot \text{Num}V}{\text{Area}V \cdot I_{\text{ground}} \cdot mf \cdot \omega} \right] + \left[\iiint \frac{(mf \cdot E_x + mf \cdot E_y + mf \cdot E_z) \cdot \text{Num}V}{\text{Area}V \cdot I_{\text{ground}} \cdot mf \cdot \omega} \right] \end{aligned}$$

En este caso no se puede suponer simetría a diferencia de antes, pues debido al desalineamiento, el valor de la inductancia mutua es diferente en cada volumen.

Así se han estudiado tres casos diferenciados: bobinados alineados, bobinados semi-desalineados y bobinados completamente desalineados, dando los resultados mostrados a continuación:

- $\mathcal{M}_{\text{alineado}} = 0,53042 + 0,53041 + 0,53043 + 0,53043 + 0,97955 + 0,97956 + 0,97956 + 0,97956 = 6,03922 \mu H$

- $\mathcal{M}_{\text{semi-desalineado}} = 0,58242 + 0,49158 + 0,49158 + 0,48618 + 0,99118 + 0,9831 + 0,932 + 0,93881 = 5,89685 \mu\text{H}$
- $\mathcal{M}_{\text{desalineado}} = 0,5096 + 0,32186 + 0,32735 + 0,34897 + 0,82906 + 0,73419 + 0,72654 + 0,81787 = 4,61544 \mu\text{H}$

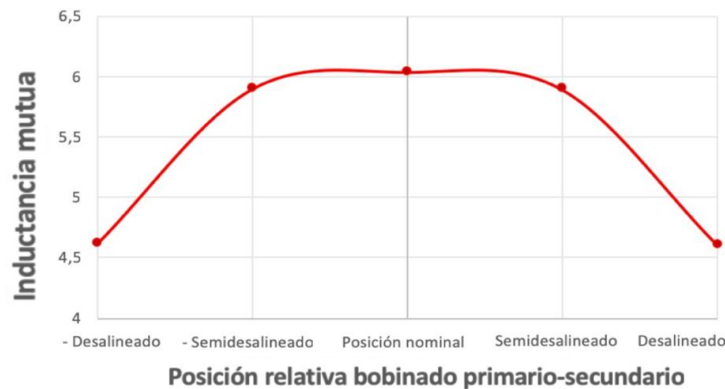


Figura 26. Variación de la inductancia mutua según la posición entre primario y secundario

Como se puede ver, dichos valores entran dentro del intervalo establecido. Sin embargo, con el fin de mejorar la interpretación del lector, se adjunta la figura 26 para mostrar que **la inductancia mutua decrece parabólicamente con el desalineamiento.**

## **4.2. Resultados del modelo WPT de 50 KW**

A la vista de los resultados expuestos en el apartado anterior, y antes de presentar los relacionados con este modelo, cabe ya anticipar algunos resultados relacionados con los valores y distribuciones, sobre todo en lo que respecta al campo magnético, dada su alta dependencia con la intensidad.

### **4.2.1. Sentido de la densidad de corriente**

Pese a que para el modelo WPT 2 Z3, dada la falta de experiencia con el software, se creyó conveniente graficar el sentido de la densidad de corriente que circula por el primario y la que se inducía en el primario como consecuencia de la misma, para certificar que se había hecho correctamente.

En este caso, tras tener ya considerable fluidez con el programa, se ha decidido no graficarla para abordar más en detalle aspectos relacionados con la distribución del campo magnético, así como los valores que toma.

#### 4.2.2. Densidad de corriente eje X

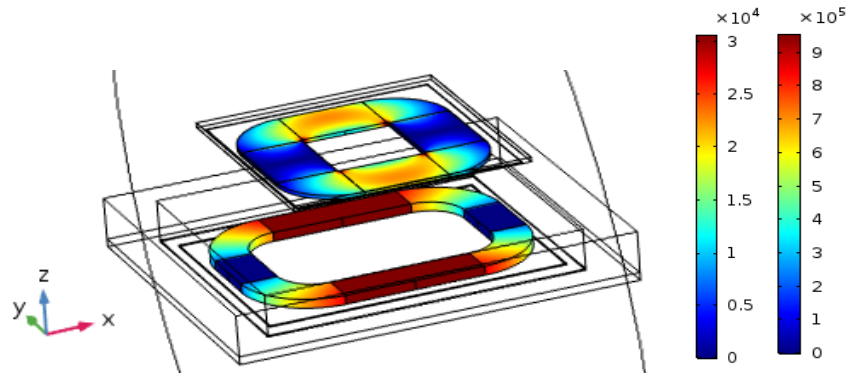


Figura 27. Densidad de corriente externa en el primario y densidad de corriente inducida en el secundario según X

Como en este caso  $J_{ground_{50KW}} > J_{ground}$ , los valores son visiblemente mayores respecto al sistema WPT 2 Z3; sin embargo, la tendencia es idéntica.

#### 4.2.3. Densidad de corriente eje Y

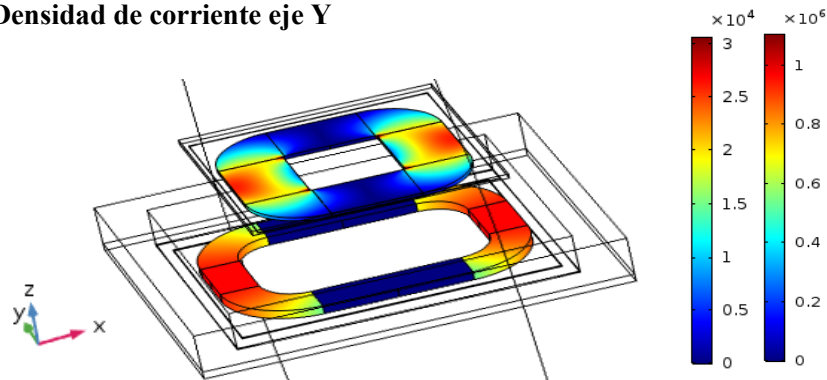


Figura 28. Densidad de corriente externa en el primario y densidad de corriente inducida en el secundario según X

Lo expuesto para la componente x de la densidad de corriente ocurre, de la misma forma para la componente Y.

#### 4.2.4. Densidad de corriente eje Z

Al ser de nuevo la componente 'z' de la densidad de corriente bastantes órdenes de magnitud menor, se ha considerado irrelevante graficarla.

#### 4.2.5 Densidad de flujo magnético en el conjunto entero

Pese a que la distribución del campo magnético era idéntica que para el sistema WPT 2 Z3, los valores eran considerablemente mayores. Así, en el devanado primario, para una placa de aluminio que permitiera cumplir las especificaciones; si la ferrita del lado de tierra tenía un espesor pequeño, ésta, absorbía un campo máximo de 1,15 T, más del doble del valor que la hacía saturar.

Por ello, se aumentó el espesor de la ferrita; sin embargo, hacerlo, trajo consigo un aumento desmesurado del valor del coeficiente de inducción mutua y, por consiguiente, de la potencia transferida. De ahí que se optara por la armadura de aluminio ya definida.

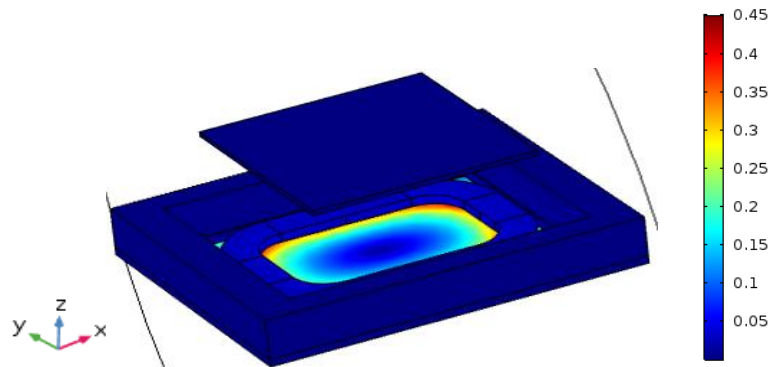


Figura 29. Vector densidad de flujo magnético en los bobinados, aluminios y ferritas

Con dicha armadura, el valor máximo de campo es de  $0,3919 T$  y se da en la ferrita del devanado primario, como se puede ver en la figura 28. Como  $0,3919 T < 0,5 T$  la ferrita mantiene el comportamiento característico de un material ferromagnético; es decir, no satura.

#### 4.2.6. Densidad de flujo magnético en los inductores

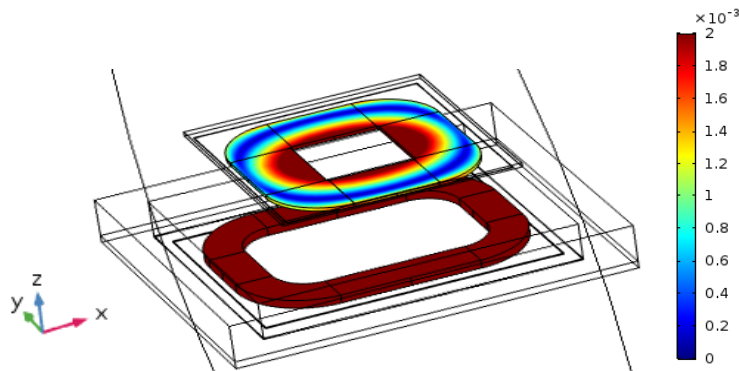


Figura 30. Vector densidad de flujo magnético en los bobinados

#### 4.2.7. Autoinductancias

Al igual que para el modelo WPT 2 Z3, se han obtenido las inductancias mediante la Ley de Ohm en corriente alterna. Como se explicó en el apartado 4.1.7, para calcular determinadas variables, éstas deben expresarse como función de términos conocidos por el programa tras finalizar el estudio. La fórmula introducida para hallar sus valores es la misma que en el apartado anterior.

$$L_G = L_{CÍRCULOS} + L_{RECTANGULOS 1} + L_{RECTANGULOS 2} =$$

$$\text{Imag}\left\{\left[4 * \iiint \frac{EV_{phi} * NumG}{AreaG * I_{ground} * mf.omega}\right] + \left[2 * \iiint \frac{(mf.Ex + mf.Ey + mf.Ez) * NumG}{AreaG * I_{ground} * mf.omega}\right]\right\} +$$

$$\left[2 * \iiint \frac{(mf.Ex + mf.Ey + mf.Ez) * NumG}{AreaG * I_{ground} * mf.omega}\right]\} = 4 * 0,8305 + 2 * 1,4254 + 2 * 1,2993 = 7,47194 \mu H$$

$$L_V = L_{CÍRCULOS} + L_{RECTANGULOS} =$$

$$\text{Imag}\left\{\left[4 * \iiint \frac{EV_{phi} * NumV}{AreaV * Ivehicle * mf.omega}\right] + \left[4 * \iiint \frac{(mf.Ex + mf.Ey + mf.Ez) * NumV}{AreaV * Ivehicle * mf.omega}\right]\right\} =$$

$$= 4 * 7,9908 + 4 * 15,335 = 93,3032 \mu H$$

Como se puede ver, ambas salen exactamente iguales que los valores proporcionados por el director del proyecto ( $L_1 = 7,47 \mu H$  y  $L_2 = 93,30 \mu H$ ).

#### 4.1.8. Coeficiente de Inducción Mutua

También se ha estudiado la influencia del desalineamiento entre primario y secundario en el coeficiente de inducción mutua. Así, y al igual que en el caso anterior se ha calculado para tres casos diferenciados con el fin de graficarla posteriormente. Independientemente del caso, para el cálculo de la inductancia mutua se ha vuelto a utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{Imag}\left\{\left[\iiint \frac{EV_{phi} * NumV}{AreaV * Iground * mf.omega}\right] + \left[\iiint \frac{(mf.Ex + mf.Ey + mf.Ez) * NumV}{AreaV * Iground * mf.omega}\right] + \iiint \frac{EV_{phi} * NumV}{AreaV * Iground * mf.omega}\right\} + \left[\iiint \frac{(mf.Ex + mf.Ey + mf.Ez) * NumV}{AreaV * Iground * mf.omega}\right] + \iiint \frac{EV_{phi} * NumV}{AreaV * Iground * mf.omega}\right\} + \left[\iiint \frac{(mf.Ex + mf.Ey + mf.Ez) * NumV}{AreaV * Iground * mf.omega}\right] + \iiint \frac{EV_{phi} * NumV}{AreaV * Iground * mf.omega}\right\} + \left[\iiint \frac{(mf.Ex + mf.Ey + mf.Ez) * NumV}{AreaV * Iground * mf.omega}\right] + \iiint \frac{EV_{phi} * NumV}{AreaV * Iground * mf.omega}\right\}$$

- $\mathcal{M}_{alineado} = 0,16876 + 0,16876 + 0,16875 + 0,16877 + 0,3255 + 0,3255 + 0,3255 + 0,3255 = 1,97724 \mu H$
- $\mathcal{M}_{semi-desalineado} = 0,14248 + 0,12439 + 0,14438 + 0,18264 + 0,28276 + 0,27926 + 0,30681 + 0,31051 = 1,77323 \mu H$
- $\mathcal{M}_{desalineado} = 0,063763 + 0,084227 + 0,16004 + 0,089409 + 0,18978 + 0,24227 + 0,23574 + 0,18542 = 1,250649 \mu H$

De la misma forma que antes, y como se muestra en la figura, la influencia del desalineamiento en el coeficiente de inducción sigue una función parabólica.

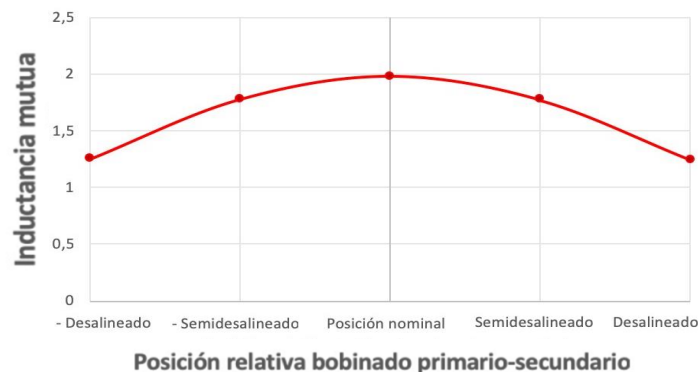


Figura 31. Variación de la inductancia mutua según la posición entre primario y secundario

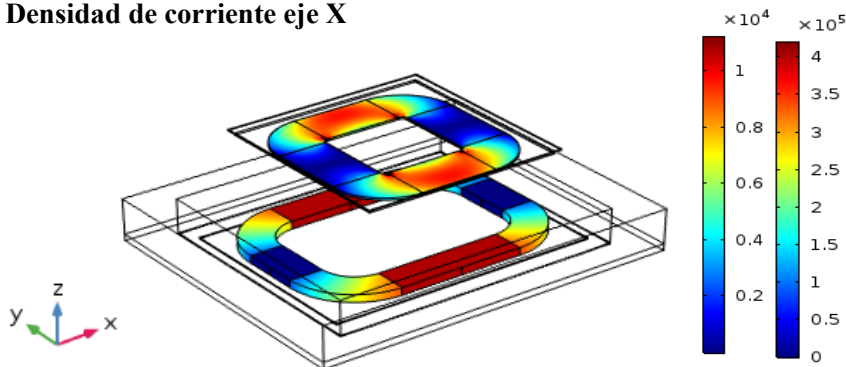
### **4.3. Resultados del modelo WPT combinado**

En este último modelo y de la misma forma que se ha comentado en lo que se refiere a modelización de dicho sistema, por ser una mera hibridación de los dos modelos vistos con anterioridad, se han comentado solo los gráficos más relevantes, aclarando el correspondiente valor de los datos numéricos.

#### **4.3.1. Sentido de la densidad de corriente**

Al igual que ocurría en el apartado 4.2.1. se ha obviado este gráfico dada la fluidez con el programa y la geometría a abordar.

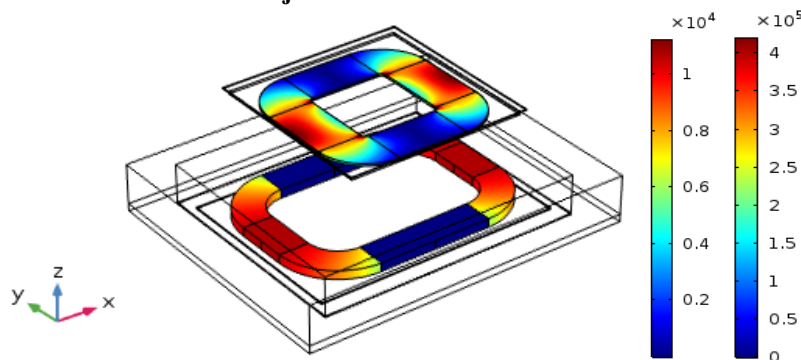
#### **4.3.2. Densidad de corriente eje X**



*Figura 32. Densidad de corriente externa en el primario y densidad de corriente inducida en el secundario según X*

De nuevo se observa como consecuencia del efecto de proximidad, existe una diferencia apreciable entre la componente 'x' de la densidad de corriente real y la introducida,  $4 * 10^5 < 8 * 10^5 \text{ A/m}^2$ , siendo la última  $J_{\text{ground}_{\text{Combinado}}}$ .

#### **4.3.3. Densidad de corriente eje Y**



*Figura 33. Densidad de corriente externa en el primario y densidad de corriente inducida en el secundario según Y*

De la misma forma ocurre con la componente 'y' de dicha densidad de corriente.

#### **4.3.4. Densidad de corriente eje Z**

De nuevo, dada a su prácticamente nula influencia no se ha graficado.

#### 4.3.5. Densidad de flujo magnético en el conjunto entero

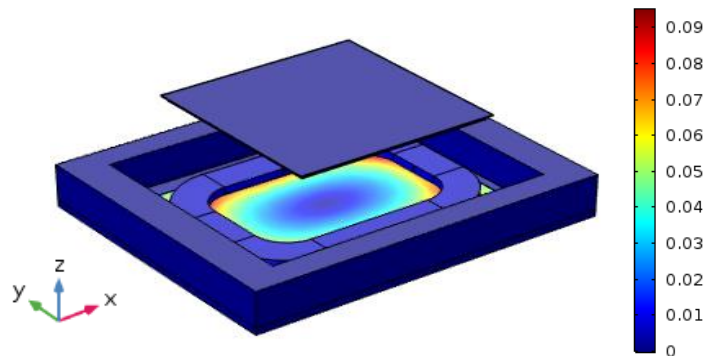


Figura 34. Vector densidad de flujo magnético en los bobinados, aluminios y ferritas

En este caso, y como muestran los valores numéricos que aparecen junto a la leyenda de colores, el campo magnético es visiblemente menor que en el sistema de 50 KW, garantizando por tanto que la ferrita no satura magnéticamente. En lo que se refiere al modelo anterior, la explicación de que, en este caso, los valores del campo magnético sean inferiores se debe a que circula también una menor densidad de corriente por el primario del mismo.

#### 4.3.6. Densidad de flujo magnético en los inductores

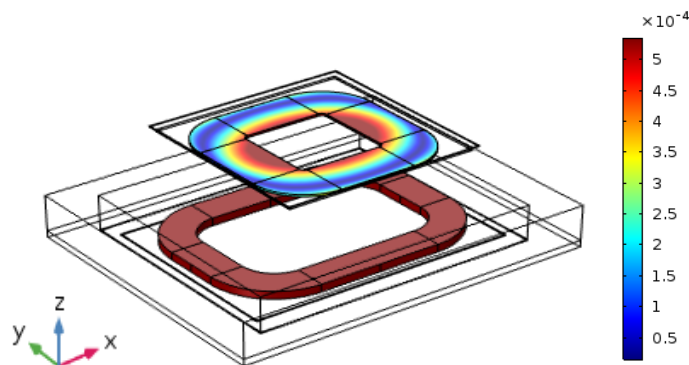


Figura 35. Vector densidad de flujo magnético en los bobinados

Como consecuencia de lo mostrado en el párrafo anterior, la distribución de campo magnético en los inductores es un orden de magnitud menor respecto al modelo de 50 KW.

#### 4.3.7. Autoinductancias

En este caso,  $L_G$  es la mostrada en el apartado 4.2.7. de la página 36 y  $L_V$  es la que aparece en el apartado 4.1.7. de la página 32. Así:

$$L_G = 7,47194 \mu H$$

$$L_V = 43,537 \mu H$$



#### 4.3.8. Coeficiente de Inducción Mutua

En este caso es vital comprobar que la inductancia mutua decrece parabólicamente con el desalineamiento, pues en caso de existir cualquier tipo de dependencia (lineal, cúbica, etc.) implicaría que el sistema no funcionaría correctamente y que, por tanto, no existiría interoperabilidad.

Por ello, al igual que en el resto de modelos, y según la normativa, se ha comprobado el valor de dicho coeficiente de inducción mutua en tres casos diferenciados, y se han representado en la figura 36.

- $\mathcal{M}_{alineado} = 0,10643 + 0,10643 + 0,10642 + 0,10644 + 0,20108 + 0,20109 + 0,20110 + 0,20109 = \mathbf{1,23008 \mu H}$
- $\mathcal{M}_{semi-desalineado} = 0,11092 + 0,09066 + 0,08239 + 0,08977 + 0,1763 + 0,18964 + 0,18766 + 0,17479 = \mathbf{1,10213 \mu H}$
- $\mathcal{M}_{desalineado} = 0,091536 + 0,056698 + 0,047585 + 0,05314 + 0,1191 + 0,12113 + 0,1437 + 0,14109 = \mathbf{0,773979 \mu H}$

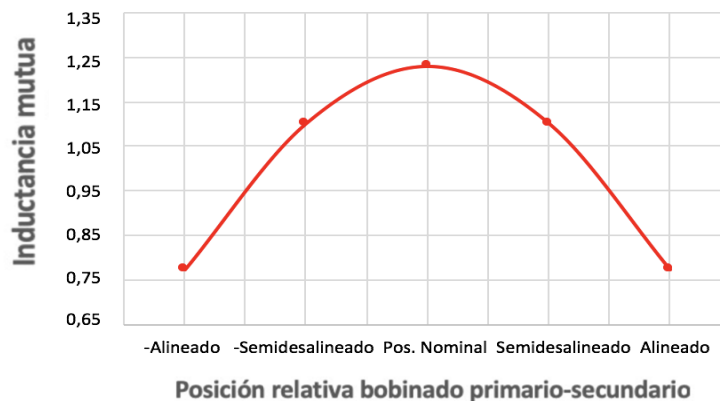


Figura 36. Variación de la inductancia mutua según la posición entre primario y secundario

La figura 36 es la muestra última de que se cumple el fin último del proyecto, que era validar la interoperabilidad entre dos sistemas WPT de 7,7 KW y 50 KW respectivamente.

#### 4.4. Análisis de la potencia transferida por el sistema WPT combinado

Por último, y aunque, si bien es cierto que, la tendencia del sistema combinado en lo referido a campo magnético y densidades de corriente es idéntica a los otros modelos (lo cual avala la interoperabilidad), se cree oportuno validar que efectivamente el sistema combinado transfiere los 7,7 KW, que es la potencia para la que ha sido diseñado.

No se ha creído pertinente realizar la misma comprobación para el sistema WPT 2 Z3, dado que es un sistema estandarizado, ni para el sistema de 50 KW, dado el amplio conocimiento que el tutor de este trabajo de fin de grado tiene sobre el diseño de sistemas WPT y *MATLAB*, siendo este programa la herramienta utilizada para hallar dicho sistema.

Así, y haciendo un recordatorio de lo explicado en el capítulo 1, en un sistema WPT, la potencia absorbida por el secundario se rige por la fórmula (11):

$$P_2 = \frac{(q_s \omega M^2 I_1^2)}{L_2} \quad (11)$$

El único valor que no se obtiene directamente de *COMSOL* es el factor de calidad del secundario. Por eso, previo paso al cálculo de la potencia, se ha hallado dicho factor según (20):

$$q_s = \frac{\omega * L_2}{R_L} \quad (20)$$

La impedancia  $R_L$  puede expresarse en términos de la potencia transferida y el voltaje, como se muestra a continuación:

$$R_L = \frac{V^2}{Pot} \quad (21)$$

Sustituyendo (21) en la fórmula (20), se obtiene entonces:

$$q_s = \frac{\omega * L_2 * Pot}{V^2} \quad (22)$$

Sustituyendo los valores, se obtiene efectivamente el valor del factor de calidad del secundario:

$$q_{sSIST.COMBINADO} = \frac{(2\pi * 85000) * (40,1 * 10^{-6}) * 7700}{270^2} = 2,26$$

Tras esto, y con todos los datos conocidos, se procede a sustituir el valor de los mismos en la fórmula (11):

$$\begin{aligned} P_{2SIST.COMBINADO} &= \frac{q_{sSIST.COMBINADO} * (2\pi * 85000) * ((1,23 * 10^{-6})^2) * ((360)^2)}{40,1 * 10^{-6}} = \\ &= q_{sSIST.COMBINADO} * 2617,9 = 2,26 * 2617,9 = 5916,45 \text{ W} \end{aligned}$$

Como se puede observar, la potencia transferida no es exactamente los 7,7 KW, pero da un valor más que razonable, más aún, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- **El factor de calidad del secundario.** El valor obtenido tras utilizar *COMSOL* es 2,26 como se ha visto, mientras que el valor real (obtenido tras ejecutar el fichero del anexo IV en *MATLAB* es de 2,77). Esta diferencia es debida a las consideraciones previas mostradas en el apartado 3.3 del presente proyecto.
- **La eficiencia.** Para que la transferencia fuera de 7700 W, el sistema debería tener una eficiencia del 100 %, siendo esto imposible. De hecho, es realmente difícil conseguir eficiencias por encima del 94 %.

Tras esto, se puede garantizar, por tanto, que el sistema combinado funciona a la perfección y solo queda esperar a la instauración del mismo.

---

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

La contaminación, el excesivo uso de plásticos o el cambio climático son temas que, pese a haber estado siempre vigentes, adquieren estos días un papel fundamental. Parece que por fin hemos entendido realmente la gravedad del asunto.

Tal es así que, existen multitud de movimientos en las redes sociales e infinidad de artículos en los periódicos abordando dichos temas. Los gobiernos son también conscientes de ello, y están tomando medidas a nivel nacional e internacional.

En lo que respecta al uso de plásticos, desde la Unión Europea, ya se han tomado medidas, prohibiendo a partir de 2021 el uso de plásticos de un solo uso, tales como pajitas, cubiertos, platos, bastoncillos, etc. según apuntaba el periódico 20 minutos el pasado mes de marzo.

En lo que respecta a la contaminación, la forma más eficiente de reducirla considerablemente es llevar a cabo una transición energética global, de forma que las energías renovables dejen de estar en un segundo plano en países como España, donde curiosamente, existe un clima idílico para la generación renovable dada la abundancia de sol y viento.

Para reducir notablemente la contaminación del aire, causante de cientos de miles de muertes cada año, se necesita, además de la generación renovable mencionada con anterioridad; cambiar la flota de vehículos que funcionan con motor de combustión (con su consecuente contaminación) por vehículos de emisión cero, tales como el vehículo alimentado con hidrógeno o el eléctrico.

En lo que respecta a lo último, y los datos así lo avalan, el que aventaja a sus competidores es el vehículo eléctrico. Prueba de ello es su consolidación en países potentes como Noruega o Suecia. Pese a ello, en países como España, Italia, Polonia o Praga solo el 0,9 % de los coches vendidos en 2018 fueron eléctricos. Esta decepcionante realidad, deja entrever que falta todavía un largo camino por recorrer para que el vehículo eléctrico se asiente por completo en el mercado global.

Así, existen varios aspectos a abordar, el primero es conocido por todos: su alto precio, debido principalmente a las baterías de ion-litio; que hasta el momento han demostrado ser las mejores para abastecer este tipo de vehículos. El elevado precio del litio se debe fundamentalmente a su escasez en la naturaleza; pese a que eso no puede cambiar, la forma de abordar el problema pasaría porque las entidades gubernamentales promovieran ayudas económicas a favor de las personas que optaran por adquirir un coche eléctrico, como se hace en determinados países de la UE.

En segundo lugar, y como se ha mencionado con anterioridad: en países como España, la red eléctrica no está realmente preparada para un despliegue masivo de vehículos eléctricos, debiéndose que dar si o si una descarbonización global para solucionarlo.

El último, tiene relación con la evidente falta de puntos de recarga. La baja autonomía de dichos automóviles no se haría tan evidente si existiera abundancia de puntos de carga.

Este proyecto, en relación con lo mostrado en el párrafo anterior, y considerando el inmenso desarrollo existente en lo que respecta a energía inalámbrica, quiere reivindicar la potencialidad de los cargadores inductivos para los vehículos eléctricos. La alta automatización ya existente en multitud de sectores, solo trae beneficios entre los que destacan la eficiencia y la falta de intervención del ser humano. De la misma forma opino en lo referente a la recarga de vehículos eléctricos, permitiendo además una mayor versatilidad, pudiendo darse la carga dinámica mencionada en la introducción.

No quiero con ello infravalorar la carga por cable; pues es una tecnología muy eficiente y, hasta el momento, más desarrollada que la inalámbrica. Personalmente, creo que el futuro de la carga pasa por dos escenarios: el primero, instaurar un alto número de estaciones de carga ultrarrápida tanto alámbrica como inalámbrica repartidas de una forma parecida a las actuales gasolineras, y el segundo, instalar cargadores inductivos lentos interoperables en cada plaza individual de los garajes privados que permitan cargar diferentes tipos de vehículo según la envergadura de los mismos. En este último escenario, considero innecesaria una carga rápida dado el gran número de horas que los vehículos pasan en dichos garajes.

Por último, mencionar en lo referido al primer escenario que, actualmente, ya existe algún punto de recarga ultrarrápida mediante cable, y en lo referido a la carga inalámbrica, el CIRCE gracias a su participación en el proyecto europeo NIWE ha conseguido desarrollar un cargador inductivo ultrarrápido a 300 *KW*.

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

### *Referencias*

- [1] S.Sheik Mohammed, K. Ramasamy and T.Shanmuganatham. “Wireless Power Transmission-A Next Generation Power Transmission System” International Journal of Computer Applications (0975-8887), vol. 1, NO 13, June 2010.
- [2] R&D Engineer, Cemil Aktaş and Aktif Mühendislik. “Wireless Power Transmission Basics and Application Areas”, December 2017.
- [3] Emir Gonzalez Vazquez. “Efecto skin”, March 2017.
- [4] Wei Zhang, Jeff C. White, Arpith Mathew Abraham and Chunting Chris Mi. “Loosely Coupled Transformer Structure and Interoperability Study for EV Wireless Charging Systems” IEEE Transactions on power electronics, vol. 30, NO 11, Novemeber 2015.
- [5] Meng Wang, Jing Feng, Minghui Shen and Yanyan Shi. “Study of Load Characteristics in Wireless Power Transfer System with Ferrite Core” Power in Electromagnetics Research M, Vol. 74, 137-145, May 2018.
- [6] Department of Biomedical Engineering. “Wireless Charging of Implantable Pacemaker’s Battery” Journal of Biosensors & Bioelectronics Volume 9, Issue 3, September 2018.
- [7] Jesús Sallán, Andrés Llombart, Juan Luis Villa Gazulla and Jose Sanz. “Optimal Design of ICPT Systemas Applied to Electric Vehicle Battery Charge”, IEEE Transactions on Industrial Electronics 56: 2140-2149, July 2009.
- [8] Chirag Panchal, Sascha Stegen and Junwei Lu, “Review of static and dynamic wireless electric vehicle chargin system” Engineering Science and Technology, an International Journal Volume 21, Pages 922-937, October 2018.
- [9] Katsuhiro Hata, Takehiro Imura and Yoichi Hori, “Dynamic wireless power transfer system for electric vehicles to simplify ground facilities – power control and efficiency maximization on the secondary side”, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), May 2016.
- [10] S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong and C. T. Rim “Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway-Powered Electric Vehicles”, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics Volume: 3, Issue: 1 Pages: 18 – 36, March 2015.
- [11] Kafeel Ahmed Kalwar, Muhammad Aamir and Saad Mekhilef,” Inductively coupled power transfer (ICPT) for electric vehicle charging”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 47: 462–475, January 2015.

- [12] Chandrasekharan Nataraj, Sheroz Khan, Mohammed Hadi Habaebi and Asan G.A. Muthalif, “General Analysis of Resonance Coupled Wireless Power Transfer (WPT) Using Inductive Coils” *Technical Gazette* 25: 720-726, March 2018.
- [13] Ali Abdolkhani, “Fundamentals of Inductively Coupled Wireless Power Transfer Systems” DOI: 10.5772/63013, June 29th 2016.
- [14] P. Germano and Y. Perriard “Battery Charger for Electric Vehicles based on a Wireless Power Transmission” *CES transaction on electrical machines and systems*, vol. 1, no. 1, pp: 66-71, March 2017.
- [15] Junlong Duan and Weiji Wang, “Electromagnetic Coupling Optimization by coil Design Improvements for Contactless Power Transfer of Electric Vehicle”, *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) Volume 2*, Pages 944-959, November 2018.
- [16] Richard M Craven, Ivor R Smith and Bucur M Novac, “Magnetic Coupling in Tesla transformers” *Applied Physics Research*; Vol. 8, No. 6; November 2016.
- [17] Daisuke Shimode, Toshiaki Murai and Tadashi Sadawa, “Adaptation of Discrete-Type Cores for Secondary Coils of Wireless Power Transfer System for Railway” *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 201, November 2017.
- [18] Universidad Pontificia Comillas, “Cátedra BP de Energía y Sostenibilidad” April 2019.
- [19] Federación Española de Municipios y Provincias, Red Eléctrica de España and Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, “Guía de Movilidad Eléctrica para las Entidades Locales”, February 2019.

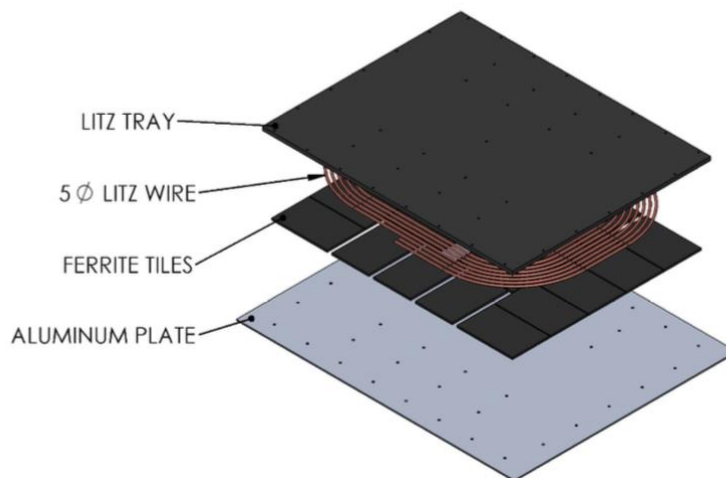
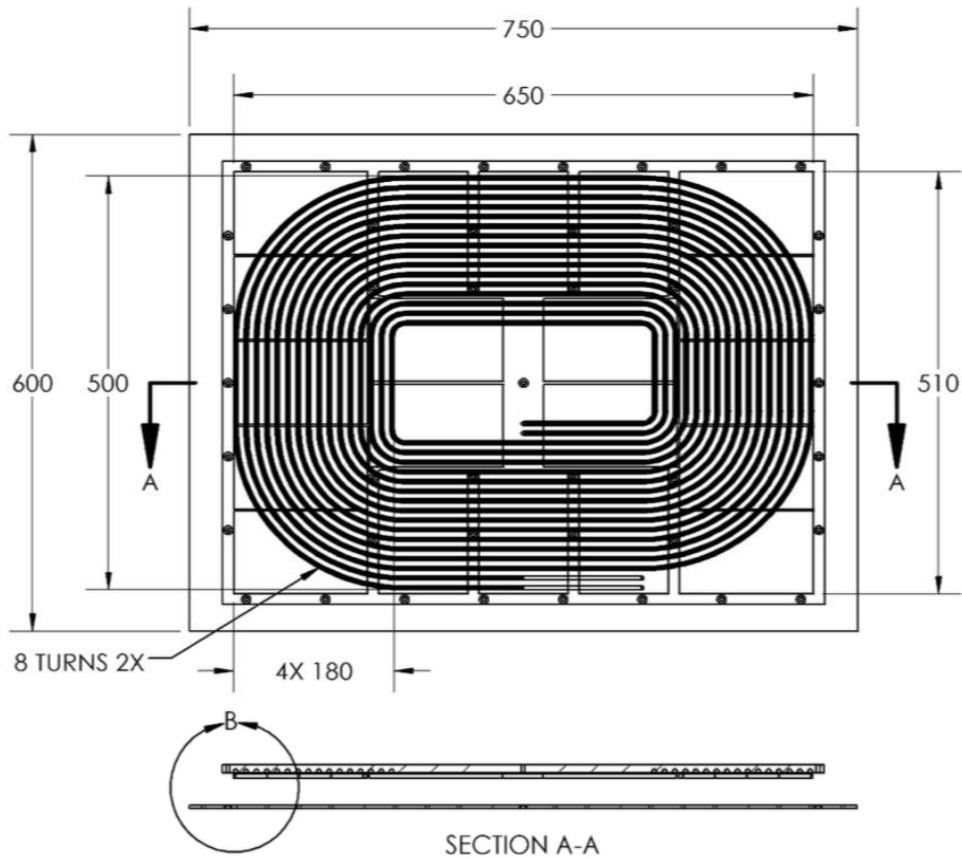
### *Patentes*

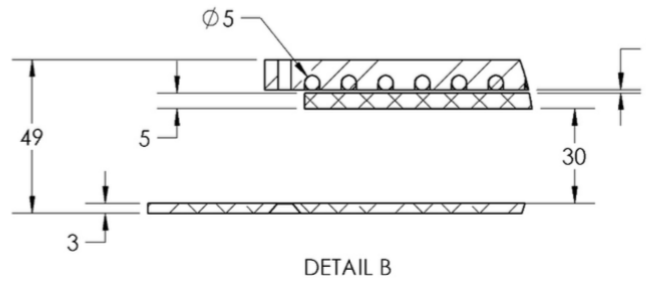
- [P-1] Nikola Tesla, ‘System of transmission of electrical Energy’ US Patent No 645576, September 1897.
- [P-2] Chao, Wen-chung, “Battery charging device for mobile phone”, US Patent No 6057668, May 2000.
- [P-3] Juan Luis Villa Gazulla, Jesús Sallán Arasanz, José Francisco Sanz Osorio, Miguel Garcia Gracia, ‘High-Frequency inductive coupling power transfer system and associated method’ US Patent No 20110074219, May 2009.

## ANEXO I: Geometría del Sistema WPT2-Z3

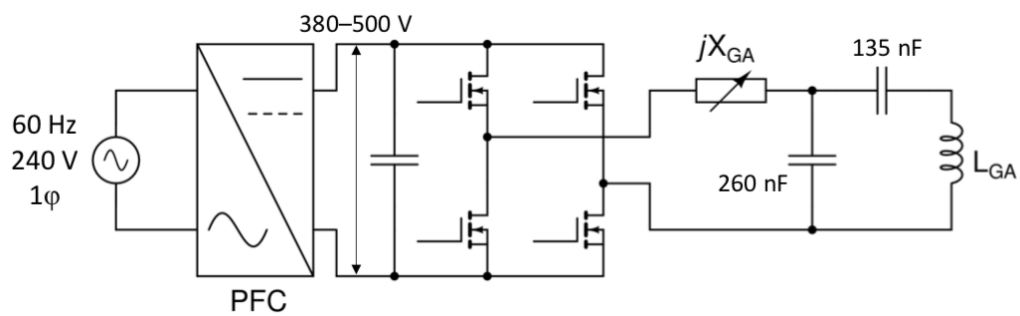
### 1.1. Diseño del lado primario

#### a) Diseño Mecánico



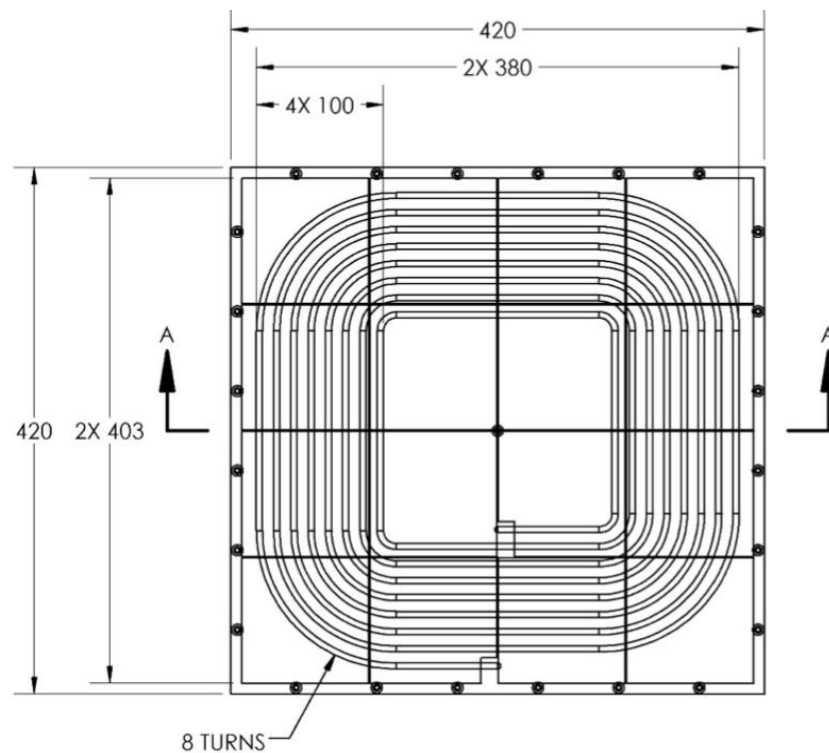


b) Diseño eléctrico

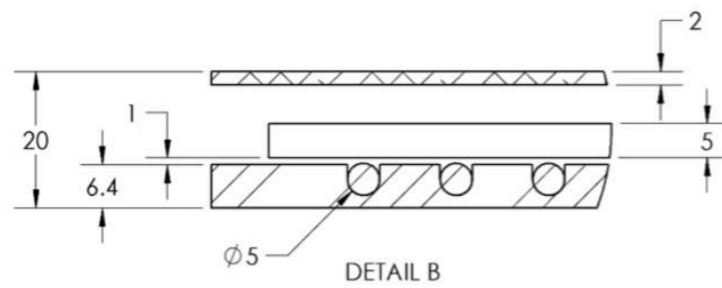
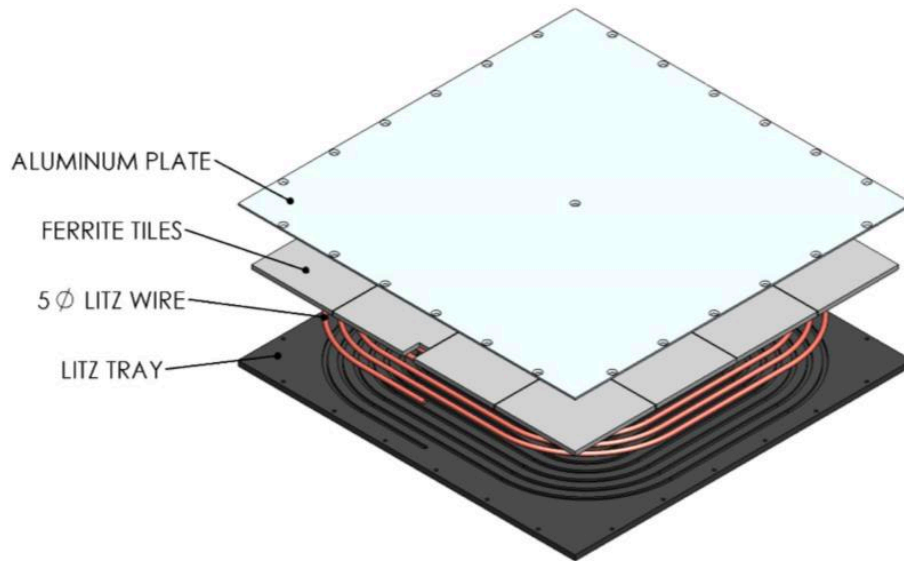


1.2. Diseño del lado secundario

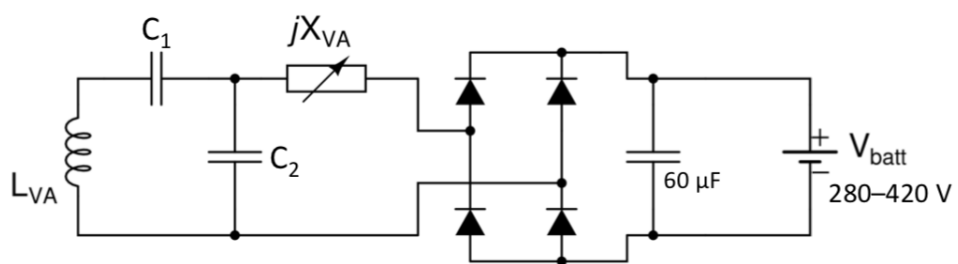
a) Diseño Mecánico







b) Diseño Eléctrico



## Anexo II: Parámetros utilizados para definir el sistema WPT 2 Z3 en COMSOL

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
Iground	$(\sqrt{2} \cdot 7700/190)$ [A]	57.313 A	Intensidad que circula por el primario
Diamground	10[mm]	0.01 m	Diámetro de cada conductor del primario
AreaConG	$(\pi/4) \cdot (\text{Diamground}^2)$	7.854E-5 m <sup>2</sup>	Área de cada conductor del primario
NumG	8	8	Número de conductores del lado primario
LongpletG	180 [mm]	0.18 m	Longitud de la pletina del lado primario
AirecondG	$(\text{LongpletG}) - ((\text{NumG}-1) \cdot \text{Diamground})$	0.11 m	Distancia de aire entre conductores del primario
AnchG	500[mm]	0.5 m	Anchura del bobinado primario
LargG	650[mm]	0.65 m	Largura del bobinado primario
LAirmedioG	$(\text{LargG}) - (2 \cdot \text{LongpletG})$	0.29 m	Hueco de aire en medio según dirección transversal lado primario
AAirmedioG	$(\text{AnchG}) - (2 \cdot \text{LongpletG})$	0.14 m	Hueco de aire en medio según dirección longitudinal lado primario
CencurvasX	$(34 \cdot 650/168)$ [mm]	0.13155 m	Distancia en el eje X al punto desde el que se trazan los arcos del lado primario
CencurvasY	$(15.5 \cdot 650/168)$ [mm]	0.05997 m	Distancia en el eje Y al punto desde el que se trazan los arcos del lado primario
RadiograndeG	190.02976190476[mm]	0.19003 m	Radio externo lado primario
RadiopequenoG	10.029761904762[mm]	0.01003 m	Radio interno lado primario
DistconferG	1[mm]	0.001 m	Distancia entre bobinado primario y ferrita
EspesferrG	5[mm]	0.005 m	Espesor de la ferrita del lado primario
LongferrG	650[mm]	0.65 m	Longitud de la ferrita del lado primario
AnchferrG	510[mm]	0.51 m	Anchura de la ferrita del lado primario
DistferralG	30[mm]	0.03 m	Distancia entre la ferrita y el aluminio (lado primario)
EspesalumG	3[mm]	0.003 m	Espesor del aluminio del lado primario
LongaluG	750[mm]	0.75 m	Longitud del aluminio del lado primario
AnchaluG	600[mm]	0.6 m	Anchura del aluminio del lado primario
Z3	250[mm]	0.25 m	Z3
Ivehicle	$(\sqrt{2} \cdot 7700/280)$ [A]	38.891 A	Intensidad que circula por el secundario
Diamvehicle	5[mm]	0.005 m	Diámetro de cada conductor del secundario
AreaConV	$(\pi/4) \cdot (\text{Diamvehicle}^2)$	1.9635E-5 m <sup>2</sup>	Área de cada conductor del secundario
NumV	8	8	Número de conductores del lado secundario
LongpletV	100[mm]	0.1 m	Longitud de la pletina de vehicle
AirecondV	$(\text{LongpletV}) - ((\text{NumV}-1) \cdot \text{Diamvehicle})$	0.065 m	Espacio de aire entre conductores vehicle
AnchV	380[mm]	0.38 m	Anchura del bobinado secundario
LargV	380[mm]	0.38 m	Largura del bobinado secundario
LAirmedioV	$(\text{LargV}) - (2 \cdot \text{LongpletV})$	0.18 m	Hueco de aire en medio según dirección longitudinal lado secundario
AAirmedioV	$(\text{AnchV}) - (2 \cdot \text{LongpletV})$	0.18 m	Hueco de aire en medio según dirección transversal lado secundario
CencurvasVX	$((31 \cdot 380)/(147.5))$ [mm]	0.079864 m	Distancia en el eje X al punto desde el que se trazan los arcos del lado secundario
CencurvasVY	$(31 \cdot 380/147.5)$ [mm]	0.079864 m	Distancia en el eje Y al punto desde el que se trazan los arcos del lado secundario
RadiograndeV	110.13559322034[mm]	0.11014 m	Radio externo lado secundario
RadiopequenoV	10.135593220339[mm]	0.010136 m	Radio interno lado secundario
DistconferV	1[mm]	0.001 m	Distancia entre bobinado secundario y ferrita
EspesferrV	5[mm]	0.005 m	Espesor de la ferrita del lado secundario
LongferrV	403[mm]	0.403 m	Longitud de la ferrita del lado secundario
AnchferrV	403[mm]	0.403 m	Anchura de la ferrita del lado secundario
DistferralV	5.6[mm]	0.0056 m	Distancia entre la ferrita y el aluminio (lado secundario)
EspesalumV	2[mm]	0.002 m	Espesor del aluminio del lado secundario
LongaluV	420[mm]	0.42 m	Longitud del aluminio del lado secundario
AnchaluV	420[mm]	0.42 m	Anchura del aluminio del lado secundario
Jground	$(\text{NumG} \cdot \text{Iground}) / (\text{LongpletG} \cdot \text{Diamground})$	2.5472E5 A/m <sup>2</sup>	Densidad de corriente que circula por el primario
Jvehicle	$(\text{NumV} \cdot \text{Ivehicle}) / (\text{LongpletV} \cdot \text{Diamvehicle})$	6.2225E5 A/m <sup>2</sup>	Densidad de corriente que circula por el secundario
Frecuencia	85000 [Hz]	85000 Hz	Frecuencia de alimentación del sistema



## Anexo III: Script de *MATLAB* para el cálculo del sistema WPT de 50 KW

---

```
clear;
Vcc=565;
Vbat=350;
Pdeseada=50000;
Vdeseada=350;

%parametros geométricos
h=0.25;
a1=0.33;b1=0.468;a2=0.28;b2=0.28;
c=(a2-a1)/2;
e=-(b2-b1)/2;

fmax=30000;
densi1=3;
densi2=3;
KC=0.90;
if KC==0
    KC1=1;
else
    if KC==1
        KC1=1e15;
    else
        KC1=0.25;
    end
end

%Inicialización de variables
maxN1=20;
maxN2=25;

RL=Vdeseada^2/Pdeseada;
%cálculo para las distintas combinaciones de espiras
geometria cuadrada
Vl=2*sqrt(2)*Vcc/pi();
ya=0;
salta=0;
rendimientodeseado=1;
while ya<1
for N1=1:maxN1
    for N2=1:maxN2
        seccion1(N1,N2)=1e-6;
        seccion2(N1,N2)=1e-6;
        seccioncorrecta=0;
        while seccioncorrecta<1 && salta<1
```



```
A=[N1 N2]
seccion1(N1,N2);
seccion2(N1,N2);

%radios equivalentes de primario y secundario
r01(N1,N2)=sqrt(N1*seccion1(N1,N2)/pi);
r02(N1,N2)=sqrt(N2*seccion2(N1,N2)/pi);
dp1=sqrt(a1^2+b1^2);
dp2=sqrt(a2^2+b2^2);

L1(N1,N2)=4e-
7*(N1^2)*(a1*log(2*a1*b1/(r01(N1,N2)*(a1+dp1)))+b1*log(2*a1
*b1/(r01(N1,N2)*(b1+dp1)))-2*(a1+b1-dp1)+0.25*(a1+b1));
L2(N1,N2)=4e-
7*(N2^2)*(a2*log(2*a2*b2/(r02(N1,N2)*(a2+dp2)))+b2*log(2*a2
*b2/(r02(N1,N2)*(b2+dp2)))-2*(a2+b2-dp2)+0.25*(a2+b2));

%inductancia mutua bobinas distintas
%M tramos horizontales
M1(N1,N2)=N1*N2*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-c)+sqrt(h^2+(e-
b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-c)+sqrt(h^2+e^2+(a1-a2-
c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-c)+sqrt(h^2+e^2+(a1-c)^2))/((a1-
c)+sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a1-c)^2))));
M2(N1,N2)=N1*N2*1e-7*((c*log(((c)+sqrt(h^2+e^2+c^2))/((-
c)+sqrt(h^2+c^2+(e-b1)^2)))+(a2+c)*log(((a2-
c)+sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-
c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+e^2))));
M3(N1,N2)=N1*N2*1e-7*(sqrt(h^2+e^2+(a1-a2-c)^2)-
sqrt(h^2+e^2+(a1-c)^2)-
sqrt(h^2+e^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+e^2+c^2)+sqrt(h^2+(e-
b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2)+sqrt(h^2+(e-
b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(e-b1)^2+c^2));

M11(N1,N2)=N1*N2*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-
c)+sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-
c)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-
c)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(e+b2-
b1)^2+(a1-c)^2))));
M21(N1,N2)=N1*N2*1e-7*((c*log(((c)+sqrt(h^2+e^2+c^2))/((-
c)+sqrt(h^2+c^2+(e+b2-
b1)^2)))+(a2+c)*log(((a2-
c)+sqrt(h^2+(e+b2-
b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-
c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+(b2+e)^2))));
M31(N1,N2)=N1*N2*1e-7*(sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-a2-c)^2)-
sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2)-
sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2)+sqrt(h^2
+(e+b2-b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-
c)^2)+sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(e+b2-
b1)^2+c^2));
```



```
Mh (N1, N2) = (M1 (N1, N2) -M11 (N1, N2) +M2 (N1, N2) -  
M21 (N1, N2) +M3 (N1, N2) -M31 (N1, N2) );  
%M tramos verticales  
  
M4 (N1, N2) =N1*N2*1e-7* ((b1-b2-e) *log( ((b1-b2-e)+sqrt (h^2+(c-  
a1)^2+(b1-b2-e)^2)) / ((b1-b2-e)+sqrt (h^2+c^2+(b1-b2-  
e)^2))) + (b1-e) *log( ((b1-e)+sqrt (h^2+c^2+(b1-e)^2)) / ((b1-  
e)+sqrt (h^2+(c-a1)^2+(b1-e)^2))) );  
M5 (N1, N2) =N1*N2*1e-7* ((e*log( ((-e)+sqrt (h^2+c^2+e^2)) / ((-  
e)+sqrt (h^2+e^2+(c-a1)^2))) + ((b2+e) *log( ((-b2-  
e)+sqrt (h^2+(c-a1)^2+(b2+e)^2)) / ((-b2-  
e)+sqrt (h^2+(b2+e)^2+c^2)))) );  
M6 (N1, N2) =N1*N2*1e-7* (sqrt (h^2+c^2+(b1-b2-e)^2) -  
sqrt (h^2+c^2+(b1-e)^2) -  
sqrt (h^2+c^2+(b2+e)^2) +sqrt (h^2+c^2+e^2) +sqrt (h^2+(c-  
a1)^2+(b1-e)^2) -sqrt (h^2+(c-a1)^2+(b1-b2-e)^2) +sqrt (h^2+(c-  
a1)^2+(b2+e)^2) -sqrt (h^2+(c-a1)^2+e^2));  
  
M41 (N1, N2) =N1*N2*1e-7* ((b1-b2-e) *log( ((b1-b2-  
e)+sqrt (h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-e)^2)) / ((b1-b2-  
e)+sqrt (h^2+(c+a2)^2+(b1-b2-e)^2))) + (b1-e) *log( ((b1-  
e)+sqrt (h^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2)) / ((b1-e)+sqrt (h^2+(c+a2-  
a1)^2+(b1-e)^2))) );  
M51 (N1, N2) =N1*N2*1e-7* ((e*log( ((-  
e)+sqrt (h^2+(c+a2)^2+e^2)) / ((-e)+sqrt (h^2+e^2+(c+a2-  
a1)^2))) + ((b2+e) *log( ((-b2-e)+sqrt (h^2+(c+a2-  
a1)^2+(b2+e)^2)) / ((-b2-e)+sqrt (h^2+(b2+e)^2+(c+a2)^2)))) );  
M61 (N1, N2) =N1*N2*1e-7* (sqrt (h^2+(c+a2)^2+(b1-b2-e)^2) -  
sqrt (h^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2) -  
sqrt (h^2+(c+a2)^2+(b2+e)^2) +sqrt (h^2+(c+a2)^2+e^2) +sqrt (h^2  
+(c+a2-a1)^2+(b1-e)^2) -sqrt (h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-  
e)^2) +sqrt (h^2+(c+a2-a1)^2+(b2+e)^2) -sqrt (h^2+(c+a2-  
a1)^2+e^2));  
  
Mv (N1, N2) = (M4 (N1, N2) -M41 (N1, N2) +M5 (N1, N2) -  
M51 (N1, N2) +M6 (N1, N2) -M61 (N1, N2) );  
%Coeficiente de inducción mutua definitivo  
M (N1, N2) =1* (Mh (N1, N2) +Mv (N1, N2) );  
%factor de acoplamiento  
k (N1, N2) =M (N1, N2) / (sqrt (L1 (N1, N2) *L2 (N1, N2) ));  
%resistencias  
R1 (N1, N2) = (1/57) *N1*2* (b1+a1) / (seccion1 (N1, N2) *1e6) ;  
R2 (N1, N2) = (1/57) *N2*2* (b2+a2) / (seccion2 (N1, N2) *1e6) ;  
  
%inicialización de variables  
ff (N1, N2) =1;  
Pcarga=100000;  
frecuencia=1000;  
while Pcarga>Pdeseada  
%frecuencia de tragajo
```



```
om0 (N1, N2) = (ff (N1, N2) * sqrt (R1 (N1, N2) * (R2 (N1, N2)
+RL) )) / M (N1, N2) ;
f0 (N1, N2) = om0 (N1, N2) / (2*pi) ;
%condensadores de acoplo
C2 (N1, N2) = 1 / ( (L2 (N1, N2) ) * (om0 (N1, N2) ^2) ) ;
C3 (N1, N2) = KC * (L2 (N1, N2) * C2 (N1, N2) ) / (L1 (N1, N2) + (
M (N1, N2) ^4 / (L1 (N1, N2) * L2 (N1, N2) * C2 (N1, N2) * RL ^2) )) ;
Z2f (N1, N2) = R2 (N1, N2) + j * (L2 (N1, N2) * om0 (N1, N2) -
1 / (C2 (N1, N2) * om0 (N1, N2) )) ;
Z1f (N1, N2) = R1 (N1, N2) + j * L1 (N1, N2) * om0 (N1, N2) ;
ZL = RL ;
%cálculo de la potencia en la carga
KM (N1, N2) = (om0 (N1, N2) * M (N1, N2) ) ^2 ;
%impedancia total de secundario vista desde el
primario
Z11 (N1, N2) = Z1f (N1, N2) + KM (N1, N2) / (Z2f (N1, N2) + ZL) ;
ZTPS (N1, N2) = (Z11 (N1, N2) / (1 + Z11 (N1, N2) * j * om0 (N1,
N2) * C3 (N1, N2) )) ;
imagZTPS (N1, N2) = imag (ZTPS (N1, N2) ) ;
C1 (N1, N2) = KC1 * 1 / (imagZTPS (N1, N2) * om0 (N1, N2) ) ;

ZT (N1, N2) = (Z11 (N1, N2) / (1 + Z11 (N1, N2) * j * om0 (N1, N2)
) * C3 (N1, N2) ) + 1 / (j * om0 (N1, N2) * C1 (N1, N2) ) ;

imagZT (N1, N2) = imag (ZT (N1, N2) ) ;
L3 (N1, N2) = -imagZT (N1, N2) / om0 (N1, N2) ;

Ztotal (N1, N2) = ZT (N1, N2) + j * om0 (N1, N2) * L3 (N1, N2) ;
%intensidades de primario y secundario

Argumentogrados (N1, N2) = -
atan (imag (Ztotal (N1, N2) ) / real (Ztotal (N1, N2) )) * 360 / (2*pi) ;
Argumentoredondeado (N1, N2) = round (Argumentogrados
(N1, N2) ) ;

I1 (N1, N2) = V1 / Ztotal (N1, N2) ;
Vp (N1, N2) = V1 -
I1 (N1, N2) * (1 / (j * om0 (N1, N2) * C1 (N1, N2) )) -
I1 (N1, N2) * j * L3 (N1, N2) * om0 (N1, N2) ;
Ic3 (N1, N2) = Vp (N1, N2) * j * om0 (N1, N2) * C3 (N1, N2) ;
VL3 (N1, N2) = L3 (N1, N2) * om0 (N1, N2) * I1 (N1, N2) ;
Ip (N1, N2) = I1 (N1, N2) - Ic3 (N1, N2) ;
I2 (N1, N2) = Ip (N1, N2) * j * om0 (N1, N2) * M (N1, N2) / (Z2f (
N1, N2) + ZL) ;

densiI1 (N1, N2) = (abs (Ip (N1, N2) ) / seccion1 (N1, N2) )
*1e-6;
densiI2 (N1, N2) = (abs (I2 (N1, N2) ) / seccion2 (N1, N2) )
*1e-6;
```



```
%potencia en la carga
PL(N1,N2)=RL*(abs(I2(N1,N2))^2);
VL(N1,N2)=I2(N1,N2)*ZL;
% tensión en los condensadores de acoplo de
primario y secundario
VC10(N1,N2)=I1(N1,N2)*(1/(j*C1(N1,N2)*om0(N1,N2)
));
VC20(N1,N2)=I2(N1,N2)*(1/(j*C2(N1,N2)*om0(N1,N2)
));
VC3(N1,N2)=Ic3(N1,N2)*1/(om0(N1,N2)*C3(N1,N2));
%admitancia total de secundario vista desde
primario
Y11(N1,N2)=1/Z11(N1,N2);
%rendimiento del sistema
Pcarga=PL(N1,N2);
P1(N1,N2)=real(V1*I1(N1,N2));
rend(N1,N2)=PL(N1,N2)/P1(N1,N2);

frecuencia=f0(N1,N2);
%factor de acoplamiento entre primario y
secundario
FA(N1,N2)=M(N1,N2)/sqrt(L1(N1,N2)*L2(N1,N2));
ff(N1,N2)=ff(N1,N2)+0.1;
Qp(N1,N2)=L1(N1,N2)*RL/(om0(N1,N2)*M(N1,N2)^2);
Qs(N1,N2)=om0(N1,N2)*L2(N1,N2)/RL;
if Qp(N1,N2)>Qs(N1,N2)
fun(N1,N2)=(1/(1+abs((log(Qp(N1,N2)/Qs(N1,N2))))
))* (1/(1+abs(log(fmax/f0(N1,N2)))));
relQ(N1,N2)=1;
else
fun(N1,N2)=0*(1/(1+abs((log(Qp(N1,N2)/Qs(N1,N2))))
))* (1/(1+abs(log(fmax/f0(N1,N2)))));
relQ(N1,N2)=0;
end

end

if densiI1(N1,N2)>densi1
if seccion1(N1,N2)<500e-6
seccion1(N1,N2)=seccion1(N1,N2)+1e-6;
else
seccion1(N1,N2)=seccion1(N1,N2)+10e-6;
end
end
if densiI2(N1,N2)>densi2
seccion2(N1,N2)=seccion2(N1,N2)+1e-6;
end
if Argumentoredondeado(N1,N2)<-1
ff(N1,N2)=ff(N1,N2)+0.1;
end
if densiI1(N1,N2)<=densi1 && densiI2(N1,N2)<=densi2
```



```
        seccioncorrecta=1;
        end
    end
    if seccioncorrecta==1 && f0(N1,N2)>0.9*fmax &&
f0(N1,N2)<1.1*fmax && fun(N1,N2)>0
        f0(N1,N2)
        salta=1
        maxN1_optimo=N1
        maxN2_optimo=N2
        disp('solución optima')
        opt=[N1 N2]
        N1_optimo=N1;
        s1_optima=seccion1(N1,N2)*1e6
        N2_optimo=N2;
        s2_optima=seccion2(N1,N2)*1e6
        foptima=f0(N1,N2)
        VC1_optima=abs(VC10(N1,N2))
        VC2_optima=abs(VC20(N1,N2))
        VC3_optima=abs(VC3(N1,N2))
        VL3_optima=abs(VL3(N1,N2))
        C1_optima=C1(N1,N2);
        C2_optima=C2(N1,N2);
        C3_optima=C3(N1,N2);
        I1_optima=abs(I1(N1,N2));
        I2_optima=abs(I2(N1,N2));
        IC3_optima=abs(Ic3(N1,N2));
        IC2_optima=abs(I2(N1,N2));
        L3_optima=L3(N1,N2);
        PL_optima=PL(N1,N2);
        P1_optima=P1(N1,N2);
        ff_optimo=ff(N1,N2);
        rendimientoencontrado=1;
        ya=1;
        M_optima=M(N1,N2);
        L1_optima=L1(N1,N2);
        L2_optima=L2(N1,N2);

    end
    if salta==0 && N1==maxN1 && N2==maxN2

        disp('No hay solución')
        return
    end
end
end

%Gráficas de las distintas variables
```





```
%radios equivalentes
ZL=RL;

r01=sqrt(N1_optimo*s1_optima/pi);
r02=sqrt(N2_optimo*s2_optima/pi);
cantcobre1=N1_optimo*2*(a1+b1)*s1_optima;
cantcobre2=N2_optimo*2*(a2+b2)*s2_optima;
cobretotal=cantcobre1+cantcobre2;
copper=cobretotal*1e6*8.96/1000;

dp1=sqrt(a1^2+b1^2);
dp2=sqrt(a2^2+b2^2);
%Factor de acoplamiento
k=M_optima/(sqrt(L1_optima*L2_optima));
%resistencias
R1_optima=(1/57)*N1_optimo*2*(b1+a1)/(s1_optima);
R2_optima=(1/57)*N2_optimo*2*(b2+a2)/(s2_optima);
%frecuencia de trabajo
%om0=(ff*sqrt(R1*(R2+RL)))/M;
%om0=(sqrt(R1*(R2+RL)))/M
om0=2*pi()*foptima;
L1=4e-
7*(N1_optimo^2)*(a1*log(2*a1*b1/(r01*(a1+dp1)))+b1*log(2*a1
*b1/(r01*(b1+dp1)))-2*(a1+b1-dp1)+0.25*(a1+b1));
L2=4e-
7*(N2_optimo^2)*(a2*log(2*a2*b2/(r02*(a2+dp2)))+b2*log(2*a2
*b2/(r02*(b2+dp2)))-2*(a2+b2-dp2)+0.25*(a2+b2));
%inductancia mutua bobinas distintas
%M tramos horizontales
M1=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-
c)+sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-
c)+sqrt(h^2+e^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-
c)+sqrt(h^2+e^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a1-
c)^2))));
M2=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((c-
c)+sqrt(h^2+e^2+c^2))/((-c)+sqrt(h^2+c^2+(e-
b1)^2)))+(a2+c)*log(((a2+c)+sqrt(h^2+(e-
b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(h^2+(e-
b1)^2+(a2+c)^2+e^2))));
M3=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+e^2+(a1-a2-c)^2)-
sqrt(h^2+e^2+(a1-c)^2)-
sqrt(h^2+e^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+e^2+c^2)+sqrt(h^2+(e-
b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2)+sqrt(h^2+(e-
b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(e-b1)^2+c^2));

M11=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-
c)+sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-
c)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-
c)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(e+b2-
b1)^2+(a1-c)^2))));
```

```

M21=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log((( -
c)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2)))/((-c)+sqrt(h^2+c^2+(e+b2-
b1)^2))))+(a2+c)*log((( -a2-c)+sqrt(h^2+(e+b2-
b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+(b2+e)^2)))));
M31=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-a2-
c)^2)-sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2)-
sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2)+sqrt(h^2
+(e+b2-b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-
c)^2)+sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(e+b2-
b1)^2+c^2));

Mh=(M1-M11+M2-M21+M3-M31);
%M tramos verticales

M4=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((b1-b2-e)*log(((b1-b2-
e)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-b2-e)^2))/((b1-b2-
e)+sqrt(h^2+c^2+(b1-b2-e)^2)))+(b1-e)*log(((b1-
e)+sqrt(h^2+c^2+(b1-e)^2))/((b1-e)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-
e)^2))));
M5=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((e*log((( -
e)+sqrt(h^2+c^2+e^2))/((-e)+sqrt(h^2+e^2+(c-
a1)^2))))+(b2+e)*log((( -b2-e)+sqrt(h^2+(c-
a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-e)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2))));
M6=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+c^2+(b1-b2-e)^2)-
sqrt(h^2+c^2+(b1-e)^2)-
sqrt(h^2+c^2+(b2+e)^2)+sqrt(h^2+c^2+e^2)+sqrt(h^2+(c-
a1)^2+(b1-e)^2)-sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-b2-e)^2)+sqrt(h^2+(c-
a1)^2+(b2+e)^2)-sqrt(h^2+(c-a1)^2+e^2));

M41=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((b1-b2-e)*log(((b1-b2-
e)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-e)^2))/((b1-b2-
e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-b2-e)^2)))+(b1-e)*log(((b1-
e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2))/((b1-e)+sqrt(h^2+(c+a2-
a1)^2+(b1-e)^2))));
M51=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((e*log((( -
e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+e^2))/((-e)+sqrt(h^2+e^2+(c+a2-
a1)^2))))+(b2+e)*log((( -b2-e)+sqrt(h^2+(c+a2-
a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-e)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(c+a2)^2))));
M61=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-b2-
e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2)-
sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b2+e)^2)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+e^2)+sqrt(h^2
+(c+a2-a1)^2+(b1-e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-
e)^2)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b2+e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2-
a1)^2+e^2));
Mv=(M4-M41+M5-M51+M6-M61);%Coeficiente de inducción mutua
definitivo
M=1*(Mh+Mv);

M_optima=M;
Z2f=R2_optima+j*(L2_optima*om0-1/(C2_optima*om0));
Z1f=R1_optima+j*L1_optima*om0;

```



```
%potencia en la carga
KM_optima=(om0*M_optima)^2;
Z11=Z1f+KM_optima/(Z2f+ZL);
ZTPS=(Z11/(1+Z11*j*om0*C3_optima));
imagZTPS=imag(ZTPS);
ZT=(Z11/(1+Z11*j*om0*C3_optima)+1/(j*om0*C1_optima));
Ztotal=ZT+j*L3_optima*om0;
A2=-atan(imag(Ztotal)/real(Ztotal));
A2grados=A2*360/(2*pi);
A2redondeado=round(A2grados);
I1=V1/Ztotal;
modI1=abs(I1);
Vp=V1-I1*(1/(j*om0*C1_optima))-I1*j*L3_optima*om0;

Ic3=Vp*j*om0*C3_optima;
modIc3=abs(Ic3);
Ip=I1-Ic3;
modIp=abs(Ip);
I2=Ip*j*om0*M_optima/(Z2f+ZL);
I2mod=abs(I2);
VL2=I2*j*om0*L2_optima;
PL=RL*(abs(I2)^2);
P1=real(V1*I1);
%rendimiento
rend=PL/P1
VC1=abs(I1*(1/(j*C1_optima*om0)));
VC2=abs(I2*(1/(j*C2_optima*om0)));
VL=ZL*I2mod;
for p=1:100
    distancia(p)=(0.01+0.015*p)*h;
    relaciondistancia(p)=distancia(p)/h;

M1_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-c)+sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-c)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-c)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a1-c)^2))));
M2_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((c)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+c^2))/((-c)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+(e-b1)^2))))+(a2+c)*log(((a2+c)+sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(distancia(p)^2+(a2+c)^2+e^2))));
M3_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(distancia(p)^2+e^2+(a1-a2-c)^2)-sqrt(distancia(p)^2+e^2+(a1-c)^2)-sqrt(distancia(p)^2+e^2+(a2+c)^2)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+c^2)+sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2)+sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+c^2));
```



```
M11_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-  
c)*log(((a1-a2-c)+sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-  
c)^2)))/((a1-a2-c)+sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(a1-a2-  
c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2))/((a1-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a1-c)^2)));  
M21_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((a1-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+c^2)))/((a1-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+(e+b2-b1)^2)))+(a2+c)*log(((a2-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+(a2+c)^2+(b2+e)^2)));  
M31_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-  
7*(sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(a1-a2-c)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(a2+c)^2)+sqrt(distancia(p)^2+  
(b2+e)^2+c^2)+sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a1-c)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-  
c)^2)+sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a2+c)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+c^2));
```

```
Mh_distancia(p)=(M1_distancia(p)-  
M11_distancia(p)+M2_distancia(p)-  
M21_distancia(p)+M3_distancia(p)-M31_distancia(p));  
%M tramos verticales
```

```
M4_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((b1-b2-  
e)*log(((b1-b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b1-b2-  
e)^2)))/((b1-b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+(b1-b2-  
e)^2)))+(b1-e)*log(((b1-e)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+(b1-  
e)^2)))/((b1-e)+sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b1-e)^2)));  
M5_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((e*log(((a1-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+e^2)))/((a1-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+(c-a1)^2)))+(b2+e)*log(((b2-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+c^2))));  
M6_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-  
7*(sqrt(distancia(p)^2+c^2+(b1-b2-e)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+c^2+(b1-e)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+c^2+(b2+e)^2)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+e  
^2)+sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b1-e)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b1-b2-  
e)^2)+sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b2+e)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+e^2));
```

```
M41_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((b1-b2-  
e)*log(((b1-b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-  
e)^2)))/((b1-b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+(b1-b2-  
e)^2)))+(b1-e)*log(((b1-
```



```
e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2))/((b1-
e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b1-e)^2)));
M51_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((e*log((-
e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+e^2)))/((-
e)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+(c+a2-a1)^2)))+(b2+e)*log((-
b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-
e)+sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(c+a2)^2)));
M61_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo(1)*1e-
7*(sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+(b1-b2-e)^2)-
sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2)-
sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+(b2+e)^2)+sqrt(distancia(p)^2+
(c+a2)^2+e^2)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b1-e)^2)-
sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-
e)^2)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b2+e)^2)-
sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+e^2));
Mv_distancia(p)=(M4_distancia(p)-
M41_distancia(p)+M5_distancia(p)-
M51_distancia(p)+M6_distancia(p)-
M61_distancia(p));%Coeficiente de inducción mutua definitivo
M_distancia(p)=(Mh_distancia(p)+Mv_distancia(p));

%Factor de acoplamiento
k_distancia(p)=M_distancia(p)/(sqrt(L1_optima*L2_optima
));
Z2f_distancia(p)=R2_optima+j*(L2_optima*om0-
1/(C2_optima*om0));
Z1f_distancia(p)=R1_optima+j*(L1_optima*om0);

%potencia en la carga
KM_distancia(p)=(om0*M_distancia(p))^2;
Z11_distancia(p)=Z1f_distancia(p)+KM_distancia(p)/(Z2f_
distancia(p)+RL);
ZT_distancia(p)=(Z11_distancia(p)/(1+Z11_distancia(p)*j
*om0*C3_optima))+1/(j*om0*C1_optima);

Ztotal_distancia(p)=ZT_distancia(p)+j*L3_optima*om0;
Argumento_distancia(p)=-
atan(imag(Ztotal_distancia(p))/real(Ztotal_distancia(p)));
Argumentogrados_distancia(p)=Argumento_distancia(p)*360
/(2*pi);
Argumentoredondeado_distancia(p)=round(Argumentogrados_
distancia(p));

I1_distancia(p)=V1/Ztotal_distancia(p);
modI1_distancia(p)=abs(I1_distancia(p));
Vp_distancia(p)=V1-
I1_distancia(p)*(1/(j*om0*C1_optima))-
I1_distancia(p)*j*L3_optima*om0;
Ic3_distancia(p)=Vp_distancia(p)*j*om0*C3_optima;
modIc3_distancia(p)=abs(Ic3_distancia(p));
Ip_distancia(p)=I1_distancia(p)-Ic3_distancia(p);
```

```

    modIp_distancia(p)=abs(Ip_distancia(p));
    I2_distancia(p)=Ip_distancia(p)*j*om0*M_distancia(p)/(Z
2f_distancia(p)+ZL);
    modI2_distancia(p)=abs(I2_distancia(p));

    PL_distancia(p)=RL*(modI2_distancia(p)^2);
    P1_distancia(p)=real(V1*I1_distancia(p));
    rend_distancia(p)=PL_distancia(p)/P1_distancia(p);
    %rendimiento

    VC1_distancia(p)=abs(I1_distancia(p)*(1/(j*C1_optima)))
;
    VC2_distancia(p)=abs(I2_distancia(p)*(1/(j*C2_optima)))
;
    VL_distancia(p)=RL*modI2_distancia(p);

    end

    figure(30);
    title('P=3.7 kW; Vbat=360V; Vbus=325V; freq=85 kHz;
a1=0.6; a2=0.8; b1=0.8; b2=1; h=0.2');
    subplot(4,6,1)
    plot(distancia,modI1_distancia)
    axis('auto')
    xlabel('airgap[m]')
    ylabel('I1[A]')
    grid on
    hold on

    subplot(4,6,2)
    plot(distancia,Argumentoredondeado_distancia)
    axis('auto')
    xlabel('airgap[m]')
    ylabel('Argument[degree]')
    grid on
    hold on

    subplot(4,6,3)
    plot(distancia,VL_distancia)
    axis('auto')
    xlabel('airgap[m]')
    ylabel('VL[V]')
    grid on
    hold on

    subplot(4,6,4)
    plot(distancia,modI2_distancia)
    axis('auto')
    xlabel('airgap[m]')
    ylabel('I2[A]')
    grid on

```



```
hold on

subplot(4,6,5)
plot(distancia,PL_distancia)
axis('auto')
xlabel('airgap[m]')
ylabel('PL[W]')
grid on
hold on

subplot(4,6,6)
plot(distancia,rend_distancia)
axis('auto')
xlabel('airgap[m]')
ylabel('Efficiency[%]')
grid on
hold on

for p=1:150
    omega(p)=(0.98+0.0012*p)*om0;
    f(p)=omega(p)/(2*pi);
    relacionfrecuencia(p)=omega(p)/om0;
    %Z2f=R2+j*L2*om0+(1/(C2*j*om0+(1/ZL)))
    %Z2f=1/(1/(R2+j*L2*om0)+(C2*j*om0)+(1/ZL))
    Z2f_freq(p)=R2_optima+j*(L2_optima*omega(p)-
1/(C2_optima*omega(p)));
    Z1f_freq(p)=R1_optima+j*(L1_optima*omega(p));

    %potencia en la carga
    KM_freq(p)=(omega(p)*M_optima)^2;
    Z11_freq(p)=Z1f_freq(p)+KM_freq(p)/(Z2f_freq(p)+ZL);
    ZT_freq(p)=(Z11_freq(p)/(1+Z11_freq(p)*j*omega(p)*C3_optima))+1/(j*omega(p)*C1_optima);
    Ztotal_freq(p)=ZT_freq(p)+j*L3_optima*omega(p);

    A2_freq(p)=-
atan(imag(Ztotal_freq(p))/real(Ztotal_freq(p)));
    A2grados_freq(p)=A2_freq(p)*360/(2*pi);
    A2redondeado_freq(p)=round(A2grados_freq(p));

    I1_freq(p)=V1/Ztotal_freq(p);
    modI1_freq(p)=abs(I1_freq(p));
    Vp_freq(p)=V1-I1_freq(p)*(1/(j*omega(p)*C1_optima))-
I1_freq(p)*j*L3_optima*omega(p);
    Ic3_freq(p)=Vp_freq(p)*j*omega(p)*C3_optima;
    modIc3_freq(p)=abs(Ic3_freq(p));
    Ip_freq(p)=I1_freq(p)-Ic3_freq(p);
    modIp_freq(p)=abs(Ip_freq(p));
    I2_freq(p)=Ip_freq(p)*j*omega(p)*M_optima/(Z2f_freq(p)+
ZL);
    modI2_freq(p)=abs(I2_freq(p));
```

```

PL_freq(p)=RL*(modI2_freq(p)^2);
P1_freq(p)=real(V1*I1_freq(p));
rend_freq(p)=PL_freq(p)/P1_freq(p);
%rendimiento

VC1_freq(p)=abs(I1_freq(p)*(1/(j*C1_optima*omega(p))));
VC2_freq(p)=abs(I2_freq(p)*(1/(j*C2_optima*omega(p))));
VL_freq(p)=abs(ZL*modI2_freq(p));

end
figure(30)

subplot(4,6,7)
plot(f,modI1_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('I1[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,8)
plot(f,A2redondeado_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('Argument[degree]')
grid on
hold on

subplot(4,6,9)
plot(f,VL_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('VL')
grid on
hold on

subplot(4,6,10)
plot(f,modI2_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('I2[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,11)
plot(f,PL_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('PL[W]')
grid on

```



```

hold on

subplot(4,6,12)
plot(f,rend_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('Efficiency[%]')
grid on
hold on

for p=1:150
    posy(p)=(-100*b2/100)+(2*b2/100)*p;
    posyrelativa(p)=(posy(p)-e)*100/b2;

M1_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-c)+sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a1-a2-c)^2)))/((a1-a2-c)+sqrt(h^2+posy(p)^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-c)+sqrt(h^2+posy(p)^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a1-c)^2))));
M2_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((c)+sqrt(h^2+posy(p)^2+c^2))/((-c)+sqrt(h^2+c^2+(posy(p)-b1)^2)))))+(a2+c)*log(((a2+c)+sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+posy(p)^2))));
M3_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+posy(p)^2+(a1-a2-c)^2)-sqrt(h^2+posy(p)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+posy(p)^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+posy(p)^2+c^2)+sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a1-a2-c)^2)+sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+c^2));

M11_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-c)+sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-c)+sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-c)+sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a1-c)^2))));
M21_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((c)+sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+c^2))/((-c)+sqrt(h^2+c^2+(posy(p)+b2-b1)^2)))))+(a2+c)*log(((a2+c)+sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+(b2+posy(p))^2))));
M31_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+(a1-a2-c)^2)-sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+c^2)+sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a1-a2-c)^2)+sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+c^2));

```

```

Mh_pos(p) = (M1_pos(p) - M11_pos(p) + M2_pos(p) -
M21_pos(p) + M3_pos(p) - M31_pos(p));
%M tramos verticales

M4_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * ((b1 - b2 -
posy(p)) * log(((b1 - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + (c - a1)^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2)) / ((b1 - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + c^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2))) + (b1 - posy(p)) * log(((b1 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + c^2 + (b1 - posy(p))^2)) / ((b1 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (c - a1)^2 + (b1 - posy(p))^2)))));
M5_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * ((posy(p)) * log((( -
posy(p)) + sqrt(h^2 + c^2 + posy(p)^2)) / (( -
posy(p)) + sqrt(h^2 + posy(p)^2 + (c -
a1)^2))) + ((b2 + posy(p)) * log((( - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + (c -
a1)^2 + (b2 + posy(p))^2)) / (( - b2 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (b2 + posy(p))^2 + c^2)))));
M6_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * (sqrt(h^2 + c^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2) - sqrt(h^2 + c^2 + (b1 - posy(p))^2) -
sqrt(h^2 + c^2 + (b2 + posy(p))^2) + sqrt(h^2 + c^2 + posy(p)^2) + sqrt(h
^2 + (c - a1)^2 + (b1 - posy(p))^2) - sqrt(h^2 + (c - a1)^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2) + sqrt(h^2 + (c - a1)^2 + (b2 + posy(p))^2) - sqrt(h^2 + (c -
a1)^2 + posy(p)^2));

M41_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * ((b1 - b2 -
posy(p)) * log(((b1 - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2 - a1)^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2)) / ((b1 - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2))) + (b1 - posy(p)) * log(((b1 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + (b1 - posy(p))^2)) / ((b1 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2 - a1)^2 + (b1 - posy(p))^2)))));
M51_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * ((posy(p)) * log((( -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + posy(p)^2)) / (( -
posy(p)) + sqrt(h^2 + posy(p)^2 + (c + a2 -
a1)^2))) + ((b2 + posy(p)) * log((( - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2 -
a1)^2 + (b2 + posy(p))^2)) / (( - b2 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (b2 + posy(p))^2 + (c + a2)^2)))));
M61_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * (sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + (b1 -
b2 - posy(p))^2) - sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + (b1 - posy(p))^2) -
sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + (b2 + posy(p))^2) + sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + posy(p)
^2) + sqrt(h^2 + (c + a2 - a1)^2 + (b1 - posy(p))^2) - sqrt(h^2 + (c + a2 -
a1)^2 + (b1 - b2 - posy(p))^2) + sqrt(h^2 + (c + a2 -
a1)^2 + (b2 + posy(p))^2) - sqrt(h^2 + (c + a2 - a1)^2 + posy(p)^2));
Mv_pos(p) = (M4_pos(p) - M41_pos(p) + M5_pos(p) -
M51_pos(p) + M6_pos(p) - M61_pos(p));
%Coeficiente de inducción mutua definitivo
M_pos(p) = 1 * (Mh_pos(p) + Mv_pos(p));

%Factor de acoplamiento
k_pos(p) = M_pos(p) / (sqrt(L1_optima * L2_optima));
Z2f_pos(p) = R2_optima + j * (L2_optima * om0 -
1 / (C2_optima * om0));

```



```
Z1f_pos(p)=R1_optima+j*(L1_optima*om0);
V(p)=V1;
%potencia en la carga
KM_pos(p)=(om0*M_pos(p))^2;
Z11_pos(p)=Z1f_pos(p)+KM_pos(p)/(Z2f_pos(p)+RL);
ZT_pos(p)=(Z11_pos(p)/(1+Z11_pos(p)*j*om0*C3_optima))+1
/(j*om0*C1_optima);

Ztotal_pos(p)=ZT_pos(p)+j*L3_optima*om0;

A2_pos(p)=-
atan(imag(Ztotal_pos(p))/real(Ztotal_pos(p)));
A2grados_pos(p)=A2_pos(p)*360/(2*pi);
A2redondeado_pos(p)=round(A2grados_pos(p));

I1_pos(p)=V1/Ztotal_pos(p);
modI1_pos(p)=abs(I1_pos(p));
Vp_pos(p)=V1-I1_pos(p)*(1/(j*om0*C1_optima))-
I1_pos(p)*j*L3_optima*om0;
modVp_pos(p)=abs(Vp_pos(p));
IC3_pos(p)=Vp_pos(p)*j*om0*C3_optima;
modIC3_pos(p)=abs(IC3_pos(p));
Ip_pos(p)=I1_pos(p)-IC3_pos(p);
modIp_pos(p)=abs(Ip_pos(p));
I2_pos(p)=Ip_pos(p)*j*om0*M_pos(p)/(Z2f_pos(p)+ZL);
modI2_pos(p)=abs(I2_pos(p));

PL_pos(p)=RL*(modI2_pos(p)^2);
P1_pos(p)=real(V1*I1_pos(p));
rend_pos(p)=PL_pos(p)/P1_pos(p);
%rendimiento

VC1_pos(p)=abs(I1_pos(p)*(1/(j*C1_optima*om0)));
VC2_pos(p)=abs(I2_pos(p)*(1/(j*C2_optima*om0)));
VL_pos(p)=RL*modI2_pos(p);

end

figure(30);

subplot(4,6,13)
plot(posyrelativa,modI1_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('I1[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,14)
plot(posyrelativa,A2redondeado_pos)
axis('auto')
```

```

xlabel('misalignment[%]')
ylabel('Argument[degree]')
grid on
hold on

subplot(4,6,15)
plot(posyrelativa,VL_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('VL[V]')
grid on
hold on

subplot(4,6,16)
plot(posyrelativa,modI2_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('I2[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,17)
plot(posyrelativa,PL_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('PL[W]')
grid on
hold on

subplot(4,6,18)
plot(posyrelativa,rend_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('Efficiency')
grid on
hold on

for p=1:500
    carga(p)=0.01*p*RL;
    variacioncarga(p)=abs(carga(p))/abs(ZL);
    %Z2f=R2_optima+j*L2_optima*om0+(1/(C2_optima*j*om0+(1/ZL)))
    %Z2f=1/(1/(R2_optima+j*L2_optima*om0)+(C2_optima*j*om0)+(1/ZL))
    Z2f_carga(p)=R2_optima+j*(L2_optima*om0-
1/(C2_optima*om0));
    Z1f_carga(p)=R1_optima+j*(L1_optima*om0);

    %potencia en la carga
    KM_carga(p)=(om0*M_optima)^2;
    Z1l_carga(p)=Z1f_carga(p)+KM_carga(p)/(Z2f_carga(p)+car
ga(p));

```



```
ZT_carga(p)=(Z11_carga(p)/(1+Z11_carga(p)*j*om0*C3_opti  
ma))+1/(j*om0*C1_optima);  
Ztotal_carga(p)=ZT_carga(p)+j*L3_optima*om0;  
  
A2_carga(p)=-  
atan(imag(Ztotal_carga(p))/real(Ztotal_carga(p)));  
A2grados_carga(p)=A2_carga(p)*360/(2*pi);  
A2redondeado_carga(p)=round(A2grados_carga(p));  
  
I1_carga(p)=V1/Ztotal_carga(p);  
modI1_carga(p)=abs(I1_carga(p));  
Vp_carga(p)=V1-I1_carga(p)*(1/(j*om0*C1_optima))-  
I1_carga(p)*j*L3_optima*om0;  
modVp_carga(p)=abs(Vp_carga(p));  
IC3_carga(p)=Vp_carga(p)*j*om0*C3_optima;  
modIC3_carga(p)=abs(IC3_carga(p));  
Ip_carga(p)=I1_carga(p)-IC3_carga(p);  
modIp_carga(p)=abs(Ip_carga(p));  
I2_carga(p)=Ip_carga(p)*j*om0*M_optima/(Z2f_carga(p)+ca  
rga(p));  
modI2_carga(p)=abs(I2_carga(p));  
  
PL_carga(p)=carga(p)*(modI2_carga(p)^2);  
P1_carga(p)=real(V1*I1_carga(p));  
rend_carga(p)=PL_carga(p)/P1_carga(p);  
%rendimiento  
  
VC1_carga=abs(I1_carga(p)*(1/(j*C1_optima*om0)));  
VC2_carga=abs(I2_carga(p)*(1/(j*C2_optima*om0)));  
VL_carga(p)=abs(carga(p)*modI2_carga(p));  
end
```

figure(30)

```
subplot(4,6,19)  
plot(variacioncarga,modI1_carga)  
axis('auto')  
xlabel('R de carga/Rnominal')  
ylabel('I1[A]')  
grid on  
hold on
```

```
subplot(4,6,20)  
plot(variacioncarga,A2redondeado_carga)  
axis('auto')  
xlabel('R de carga/Rnominal')  
ylabel('Argument[degree]')  
grid on  
hold on
```

```
subplot(4,6,21)
```

```

plot(variacioncarga,VL_carga)
axis('auto')
xlabel('R de carga/Rnominal')
ylabel('VL[V]')
grid on
hold on

subplot(4,6,22)
plot(variacioncarga,modI2_carga)
axis('auto')
xlabel('R de carga/Rnominal')
ylabel('I2[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,23)
plot(variacioncarga,PL_carga)
axis('auto')
xlabel('R de carga/Rnominal')
ylabel('PL[W]')
grid on
hold on

subplot(4,6,24)
plot(variacioncarga,rend_carga)
axis('auto')
xlabel('R de carga/Rnominal')
ylabel('Efficiency[%]')
grid on
hold on
if KC==1
    disp('topología PS')
    topologia='PS';
end
if KC==0
    disp('topología SS')
    topologia='SS';
end
if KC>0 && KC<1
    disp('topología SP_S')
    topologia='SP_S';
end

Valores_optimos= {'solucion_optima'};
topologia=string(topologia);

frecuencia= foptima;
N1_optima = N1_optimo;
N2_optima = N2_optimo;
S1_optima_mm2= s1_optima;
S2_optima_mm2= s2_optima;

```



```
C1=C1_optima;  
C2=C2_optima;  
C3=C3_optima;  
L3=L3_optima;  
VC1=VC1_optima;  
VC2=VC2_optima;  
VC3=VC3_optima;  
VL3=VL3_optima;  
IC1=I1_optima;  
IC2=I2_optima;  
IC3=IC3_optima;  
IL3=I1_optima;  
  
T =  
table(topologia,KC,frecuencia,N1_optima,N2_optima,S1_optima  
_mm2,S2_optima_mm2,C1,C2,C3,L3,VC1,VC2,VC3,VL3,IC1,  
'RowNames',Valores_optimos);  
  
writetable(T,'solucion_optima.xls','Sheet',1);  
  
[N1_optimo s1_optima]  
[N2_optimo s2_optima]  
foptima  
  
%cargador_SPS_Empresa;  
disp('programa terminado')  
cargador_SPS_Empresa;  
disp('programa terminado')
```

## Anexo IV: Script de *MATLAB* para el cálculo de la intensidad que garantice la interoperabilidad entre los sistemas WPT

```
clear;
Vcc=565;
Vbat=350;
Pdeseada=7700;
Vdeseada=350;

%parametros geométricos
h=0.25;
a1=0.33;b1=0.468;a2=0.28;b2=0.28;
c=(a2-a1)/2;
e=-(b2-b1)/2;

fmax=85000;
densi1=4;
densi2=4;
KC=0.93;
if KC==0
    KC1=1;
elseif KC==1
    KC1=1e15;
else
    KC1=0.25;
end
%Inicialización de variables
maxN1=20;
maxN2=20;

RL=Vdeseada^2/Pdeseada;
%cálculo para las distintas combinaciones de espiras
geometria cuadrada
V1=2*sqrt(2)*Vcc/pi();
ya=0;
salta=0;
rendimientodeseado=1;
while ya<1
for N1=1:maxN1
    for N2=1:maxN2
        seccion1(N1,N2)=1e-6;
        seccion2(N1,N2)=1e-6;
        seccioncorrecta=0;
        while seccioncorrecta<1 && salta<1

            A=[N1 N2]
```





```
seccion1 (N1, N2);
seccion2 (N1, N2);

%radios equivalentes de primario y secundario
r01 (N1, N2)=sqrt (N1*seccion1 (N1, N2) /pi);
r02 (N1, N2)=sqrt (N2*seccion2 (N1, N2) /pi);
dp1=sqrt (a1^2+b1^2);
dp2=sqrt (a2^2+b2^2);

L1 (N1, N2)=1*4e-
7*(N1^2) * (a1*log (2*a1*b1/ (r01 (N1, N2) * (a1+dp1) ) )+b1*log (2*a1
*b1/ (r01 (N1, N2) * (b1+dp1) ) )-2*(a1+b1-dp1)+0.25*(a1+b1) );
L2 (N1, N2)=1*4e-
7*(N2^2) * (a2*log (2*a2*b2/ (r02 (N1, N2) * (a2+dp2) ) )+b2*log (2*a2
*b2/ (r02 (N1, N2) * (b2+dp2) ) )-2*(a2+b2-dp2)+0.25*(a2+b2) );

%inductancia mutua bobinas distintas
%M tramos horizontales
M1 (N1, N2)=N1*N2*1e-7*( (a1-a2-c) *log ( ( (a1-a2-c)+sqrt (h^2+(e-
b1)^2+(a1-a2-c)^2) ) / ( (a1-a2-c)+sqrt (h^2+e^2+(a1-a2-
c)^2) ) )+(a1-c) *log ( ( (a1-c)+sqrt (h^2+e^2+(a1-c)^2) ) / ( (a1-
c)+sqrt (h^2+(e-b1)^2+(a1-c)^2) ) ) );
M2 (N1, N2)=N1*N2*1e-7*( (c*log ( ( (-c)+sqrt (h^2+e^2+c^2) ) / ( (-
c)+sqrt (h^2+c^2+(e-b1)^2) ) ) )+( (a2+c) *log ( ( (-a2-
c)+sqrt (h^2+(e-b1)^2+(a2+c)^2) ) / ( (-a2-
c)+sqrt (h^2+(a2+c)^2+e^2) ) ) ) );
M3 (N1, N2)=N1*N2*1e-7*( sqrt (h^2+e^2+(a1-a2-c)^2) -
sqrt (h^2+e^2+(a1-c)^2) -
sqrt (h^2+e^2+(a2+c)^2) +sqrt (h^2+e^2+c^2) +sqrt (h^2+(e-
b1)^2+(a1-c)^2) -sqrt (h^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2) +sqrt (h^2+(e-
b1)^2+(a2+c)^2) -sqrt (h^2+(e-b1)^2+c^2) );

M11 (N1, N2)=N1*N2*1e-7*( (a1-a2-c) *log ( ( (a1-a2-
c)+sqrt (h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-c)^2) ) / ( (a1-a2-
c)+sqrt (h^2+(b2+e)^2+(a1-a2-c)^2) ) )+(a1-c) *log ( ( (a1-
c)+sqrt (h^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2) ) / ( (a1-c)+sqrt (h^2+(e+b2-
b1)^2+(a1-c)^2) ) ) );
M21 (N1, N2)=N1*N2*1e-7*( (c*log ( ( (-
c)+sqrt (h^2+(b2+e)^2+c^2) ) / ( (-c)+sqrt (h^2+c^2+(e+b2-
b1)^2) ) ) )+( (a2+c) *log ( ( (-a2-c)+sqrt (h^2+(e+b2-
b1)^2+(a2+c)^2) ) / ( (-a2-c)+sqrt (h^2+(a2+c)^2+(b2+e)^2) ) ) ) );
M31 (N1, N2)=N1*N2*1e-7*( sqrt (h^2+(b2+e)^2+(a1-a2-c)^2) -
sqrt (h^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2) -
sqrt (h^2+(b2+e)^2+(a2+c)^2) +sqrt (h^2+(b2+e)^2+c^2) +sqrt (h^2
+(e+b2-b1)^2+(a1-c)^2) -sqrt (h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-
c)^2) +sqrt (h^2+(e+b2-b1)^2+(a2+c)^2) -sqrt (h^2+(e+b2-
b1)^2+c^2) );

Mh (N1, N2) = (M1 (N1, N2) -M11 (N1, N2) +M2 (N1, N2) -
M21 (N1, N2) +M3 (N1, N2) -M31 (N1, N2) );
%M tramos verticales
```



```
M4 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*((b1-b2-e)*log(((b1-b2-e)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-b2-e)^2))/((b1-b2-e)+sqrt(h^2+c^2+(b1-b2-e)^2)))+(b1-e)*log(((b1-e)+sqrt(h^2+c^2+(b1-e)^2))/((b1-e)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-e)^2))));
M5 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*((e*log((( -e)+sqrt(h^2+c^2+e^2))/((-e)+sqrt(h^2+e^2+(c-a1)^2)))+(b2+e)*log((( -b2-e)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-e)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2))));
M6 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*(sqrt(h^2+c^2+(b1-b2-e)^2)-sqrt(h^2+c^2+(b1-e)^2)-sqrt(h^2+c^2+(b2+e)^2)+sqrt(h^2+c^2+e^2)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-e)^2)-sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-b2-e)^2)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b2+e)^2)-sqrt(h^2+(c-a1)^2+e^2));

M41 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*((b1-b2-e)*log(((b1-b2-e)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-e)^2))/((b1-b2-e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-b2-e)^2)))+(b1-e)*log(((b1-e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2))/((b1-e)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-e)^2)));
M51 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*((e*log((( -e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+e^2))/((-e)+sqrt(h^2+e^2+(c+a2-a1)^2)))+(b2+e)*log((( -b2-e)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-e)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(c+a2)^2))));
M61 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*(sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-b2-e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b2+e)^2)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+e^2)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-e)^2)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b2+e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+e^2));

Mv (N1,N2)=(M4(N1,N2)-M41(N1,N2)+M5(N1,N2)-M51(N1,N2)+M6(N1,N2)-M61(N1,N2));
%Coeficiente de inducción mutua definitivo
M(N1,N2)=0.84*(Mh(N1,N2)+Mv(N1,N2));
%factor de acoplamiento
k(N1,N2)=M(N1,N2)/(sqrt(L1(N1,N2)*L2(N1,N2)));
%resistencias
R1(N1,N2)=(1/57)*N1*2*(b1+a1)/(seccion1(N1,N2)*1e6);
R2(N1,N2)=(1/57)*N2*2*(b2+a2)/(seccion2(N1,N2)*1e6);

%inicialización de variables
ff(N1,N2)=1;
Pcarga=100000;
frecuencia=1000;
while Pcarga>Pdeseada
    %frecuencia de trabajo
    om0(N1,N2)=(ff(N1,N2)*sqrt(R1(N1,N2)*(R2(N1,N2)+RL)))/M(N1,N2);
    f0(N1,N2)=om0(N1,N2)/(2*pi);
```



```
%condensadores de acoplo
C2 (N1, N2) = 1 / ( (L2 (N1, N2) ) * (om0 (N1, N2) ^2) ) ;
C3 (N1, N2) = KC * (L2 (N1, N2) * C2 (N1, N2) ) / (L1 (N1, N2) + (
M (N1, N2) ^4 / (L1 (N1, N2) * L2 (N1, N2) * C2 (N1, N2) * RL ^2) ) ) ;
Z2f (N1, N2) = R2 (N1, N2) + j * (L2 (N1, N2) * om0 (N1, N2) -
1 / (C2 (N1, N2) * om0 (N1, N2) ) ) ;
Z1f (N1, N2) = R1 (N1, N2) + j * L1 (N1, N2) * om0 (N1, N2) ;
ZL = RL ;
%cálculo de la potencia en la carga
KM (N1, N2) = (om0 (N1, N2) * M (N1, N2) ) ^2 ;
%impedancia total de secundario vista desde el
primario
Z11 (N1, N2) = Z1f (N1, N2) + KM (N1, N2) / (Z2f (N1, N2) + ZL) ;
ZTPS (N1, N2) = (Z11 (N1, N2) / (1 + Z11 (N1, N2) * j * om0 (N1,
N2) * C3 (N1, N2) ) ) ;
imagZTPS (N1, N2) = imag (ZTPS (N1, N2) ) ;
C1 (N1, N2) = KC1 * 1 / (imagZTPS (N1, N2) * om0 (N1, N2) ) ;

ZT (N1, N2) = (Z11 (N1, N2) / (1 + Z11 (N1, N2) * j * om0 (N1, N2)
) * C3 (N1, N2) ) + 1 / (j * om0 (N1, N2) * C1 (N1, N2) ) ;

imagZT (N1, N2) = imag (ZT (N1, N2) ) ;
L3 (N1, N2) = -imagZT (N1, N2) / om0 (N1, N2) ;

Ztotal (N1, N2) = ZT (N1, N2) + j * om0 (N1, N2) * L3 (N1, N2) ;
%intensidades de primario y secundario

Argumentogrados (N1, N2) = -
atan (imag (Ztotal (N1, N2) ) / real (Ztotal (N1, N2) ) ) * 360 / (2 * pi) ;
Argumentoredondeado (N1, N2) = round (Argumentogrados
(N1, N2) ) ;

I1 (N1, N2) = V1 / Ztotal (N1, N2) ;
Vp (N1, N2) = V1 -
I1 (N1, N2) * (1 / (j * om0 (N1, N2) * C1 (N1, N2) ) ) -
I1 (N1, N2) * j * L3 (N1, N2) * om0 (N1, N2) ;
Ic3 (N1, N2) = Vp (N1, N2) * j * om0 (N1, N2) * C3 (N1, N2) ;
VL3 (N1, N2) = L3 (N1, N2) * om0 (N1, N2) * I1 (N1, N2) ;
Ip (N1, N2) = I1 (N1, N2) - Ic3 (N1, N2) ;
I2 (N1, N2) = Ip (N1, N2) * j * om0 (N1, N2) * M (N1, N2) / (Z2f (
N1, N2) + ZL) ;

densiI1 (N1, N2) = (abs (Ip (N1, N2) ) / seccion1 (N1, N2) )
* 1e-6 ;
densiI2 (N1, N2) = (abs (I2 (N1, N2) ) / seccion2 (N1, N2) )
* 1e-6 ;

%potencia en la carga
PL (N1, N2) = RL * (abs (I2 (N1, N2) ) ^2) ;
VL (N1, N2) = I2 (N1, N2) * ZL ;
```



```
% tensión en los condensadores de acoplo de
primario y secundario
VC10(N1,N2)=I1(N1,N2)*(1/(j*C1(N1,N2)*om0(N1,N2
)));
VC20(N1,N2)=I2(N1,N2)*(1/(j*C2(N1,N2)*om0(N1,N2
)));
VC3(N1,N2)=Ic3(N1,N2)*1/(om0(N1,N2)*C3(N1,N2));
%admitancia total de secundario vista desde
primario
Y11(N1,N2)=1/Z11(N1,N2);
%rendimiento del sistema
Pcarga=PL(N1,N2);
P1(N1,N2)=real(V1*I1(N1,N2));
rend(N1,N2)=PL(N1,N2)/P1(N1,N2);

frecuencia=f0(N1,N2);
%factor de acoplamiento entre primario y
secundario
FA(N1,N2)=M(N1,N2)/sqrt(L1(N1,N2)*L2(N1,N2));
ff(N1,N2)=ff(N1,N2)+0.1;
Qp(N1,N2)=L1(N1,N2)*RL/(om0(N1,N2)*M(N1,N2)^2);
Qs(N1,N2)=om0(N1,N2)*L2(N1,N2)/RL;
if Qp(N1,N2)>Qs(N1,N2)
fun(N1,N2)=(1/(1+abs((log(Qp(N1,N2)/Qs(N1,N2))))
))* (1/(1+abs(log(fmax/f0(N1,N2)))));
relQ(N1,N2)=1;
else
fun(N1,N2)=0*(1/(1+abs((log(Qp(N1,N2)/Qs(N1
,N2))))))* (1/(1+abs(log(fmax/f0(N1,N2)))));
relQ(N1,N2)=0;
end

end

if densiI1(N1,N2)>densi1
if seccion1(N1,N2)<500e-6
seccion1(N1,N2)=seccion1(N1,N2)+0.1e-6;
else
seccion1(N1,N2)=seccion1(N1,N2)+10e-6;
end
end
if densiI2(N1,N2)>densi2
seccion2(N1,N2)=seccion2(N1,N2)+0.1e-6;
end
if Argumentoredondeado(N1,N2)<-1
ff(N1,N2)=ff(N1,N2)+0.1;
end
if densiI1(N1,N2)<=densi1 && densiI2(N1,N2)<=densi2
seccioncorrecta=1;
end
end
```



```
        if seccioncorrecta==1 && f0(N1,N2)>0.9*fmax &&
f0(N1,N2)<1.02*fmax && fun(N1,N2)>0 &&
densiI1(N1,N2)>densi1-0.5 && densiI2(N1,N2)>densi2-0.5
        f0(N1,N2)
        salta=1
        maxN1_optimo=N1
        maxN2_optimo=N2
        disp('solución optima')
        opt=[N1 N2]
        N1_optimo=N1;
        s1_optima=seccion1(N1,N2)*1e6
        N2_optimo=N2;
        s2_optima=seccion2(N1,N2)*1e6
        foptima=f0(N1,N2)
        VC1_optima=abs(VC10(N1,N2))
        VC2_optima=abs(VC20(N1,N2))
        VC3_optima=abs(VC3(N1,N2))
        VL3_optima=abs(VL3(N1,N2))
        C1_optima=C1(N1,N2);
        C2_optima=C2(N1,N2);
        C3_optima=C3(N1,N2);
        I1_optima=abs(I1(N1,N2));
        I2_optima=abs(I2(N1,N2));
        IC3_optima=abs(Ic3(N1,N2));
        IC2_optima=abs(I2(N1,N2));
        L3_optima=L3(N1,N2);
        PL(N1,N2);
        ff_optimo=ff(N1,N2);
        rendimientoencontrado=1;
        ya=1;
        M_optima=M(N1,N2);
        L1_optima=L1(N1,N2);
        L2_optima=L2(N1,N2);

        end
        if salta==0 && N1==maxN1 && N2==maxN2

                disp('No hay solución')
                return
        end
    end
end

end

end

%Gráficas de las distintas variables

%radios equivalentes
ZL=RL;
```



```
r01=sqrt(N1_optimo*s1_optima/pi);
r02=sqrt(N2_optimo*s2_optima/pi);
cantcobre1=N1_optimo*2*(a1+b1)*s1_optima;
cantcobre2=N2_optimo*2*(a2+b2)*s2_optima;
cobretotal=cantcobre1+cantcobre2;
copper=cobretotal*1e6*8.96/1000;

dp1=sqrt(a1^2+b1^2);
dp2=sqrt(a2^2+b2^2);
%Factor de acoplamiento
k=M_optima/(sqrt(L1_optima*L2_optima));
%resistencias
R1_optima=(1/57)*N1_optimo*2*(b1+a1)/(s1_optima);
R2_optima=(1/57)*N2_optimo*2*(b2+a2)/(s2_optima);
%frecuencia de trabajo
%om0=(ff*sqrt(R1*(R2+RL)))/M;
%om0=(sqrt(R1*(R2+RL)))/M
om0=2*pi()*foptima;
L1=4e-
7*(N1_optimo^2)*(a1*log(2*a1*b1/(r01*(a1+dp1)))+b1*log(2*a1
*b1/(r01*(b1+dp1)))-2*(a1+b1-dp1)+0.25*(a1+b1));
L2=4e-
7*(N2_optimo^2)*(a2*log(2*a2*b2/(r02*(a2+dp2)))+b2*log(2*a2
*b2/(r02*(b2+dp2)))-2*(a2+b2-dp2)+0.25*(a2+b2));
%inductancia mutua bobinas distintas
%M tramos horizontales
M1=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-
c)+sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-
c)+sqrt(h^2+e^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-
c)+sqrt(h^2+e^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a1-
c)^2))));
M2=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((c+
sqrt(h^2+e^2+c^2))/((-c)+sqrt(h^2+c^2+(e-
b1)^2))))+(a2+c)*log(((a2-c)+sqrt(h^2+(e-
b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+e^2))));
M3=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+e^2+(a1-a2-c)^2)-
sqrt(h^2+e^2+(a1-c)^2)-
sqrt(h^2+e^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+e^2+c^2)+sqrt(h^2+(e-
b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2)+sqrt(h^2+(e-
b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(e-b1)^2+c^2));

M11=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-
c)+sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-
c)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-
c)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(e+b2-
b1)^2+(a1-c)^2))));
M21=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((c+
sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2))/((-c)+sqrt(h^2+c^2+(e+b2-
b1)^2))))+(a2+c)*log(((a2-c)+sqrt(h^2+(e+b2-
b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+(b2+e)^2))));
```



```
M31=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-a2-  
c)^2)-sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2)-  
sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2)+sqrt(h^2  
+(e+b2-b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-  
c)^2)+sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(e+b2-  
b1)^2+c^2));  
  
Mh=(M1-M11+M2-M21+M3-M31);  
%M tramos verticales  
  
M4=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((b1-b2-e)*log((b1-b2-  
e)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-b2-e)^2))/((b1-b2-  
e)+sqrt(h^2+c^2+(b1-b2-e)^2)))+(b1-e)*log((b1-  
e)+sqrt(h^2+c^2+(b1-e)^2))/((b1-e)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-  
e)^2)));  
M5=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((e*log(((  
-e)+sqrt(h^2+c^2+e^2))/((-e)+sqrt(h^2+e^2+(c-  
a1)^2)))))+(b2+e)*log(((b2+e)+sqrt(h^2+(c-  
a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-e)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2))));  
M6=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+c^2+(b1-b2-e)^2)-  
sqrt(h^2+c^2+(b1-e)^2)-  
sqrt(h^2+c^2+(b2+e)^2)+sqrt(h^2+c^2+e^2)+sqrt(h^2+(c-  
a1)^2+(b1-e)^2)-sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-b2-e)^2)+sqrt(h^2+(c-  
a1)^2+(b2+e)^2)-sqrt(h^2+(c-a1)^2+e^2));  
  
M41=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((b1-b2-e)*log((b1-b2-  
e)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-e)^2))/((b1-b2-  
e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-b2-e)^2)))+(b1-e)*log((b1-  
e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2))/((b1-e)+sqrt(h^2+(c+a2-  
a1)^2+(b1-e)^2)));  
M51=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((e*log(((  
-e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+e^2))/((-e)+sqrt(h^2+e^2+(c+a2-  
a1)^2)))))+(b2+e)*log(((b2+e)+sqrt(h^2+(c+a2-  
a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-e)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(c+a2)^2))));  
M61=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-b2-  
e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2)-  
sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b2+e)^2)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+e^2)+sqrt(h^2  
+(c+a2-a1)^2+(b1-e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-  
e)^2)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b2+e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2-  
a1)^2+e^2));  
Mv=(M4-M41+M5-M51+M6-M61);%Coeficiente de inducción mutua  
definitivo  
M=1*(Mh+Mv);  
  
M_optima=M;  
Z2f=R2_optima+j*(L2_optima*om0-1/(C2_optima*om0));  
Z1f=R1_optima+j*L1_optima*om0;  
  
%potencia en la carga  
KM_optima=(om0*M_optima)^2;  
Z1l=Z1f+KM_optima/(Z2f+ZL);
```



```
ZTPS=(Z11/(1+Z11*j*om0*C3_optima));  
imagZTPS=imag(ZTPS);  
ZT=(Z11/(1+Z11*j*om0*C3_optima)+1/(j*om0*C1_optima));  
Ztotal=ZT+j*L3_optima*om0;  
A2=-atan(imag(Ztotal)/real(Ztotal));  
A2grados=A2*360/(2*pi);  
A2redondeado=round(A2grados);  
I1=V1/Ztotal;  
modI1=abs(I1);  
Vp=V1-I1*(1/(j*om0*C1_optima))-I1*j*L3_optima*om0;  
  
Ic3=Vp*j*om0*C3_optima;  
modIc3=abs(Ic3);  
Ip=I1-Ic3;  
modIp=abs(Ip);  
I2=Ip*j*om0*M_optima/(Z2f+ZL);  
I2mod=abs(I2);  
VL2=I2*j*om0*L2_optima;  
PL=RL*(abs(I2)^2);  
P1=real(V1*I1);  
%rendimiento  
rend=PL/P1  
VC1=abs(I1*(1/(j*C1_optima*om0)));  
VC2=abs(I2*(1/(j*C2_optima*om0)));  
VL=ZL*I2mod;  
for p=1:100  
    distancia(p)=(0.01+0.015*p)*h;  
    relaciondistancia(p)=distancia(p)/h;  
  
M1_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-c)+sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-c)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-c)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a1-c)^2)));  
M2_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((c)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+c^2))/((-c)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+(e-b1)^2))))+((a2+c)*log(((a2+c)+sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(distancia(p)^2+(a2+c)^2+e^2)))));  
M3_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(distancia(p)^2+e^2+(a1-a2-c)^2)-sqrt(distancia(p)^2+e^2+(a1-c)^2)-sqrt(distancia(p)^2+e^2+(a2+c)^2)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+c^2)+sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2)+sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(distancia(p)^2+(e-b1)^2+c^2));  
  
M11_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-c)+sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-
```





```
c)^2))/((a1-a2-c)+sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(a1-a2-  
c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2))/((a1-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a1-c)^2))));  
M21_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((c-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+c^2))/((-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+(e+b2-b1)^2)))+(a2+c)*log(((a2-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-  
c)+sqrt(distancia(p)^2+(a2+c)^2+(b2+e)^2))));  
M31_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-  
7*(sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(a1-a2-c)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(a2+c)^2)+sqrt(distancia(p)^2+  
(b2+e)^2+c^2)+sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a1-c)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-  
c)^2)+sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+(a2+c)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(e+b2-b1)^2+c^2));  
  
Mh_distancia(p)=(M1_distancia(p)-  
M11_distancia(p)+M2_distancia(p)-  
M21_distancia(p)+M3_distancia(p)-M31_distancia(p));  
%M tramos verticales  
  
M4_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((b1-b2-  
e)*log(((b1-b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b1-b2-  
e)^2))/((b1-b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+(b1-b2-  
e)^2)))+(b1-e)*log(((b1-e)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+(b1-  
e)^2))/((b1-e)+sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b1-e)^2)));  
M5_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((e*log(((e-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+e^2))/((-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+(c-a1)^2)))+(b2+e)*log(((b2-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+c^2))));  
M6_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-  
7*(sqrt(distancia(p)^2+c^2+(b1-b2-e)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+c^2+(b1-e)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+c^2+(b2+e)^2)+sqrt(distancia(p)^2+c^2+e  
^2)+sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b1-e)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b1-b2-  
e)^2)+sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+(b2+e)^2)-  
sqrt(distancia(p)^2+(c-a1)^2+e^2));  
  
M41_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((b1-b2-  
e)*log(((b1-b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-  
e)^2))/((b1-b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+(b1-b2-  
e)^2)))+(b1-e)*log(((b1-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2))/((b1-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b1-e)^2)));  
M51_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((e*log(((e-  
e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+e^2))/((-
```

```

e)+sqrt(distancia(p)^2+e^2+(c+a2-a1)^2)))+(b2+e)*log((-b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b2+e)^2)/((-b2-e)+sqrt(distancia(p)^2+(b2+e)^2+(c+a2)^2)));
M61_distancia(p)=N1_optimo*N2_optimo(1)*1e-7*(sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+(b1-b2-e)^2)-sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2)-sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+(b2+e)^2)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2)^2+e^2)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b1-e)^2)-sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-e)^2)+sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+(b2+e)^2)-sqrt(distancia(p)^2+(c+a2-a1)^2+e^2));
Mv_distancia(p)=(M4_distancia(p)-M41_distancia(p)+M5_distancia(p)-M51_distancia(p)+M6_distancia(p)-M61_distancia(p));%Coeficiente de inducción mutua definitivo
M_distancia(p)=(Mh_distancia(p)+Mv_distancia(p));

%Factor de acoplamiento
k_distancia(p)=M_distancia(p)/(sqrt(L1_optima*L2_optima));
Z2f_distancia(p)=R2_optima+j*(L2_optima*om0-1/(C2_optima*om0));
Z1f_distancia(p)=R1_optima+j*(L1_optima*om0);

%potencia en la carga
KM_distancia(p)=(om0*M_distancia(p))^2;
Z11_distancia(p)=Z1f_distancia(p)+KM_distancia(p)/(Z2f_distancia(p)+RL);
ZT_distancia(p)=(Z11_distancia(p)/(1+Z11_distancia(p)*j*om0*C3_optima))+1/(j*om0*C1_optima);

Ztotal_distancia(p)=ZT_distancia(p)+j*L3_optima*om0;
Argumento_distancia(p)=-atan(imag(Ztotal_distancia(p))/real(Ztotal_distancia(p)));
Argumentogrados_distancia(p)=Argumento_distancia(p)*360/(2*pi);
Argumentoredondeado_distancia(p)=round(Argumentogrados_distancia(p));

I1_distancia(p)=V1/Ztotal_distancia(p);
modI1_distancia(p)=abs(I1_distancia(p));
Vp_distancia(p)=V1-I1_distancia(p)*(1/(j*om0*C1_optima))-I1_distancia(p)*j*L3_optima*om0;
Ic3_distancia(p)=Vp_distancia(p)*j*om0*C3_optima;
modIc3_distancia(p)=abs(Ic3_distancia(p));
Ip_distancia(p)=I1_distancia(p)-Ic3_distancia(p);
modIp_distancia(p)=abs(Ip_distancia(p));
I2_distancia(p)=Ip_distancia(p)*j*om0*M_distancia(p)/(Z2f_distancia(p)+ZL);
modI2_distancia(p)=abs(I2_distancia(p));

```

```

PL_distancia(p)=RL*(modI2_distancia(p)^2);
P1_distancia(p)=real(V1*I1_distancia(p));
rend_distancia(p)=PL_distancia(p)/P1_distancia(p);
%rendimiento

VC1_distancia(p)=abs(I1_distancia(p)*(1/(j*C1_optima)))
;
VC2_distancia(p)=abs(I2_distancia(p)*(1/(j*C2_optima)))
;
VL_distancia(p)=RL*modI2_distancia(p);

end

figure(30);
title('P=3.7 kW; Vbat=360V; Vbus=325V; freq=85 kHz;
a1=0.6; a2=0.8; b1=0.8; b2=1; h=0.2');
subplot(4,6,1)
plot(distancia,modI1_distancia)
axis('auto')
xlabel('airgap[m]')
ylabel('I1[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,2)
plot(distancia,Argumentoredondeado_distancia)
axis('auto')
xlabel('airgap[m]')
ylabel('Argument[degree]')
grid on
hold on

subplot(4,6,3)
plot(distancia,VL_distancia)
axis('auto')
xlabel('airgap[m]')
ylabel('VL[V]')
grid on
hold on

subplot(4,6,4)
plot(distancia,modI2_distancia)
axis('auto')
xlabel('airgap[m]')
ylabel('I2[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,5)
plot(distancia,PL_distancia)

```



```
axis('auto')
xlabel('airgap[m]')
ylabel('PL[W]')
grid on
hold on

subplot(4,6,6)
plot(distancia,rend_distancia)
axis('auto')
xlabel('airgap[m]')
ylabel('Efficiency[%]')
grid on
hold on

for p=1:150
    omega(p)=(0.98+0.0012*p)*om0;
    f(p)=omega(p)/(2*pi);
    relacionfrecuencia(p)=omega(p)/om0;
    %Z2f=R2+j*L2*om0+(1/(C2*j*om0+(1/ZL)))
    %Z2f=1/(1/(R2+j*L2*om0)+(C2*j*om0)+(1/ZL))
    Z2f_freq(p)=R2_optima+j*(L2_optima*omega(p)-
1/(C2_optima*omega(p)));
    Z1f_freq(p)=R1_optima+j*(L1_optima*omega(p));

    %potencia en la carga
    KM_freq(p)=(omega(p)*M_optima)^2;
    Z11_freq(p)=Z1f_freq(p)+KM_freq(p)/(Z2f_freq(p)+ZL);
    ZT_freq(p)=(Z11_freq(p)/(1+Z11_freq(p)*j*omega(p)*C3_optima))+1/(j*omega(p)*C1_optima);
    Ztotal_freq(p)=ZT_freq(p)+j*L3_optima*omega(p);

    A2_freq(p)=-
atan(imag(Ztotal_freq(p))/real(Ztotal_freq(p)));
    A2grados_freq(p)=A2_freq(p)*360/(2*pi);
    A2redondeado_freq(p)=round(A2grados_freq(p));

    I1_freq(p)=V1/Ztotal_freq(p);
    modI1_freq(p)=abs(I1_freq(p));
    Vp_freq(p)=V1-I1_freq(p)*(1/(j*omega(p)*C1_optima))-
I1_freq(p)*j*L3_optima*omega(p);
    Ic3_freq(p)=Vp_freq(p)*j*omega(p)*C3_optima;
    modIc3_freq(p)=abs(Ic3_freq(p));
    Ip_freq(p)=I1_freq(p)-Ic3_freq(p);
    modIp_freq(p)=abs(Ip_freq(p));
    I2_freq(p)=Ip_freq(p)*j*omega(p)*M_optima/(Z2f_freq(p)+
ZL);
    modI2_freq(p)=abs(I2_freq(p));

    PL_freq(p)=RL*(modI2_freq(p)^2);
```

```

P1_freq(p)=real(V1*I1_freq(p));
rend_freq(p)=PL_freq(p)/P1_freq(p);
%rendimiento

VC1_freq(p)=abs(I1_freq(p)*(1/(j*C1_optima*omega(p))));
VC2_freq(p)=abs(I2_freq(p)*(1/(j*C2_optima*omega(p))));
VL_freq(p)=abs(ZL*modI2_freq(p));

end
figure(30)

subplot(4,6,7)
plot(f,modI1_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('I1[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,8)
plot(f,A2redondeado_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('Argument[degree]')
grid on
hold on

subplot(4,6,9)
plot(f,VL_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('VL')
grid on
hold on

subplot(4,6,10)
plot(f,modI2_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('I2[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,11)
plot(f,PL_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('PL[W]')
grid on
hold on

```

```

subplot(4,6,12)
plot(f,rend_freq)
axis('auto')
xlabel('frequency[Hz]')
ylabel('Efficiency[%]')
grid on
hold on

for p=1:100
    posy(p)=(-100*b2/100)+(2*b2/100)*p;
    posyrelativa(p)=(posy(p)-e)*100/b2;

M1_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-c)+sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a1-a2-c)^2)))/((a1-a2-c)+sqrt(h^2+posy(p)^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-c)+sqrt(h^2+posy(p)^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a1-c)^2))));
M2_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((c)+sqrt(h^2+posy(p)^2+c^2))/((-c)+sqrt(h^2+c^2+(posy(p)-b1)^2)))))+(a2+c)*log(((a2+c)+sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+posy(p)^2))));
M3_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+posy(p)^2+(a1-a2-c)^2)-sqrt(h^2+posy(p)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+posy(p)^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+posy(p)^2+c^2)+sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a1-a2-c)^2)+sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(posy(p)-b1)^2+c^2));

M11_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-c)+sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-c)+sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-c)+sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a1-c)^2))));
M21_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*((c*log(((c)+sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+c^2))/((-c)+sqrt(h^2+c^2+(posy(p)+b2-b1)^2)))))+(a2+c)*log(((a2+c)+sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+(b2+posy(p))^2))));
M31_pos(p)=N1_optimo*N2_optimo*1e-7*(sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+(a1-a2-c)^2)-sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+(b2+posy(p))^2+c^2)+sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a1-a2-c)^2)+sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(posy(p)+b2-b1)^2+c^2));

```

```

Mh_pos(p) = (M1_pos(p) - M11_pos(p) + M2_pos(p) -
M21_pos(p) + M3_pos(p) - M31_pos(p));
%M tramos verticales

M4_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * ((b1 - b2 -
posy(p)) * log(((b1 - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + (c - a1)^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2)) / ((b1 - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + c^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2))) + (b1 - posy(p)) * log(((b1 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + c^2 + (b1 - posy(p))^2)) / ((b1 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (c - a1)^2 + (b1 - posy(p))^2)))));
M5_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * ((posy(p)) * log((( -
posy(p)) + sqrt(h^2 + c^2 + posy(p)^2)) / (( -
posy(p)) + sqrt(h^2 + posy(p)^2 + (c -
a1)^2))) + ((b2 + posy(p)) * log((( - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + (c -
a1)^2 + (b2 + posy(p))^2)) / (( - b2 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (b2 + posy(p))^2 + c^2)))));
M6_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * (sqrt(h^2 + c^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2) - sqrt(h^2 + c^2 + (b1 - posy(p))^2) -
sqrt(h^2 + c^2 + (b2 + posy(p))^2) + sqrt(h^2 + c^2 + posy(p)^2) + sqrt(h
^2 + (c - a1)^2 + (b1 - posy(p))^2) - sqrt(h^2 + (c - a1)^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2) + sqrt(h^2 + (c - a1)^2 + (b2 + posy(p))^2) - sqrt(h^2 + (c -
a1)^2 + posy(p)^2));

M41_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * ((b1 - b2 -
posy(p)) * log(((b1 - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2 - a1)^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2)) / ((b1 - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + (b1 - b2 -
posy(p))^2))) + (b1 - posy(p)) * log(((b1 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + (b1 - posy(p))^2)) / ((b1 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2 - a1)^2 + (b1 - posy(p))^2)))));
M51_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * ((posy(p)) * log((( -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + posy(p)^2)) / (( -
posy(p)) + sqrt(h^2 + posy(p)^2 + (c + a2 -
a1)^2))) + ((b2 + posy(p)) * log((( - b2 - posy(p)) + sqrt(h^2 + (c + a2 -
a1)^2 + (b2 + posy(p))^2)) / (( - b2 -
posy(p)) + sqrt(h^2 + (b2 + posy(p))^2 + (c + a2)^2)))));
M61_pos(p) = N1_optimo * N2_optimo * 1e-7 * (sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + (b1 -
b2 - posy(p))^2) - sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + (b1 - posy(p))^2) -
sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + (b2 + posy(p))^2) + sqrt(h^2 + (c + a2)^2 + posy(p)
^2) + sqrt(h^2 + (c + a2 - a1)^2 + (b1 - posy(p))^2) - sqrt(h^2 + (c + a2 -
a1)^2 + (b1 - b2 - posy(p))^2) + sqrt(h^2 + (c + a2 -
a1)^2 + (b2 + posy(p))^2) - sqrt(h^2 + (c + a2 - a1)^2 + posy(p)^2));
Mv_pos(p) = (M4_pos(p) - M41_pos(p) + M5_pos(p) -
M51_pos(p) + M6_pos(p) - M61_pos(p));
%Coeficiente de inducción mutua definitivo
M_pos(p) = 1 * (Mh_pos(p) + Mv_pos(p));

%Factor de acoplamiento
k_pos(p) = M_pos(p) / (sqrt(L1_optima * L2_optima));
Z2f_pos(p) = R2_optima + j * (L2_optima * om0 -
1 / (C2_optima * om0));

```



```
Z1f_pos(p)=R1_optima+j*(L1_optima*om0);
V(p)=V1;
%potencia en la carga
KM_pos(p)=(om0*M_pos(p))^2;
Z11_pos(p)=Z1f_pos(p)+KM_pos(p)/(Z2f_pos(p)+RL);
ZT_pos(p)=(Z11_pos(p)/(1+Z11_pos(p)*j*om0*C3_optima))+1
/(j*om0*C1_optima);

Ztotal_pos(p)=ZT_pos(p)+j*L3_optima*om0;

A2_pos(p)=-
atan(imag(Ztotal_pos(p))/real(Ztotal_pos(p)));
A2grados_pos(p)=A2_pos(p)*360/(2*pi);
A2redondeado_pos(p)=round(A2grados_pos(p));

I1_pos(p)=V1/Ztotal_pos(p);
modI1_pos(p)=abs(I1_pos(p));
Vp_pos(p)=V1-I1_pos(p)*(1/(j*om0*C1_optima))-
I1_pos(p)*j*L3_optima*om0;
modVp_pos(p)=abs(Vp_pos(p));
IC3_pos(p)=Vp_pos(p)*j*om0*C3_optima;
modIC3_pos(p)=abs(IC3_pos(p));
Ip_pos(p)=I1_pos(p)-IC3_pos(p);
modIp_pos(p)=abs(Ip_pos(p));
I2_pos(p)=Ip_pos(p)*j*om0*M_pos(p)/(Z2f_pos(p)+ZL);
modI2_pos(p)=abs(I2_pos(p));

PL_pos(p)=RL*(modI2_pos(p)^2);
P1_pos(p)=real(V1*I1_pos(p));
rend_pos(p)=PL_pos(p)/P1_pos(p);
%rendimiento

VC1_pos(p)=abs(I1_pos(p)*(1/(j*C1_optima*om0)));
VC2_pos(p)=abs(I2_pos(p)*(1/(j*C2_optima*om0)));
VL_pos(p)=RL*modI2_pos(p);

end

figure(30);

subplot(4,6,13)
plot(posyrelativa,modI1_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('I1[A]')
grid on
```



```
hold on

subplot(4,6,14)
plot(posyrelativa,A2redondeado_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('Argument[degree]')
grid on
hold on

subplot(4,6,15)
plot(posyrelativa,VL_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('VL[V]')
grid on
hold on

subplot(4,6,16)
plot(posyrelativa,modI2_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('I2[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,17)
plot(posyrelativa,PL_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('PL[W]')
grid on
hold on

    subplot(4,6,18)
plot(posyrelativa,rend_pos)
axis('auto')
xlabel('misalignment[%]')
ylabel('Efficiency')
grid on
hold on

for p=1:500
    carga(p)=0.01*p*RL;
    variacioncarga(p)=abs(carga(p))/abs(ZL);
```



```
%Z2f=R2_optima+j*L2_optima*om0+(1/(C2_optima*j*om0+(1/ZL)))
%Z2f=1/(1/(R2_optima+j*L2_optima*om0)+(C2_optima*j*om0)+(1/
ZL))
Z2f_carga(p)=R2_optima+j*(L2_optima*om0-
1/(C2_optima*om0));
Z1f_carga(p)=R1_optima+j*(L1_optima*om0);

%potencia en la carga
KM_carga(p)=(om0*M_optima)^2;
Z11_carga(p)=Z1f_carga(p)+KM_carga(p)/(Z2f_carga(p)+car
ga(p));
ZT_carga(p)=(Z11_carga(p)/(1+Z11_carga(p)*j*om0*C3_opti
ma))+1/(j*om0*C1_optima);
Ztotal_carga(p)=ZT_carga(p)+j*L3_optima*om0;

A2_carga(p)=-
atan(imag(Ztotal_carga(p))/real(Ztotal_carga(p)));
A2grados_carga(p)=A2_carga(p)*360/(2*pi);
A2redondeado_carga(p)=round(A2grados_carga(p));

I1_carga(p)=V1/Ztotal_carga(p);
modI1_carga(p)=abs(I1_carga(p));
Vp_carga(p)=V1-I1_carga(p)*(1/(j*om0*C1_optima))-
I1_carga(p)*j*L3_optima*om0;
modVp_carga(p)=abs(Vp_carga(p));
IC3_carga(p)=Vp_carga(p)*j*om0*C3_optima;
modIC3_carga(p)=abs(IC3_carga(p));
Ip_carga(p)=I1_carga(p)-IC3_carga(p);
modIp_carga(p)=abs(Ip_carga(p));
I2_carga(p)=Ip_carga(p)*j*om0*M_optima/(Z2f_carga(p)+ca
rga(p));
modI2_carga(p)=abs(I2_carga(p));

PL_carga(p)=carga(p)*(modI2_carga(p)^2);
P1_carga(p)=real(V1*I1_carga(p));
rend_carga(p)=PL_carga(p)/P1_carga(p);
%rendimiento

VC1_carga=abs(I1_carga(p)*(1/(j*C1_optima*om0)));
VC2_carga=abs(I2_carga(p)*(1/(j*C2_optima*om0)));
VL_carga(p)=abs(carga(p)*modI2_carga(p));
end
```

figure(30)

```
subplot(4,6,19)
plot(variacioncarga,modI1_carga)
axis('auto')
xlabel('R de carga/Rnominal')
```

```
ylabel('I1[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,20)
plot(variacioncarga,A2redondeado_carga)
axis('auto')
xlabel('R de carga/Rnominal')
ylabel('Argument[degree]')
grid on
hold on

subplot(4,6,21)
plot(variacioncarga,VL_carga)
axis('auto')
xlabel('R de carga/Rnominal')
ylabel('VL[V]')
grid on
hold on

subplot(4,6,22)
plot(variacioncarga,modI2_carga)
axis('auto')
xlabel('R de carga/Rnominal')
ylabel('I2[A]')
grid on
hold on

subplot(4,6,23)
plot(variacioncarga,PL_carga)
axis('auto')
xlabel('R de carga/Rnominal')
ylabel('PL[W]')
grid on
hold on

subplot(4,6,24)
plot(variacioncarga,rend_carga)
axis('auto')
xlabel('R de carga/Rnominal')
ylabel('Efficiency[%]')
grid on
hold on
if KC==1
    disp('topología PS')
    topologia='PS';
end
if KC==0
    disp('topología SS')
    topologia='SS';
end
```

```
if KC>0 && KC<1
    disp('topología SP_S')
    topologia='SP_S';
end

Valores_optimos= {'solucion_optima'};
topologia=string(topologia);

frecuencia= foptima;
N1_optima = N1_optimo;
N2_optima = N2_optimo;
S1_optima_mm2= s1_optima;
S2_optima_mm2= s2_optima;
C1=C1_optima;
C2=C2_optima;
C3=C3_optima;
L3=L3_optima;
VC1=VC1_optima;
VC2=VC2_optima;
VC3=VC3_optima;
VL3=VL3_optima;
IC1=I1_optima;
IC2=I2_optima;
IC3=IC3_optima;
IL3=I1_optima;

T
=
table(topologia,KC,frecuencia,N1_optima,N2_optima,S1_optima
_mm2,S2_optima_mm2,C1,C2,C3,L3,VC1,VC2,VC3,VL3,IC1,
'RowNames',Valores_optimos);

writetable(T,'solucion_optima.xls','Sheet',1);

[N1_optimo s1_optima]
[N2_optimo s2_optima]
foptima

%cargador_SPS_Empresa;
disp('programa terminado')
cargador_SPS_Empresa;
disp('programa terminado')
```