

Trabajo Fin de Grado

Programa Interactivo para el diseño óptimo de
sistemas de transferencia inalámbrica de
potencia WPT

Autor

Fernando Hernández Germán

Director

Juan Luis Villa Gazulla

Escuela de arquitectura e ingeniería
2018-2019

RESUMEN

Programa Interactivo para el diseño óptimo de sistemas de transferencia inalámbrica de potencia WPT.

Assistant for the design of wireless coupling systems WPT.

El objetivo del presente trabajo es el de realizar una interfaz amigable para el usuario para ello nos valemos de la herramienta Appdesigner perteneciente al entorno Matlab dicha herramienta cuenta con numerosas ayudas visuales para facilitar la creación de entornos gráficos. La interfaz tiene como principales funciones facilitar la introducción de los valores de los diferentes parámetros de los sistemas a estudiar y proporcionar medios para el análisis de las distintas topologías de carga inalámbrica de potencia.

La transferencia inalámbrica de energía (WPT), se basa en el acoplamiento electromagnético entre 2 bobinas un sistema equivalente a un transformador convencional, pero en este caso a través del aire y a distancias entre bobinas comparables a sus dimensiones. Además, debido a la intervención de elevados campos magnéticos en el proceso, hay que tener en cuenta la inclusión de un adecuado sistema de apantallamiento, lo que hace el proceso de diseño todavía más complejo.

Para conseguir el diseño óptimo de este tipo de sistemas contamos con la adaptación de unos scripts cedidos por el director del TFG capaces encontrar las soluciones óptimas a cada topología SS, SPS y PS, de manera que asignaremos como parámetros de diseño iniciales: datos geométricos, posiciones relativas de las bobinas, y unos datos eléctricos de primario y secundario; A continuación, se lanzará un cálculo iterativo que nos proporcionará la solución óptima. El diseño del cálculo iterativo es aportado como hemos mencionado por el director del TFG, Juan Luis Villa, contenido en un fichero "CompG.m" (perteneciente al entorno de Matlab) dichos scripts han sido modificados para que la entrada de los parámetros deseados y la salida de las soluciones se realice a través de la interfaz de usuario además se le añadieron funcionalidades para que el proceso pueda ser interrumpido desde la interfaz.

El proceso seguido para la realización del TFG comienza con la aplicación Appdesigner de Matlab, creando varias interfaces de usuario correspondientes a los diferentes pestañas ,además cada función requería unas modificaciones en los scripts para conseguir que la ampliación fuera capaz de comparar varios sistemas entre sí .Así en la pestaña principal se introducen los valores iniciales y muestran los resultados, en la segunda pestaña se visualiza un resumen de sus características en forma un conjunto gráficos y en la última pestaña se muestra un menú donde podemos representar individualmente los parámetros que más nos convengan.

El TFG ha consistido: primero, en crear las interfaces con Appdesigner, modificar los ficheros aportados por el director y crear las relaciones entre las interfaces y estos ficheros; Segundo, una vez terminado el programa se ha realizado el estudio sobre un sistema WPT con compensación S-S y S-P-S ante variación de parámetros de funcionamiento: variación de distancia, variación de frecuencia, variación de posición relativa entre bobinas y variación de la impedancia de carga.



Índice de contenidos

Índice de figuras	5
1. Introducción.....	6
1.1. Objetivos y alcance del proyecto.....	7
2. Sistemas de carga inalámbrica WPT.....	7
3. Las topologías	9
3.1. Topología SS	9
3.2. Topología PS	10
3.3. La Topología SPS.....	11
3.4. El parámetro KC.....	11
3.5. Algoritmo para la búsqueda de la solución optima	12
4. Una breve introducción al asistente “Appdesigner”.....	15
4.1. La vista de la interfaz o “Design view”.....	15
4.1.1. Librería de componentes “component library”	15
4.1.2. Navegador de componentes “component browser”.....	15
4.1.3. Editor de propiedades	16
4.1.4. La aplicación activa	16
4.2. La vista del código o “Code View”	16
4.2.1. Añadir una llamada o “callback”	17
4.2.2. Añadir una función	17
4.2.3. Añadir una propiedad	17
4.3. Lanzar nuestra aplicación	17
5. La interfaz	18
5.1. La pestaña de Diseño	18
5.2. La pestaña de variación de parámetros.....	22
5.3. La pestaña de Análisis individual.....	23



6. Ejemplo sobre el estándar SAE J2954	25
6.1. La variación de parámetros	27
6.1.1. Variación de la distancia entre las bobinas.....	27
6.1.2. Variación de la frecuencia de trabajo	28
6.1.3. Variación de la posición relativa entre las bobinas	29
6.1.4. Variación de la carga	29
6.2. Conclusiones tras el análisis variación de parámetros	30
7. Posibles Mejoras y conclusiones.....	31
8. Bibliografía y referencias.....	31

Índice de figuras

<i>Fig. 1</i> Circuito equivalente bobinas acopladas	8
<i>Fig. 2</i> Circuito equivalente topología SS	9
<i>Fig. 3</i> Circuito equivalente topología PS.....	10
<i>Fig. 4</i> Circuito equivalente topología SPS.....	11
<i>Fig. 5:</i> Vista diseño Appdesigner	15
<i>Fig. 6</i> Barra de herramientas (cavans) Appdesigner.....	16
<i>Fig. 7</i> Vista de código Appdesigner	16
<i>Fig. 8</i> Barra de herramientas Appdesigner.....	17
<i>Fig. 9</i> Pestaña de diseño	18
<i>Fig. 10</i> El incremento de N_1 N_2 nos permite visualizar el progreso.....	18
<i>Fig. 11</i> Solución encontrada	19
<i>Fig. 12</i> Ventana de "Warning"	19
<i>Fig. 13</i> Opciones activas tras cargar datos	20
<i>Fig. 14</i> Modo bobinas circulares	21
<i>Fig. 15</i> Pestaña gráficos variación parámetros.....	22
<i>Fig. 16</i> Pestaña gráficas variación parámetros para el caso de bobina circular	23
<i>Fig. 17</i> Análisis individual	23
<i>Fig. 18</i> Representación de una única variable	24
<i>Fig. 19</i> Ventana externa	24
<i>Fig. 20</i> Datos sistema SAE.....	25
<i>Fig. 21</i> Solución sistema SAE SPS.....	26
<i>Fig. 22</i> Solución sistema SAE SS	26
<i>Fig. 23</i> Gráfica $I_2[A]$ distancia	27
<i>Fig. 24</i> Gráfica $I_1[A]$ distancia	27
<i>Fig. 25</i> Gráfica $V_L[V]$ distancia	27
<i>Fig. 26</i> Gráfica $V_L[V]$ frecuencia.....	28
<i>Fig. 27</i> Gráfica $I_1[A]$ frecuencia	28
<i>Fig. 28</i> Gráfica Argumento frecuencia	28
<i>Fig. 29</i> Gráfica $V_L[V]$ desalineamiento.....	29
<i>Fig. 30</i> Gráfica $I_p[A]$ desalineamiento	29
<i>Fig. 31</i> Gráfica $I_2[A]$ Carga.....	29
<i>Fig. 32</i> Gráfica $V_L[A]$ Carga	29
<i>Fig. 33</i> Gráfica $I_1[A]$ Carga.....	29



1. Introducción

“La disrupción de la movilidad eléctrica junto con las energías renovables empuja hacia un futuro más limpio. El sector del transporte capitaliza el 40% de la energía consumida en España” [1] la electrificación de este sector junto con un aumento de la energía obtenida por fuentes renovables es un importante objetivo para avanzar hacia la sostenibilidad medioambiental .

Los vehículos eléctricos a día de hoy cuentan con grandes baterías de ion-litio, compuestas de pequeñas pilas, que se organizan en clústeres; maximizando la cantidad de pilas que cargan en paralelo minimizamos el tiempo necesario para cargar la batería, pero la reacción electroquímica que conlleva su funcionamiento impide tiempos de carga breves.

A día de hoy la carga rápida que ofrecen algunos modelos ronda la media hora para alcanzar el 70 - 80% de la carga total del vehículo, frente a los 2-3 minutos que se tarda en llenar un depósito de carburante.

Además, debemos usar mangueras de cable de considerable grosor que conectan estación con vehículo, las cuales deberán dejarse conectadas todo el tiempo que dure la carga, en el caso de la carga rápida no mucho más de media hora, pero si queremos cuidar la batería de nuestro vehículo deberemos realizar cargas lentas, cuya duración va más allá de varias horas, alargando una situación crítica para seguridad del vehículo y de la estación siempre que no contemos con una plaza en un aparcamiento privado.

Cabe comentar también que los conectores para dichas mangueras pese a existir adaptadores en el mercado no están unificadas en un único modelo y varían entre fabricantes.

Una posible solución para obtener una carga ultrarrápida sería utilizar supercondensadores aun incapaces de mantener en el tiempo la energía en ellos almacenada durante prolongados periodos de tiempo, sí que son adecuados para cargar una potencia elevada rápidamente, la autonomía de dichos vehículos se vería reducida drásticamente pero para remediarlo dispondríamos de cargadores de naturaleza inalámbrica a lo largo de la calzada, contando con sistemas de control que les permitirían mantener la máxima eficiencia aun cuando el vehículo se encontrara en movimiento.

Si nos limitamos a la infraestructura vial existente y no cambiamos las baterías por condensadores podríamos contar con un sistema de carga inalámbrica debajo de plazas de aparcamiento, con el objetivo de que el vehículo realice una carga lenta aun cuando no contamos con una plaza privada y con la ventaja de no dejar cables conectados.

En ambos casos es necesario un sistema de compensación que minimice los efectos que ocasionan dos bobinas acopladas magnéticamente aun cuando no están perfectamente alineadas, la carga de la batería varía o la distancia entre bobinas sea distinta a la esperada.

Con el fin de facilitar el desarrollo de futuras innovaciones que se pudiesen incorporar a la movilidad eléctrica, quise participar en el desarrollo de una aplicación que agilizará el cálculo de dichos sistemas de compensación.

1.1. Objetivos y alcance del proyecto

El objetivo principal será el desarrollo de un programa que facilite el cálculo de los parámetros necesarios para el desarrollo de un sistema de transferencia de potencia inalámbrico y que además permita un primer análisis comparativo frente a distintas modalidades y variantes de diseño, dicha aplicación estará desarrollada bajo el asistente de Matlab Appdesigner.

Los objetivos para la aplicación son:

- Calcular los parámetros necesarios para la modelización de sistemas WPT.
- Facilitar datos de análisis para distintas situaciones estacionarias.
- Permitir comparar las distintas situaciones estacionarias entre sí.
- Crear guardar y exportar conjuntos de parámetros.
- Contar con un acceso directo a Simulink para simular transitorios.
- Que todas las funciones mencionadas queden acotadas dentro de la aplicación a diseñar.

La elección de Appdesigner estuvo motivada principalmente por la necesidad de trabajar en un entorno Matlab debido a que los scripts cedidos por el director del TFG se encontraban escritos en este lenguaje de programación. Además, el entorno cuenta con asistente gráfico para diseñar interfaces, menús y cuenta con diálogos para crear funciones y editar propiedades. Su alternativa GUIDE también perteneciente al entorno Matlab no presenta tantas funciones y facilidades al diseño como Appdesigner.

2. Sistemas de carga inalámbrica WPT

Las siglas WPT hacen referencia a “Wireless Power Transfer” sistemas de transferencia de potencia inalámbricos, formado por dos bobinas eléctricamente aisladas y acopladas magnéticamente a través del aire lo que se conoce como bobinas débilmente acopladas; para conseguir rendimientos aceptables se sirven de elevadas frecuencias de conmutación.

Un sistema de WPT está formado por:

- Un primario compuesto por un alimentador de frecuencia variable, el juego de condensadores y la bobina inductora
- Un secundario compuesto por la bobina inductora, los condensadores de compensación, y un convertidor AC/DC para alimentar la carga

Estos sistemas presentan gran cantidad de ventajas en lo conveniente a la conexión, no cuentan con partes en contacto, luego siempre y cuando los elementos de la electrónica de potencia estén correctamente aislados frente al polvo y al agua, el sistema no se verá afectado por agentes externos.

Algunas aplicaciones existentes actualmente para estos sistemas son por ejemplo implantes biomédicos, herramientas profesionales, cargadores de teléfonos móviles o vehículos de transporte público.

El desalineamiento entre bobinas o incluso la variación de la distancia entre ellas puede ser un factor muy importante a tener en cuenta pues al depender de la implantación del sistema pueden variar incluso de una carga a otra. Debido a esto el sistema de control debe estar correctamente caracterizado para asignar rangos seguros de operación al a los sistemas de conmutación, buscando en todo momento la máxima eficiencia del sistema.

Para acercarnos al problema podemos partir del circuito equivalente de dos bobinas acopladas magnéticamente.

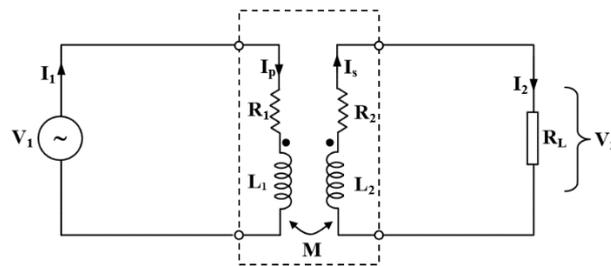


Fig. 1 Circuito equivalente bobinas acopladas

La potencia activa transferible resulta del producto de la potencia aparente máxima por el factor de potencia de la corriente del secundario, si el factor de potencia es la unidad la potencia activa será máxima para que ocurra será necesario trabajar en resonancia.

La potencia máxima transferible viene dada por la expresión:

$$P_{2Max} = \frac{(\omega M^2 I_p^2 q_s)}{L_2} \quad (1)$$

Donde:

ω = Frecuencia de trabajo.

q_s = Factor de calidad del secundario. ¹

M = Coeficiente de inducción mutua entre bobinas.

I_p = Corriente por el devanado primario.

L_2 = Coeficiente de autoinducción del devanado secundario.

¹ El factor de calidad:

$$\text{Se define como } q_p = \frac{VA_{r1}}{P_1}; q_s = \frac{VA_{r2}}{P_2}$$

El factor de calidad q_s es introducido por Stileau and Covic en su propuesta de un método general para sistemas con núcleo magnético de ferrita.

A la hora de diseñar un sistema de dos bobinas acopladas nos encontraremos con infinitas posibilidades de M y L_2 ya que dependen de la geometría, sin embargo la potencia máxima a transferir nos servirá para definir M y L_2 .

El proceso consistirá en ir iterando posibles M y L_2 hasta encontrar aquellos valores que optimizan el sistema y lo hagan estable.

El objetivo de trabajar a altas frecuencias es reducir la corriente magnetizante I_p necesaria y por tanto reducir la cantidad de cobre requerida.

Por contrapartida las consecuencias de trabajar a altas frecuencias son las pérdidas, los altos valores de impedancias ocasionadas por las inductancias obliga al sistema a trabajar en resonancia para transmitir la máxima potencia.

Para conseguir la resonancia podemos trabajar con distintas topologías según como compensemos la inductancia del primario y secundario, cada topología guardara ventajas e inconvenientes relacionados con las afecciones al sistema como pueden ser la carga que alimenta el sistema el desalineamiento entre bobinas la variación de frecuencia o incluso la distancia entre las bobinas.

3. Las topologías

A continuación, se exhiben las distintas combinaciones de condensadores, con el objetivo de presentar sus principales características.

3.1. Topología SS

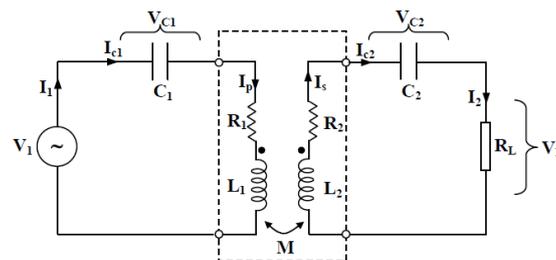


Fig. 2 Circuito equivalente topología SS

En el sistema “Serie-Serie” los condensadores C_1 C_2 se encuentran en serie con las bobinas L_1 y L_2 .

Las ecuaciones de los condensadores son:

$$C_2 = \frac{1}{L_2 \omega_d^2}; C_1 = \frac{1}{L_1 \omega_d^2} \quad (2)$$

Donde ω_d es la frecuencia óptima de diseño que conlleva el máximo rendimiento.

Estas ecuaciones provienen del análisis del circuito equivalente, se muestra en los anexos la demostración completa.

Sus características principales son:

- La intensidad y la tensión se disparan frente a un desalineamiento pudiéndose dañar los componentes.
- Al salirnos de la frecuencia nominal vemos como el rendimiento cae.
- “La compensación SS es desde un punto de vista económico la más adecuada presentando un gran número de combinaciones posibles y un mayor factor de diseño que el resto de las topologías” [2]

3.2. Topología PS

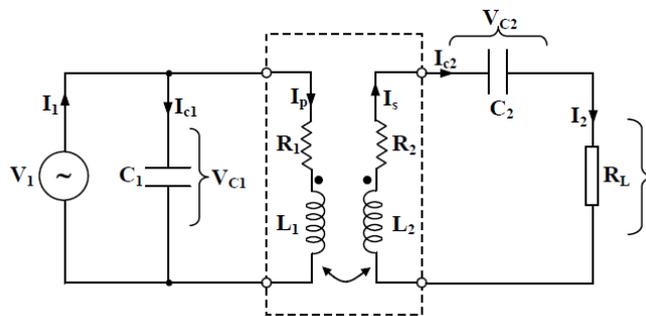


Fig. 3 Circuito equivalente topología PS

En el sistema “Paralelo -Serie” los condensadores se encuentran en serie con las bobinas L1 y L2.

Sus ecuaciones son:

$$C_2 = \frac{1}{L_2 \omega_d^2}; C_1 = \frac{L_2 C_2}{L_1 + \frac{M^4}{L_1 L_2 C_2 R_L^2}} \quad (3)$$

Sus características principales son:

- Al salirnos del alineamiento no repercute en una subida de tensión e intensidad por el contrario decaen lo que se traduce en que al salir de la zona de alineamiento trabajamos en un rango más seguro.
- El rendimiento cae al salirnos de la frecuencia nominal .
- “La compensación PS es la más crítica en su diseño debido al menor número de combinaciones posibles y la mayor diferencia entre la solución óptima y otras posibles.” (2)

3.3. La Topología SPS

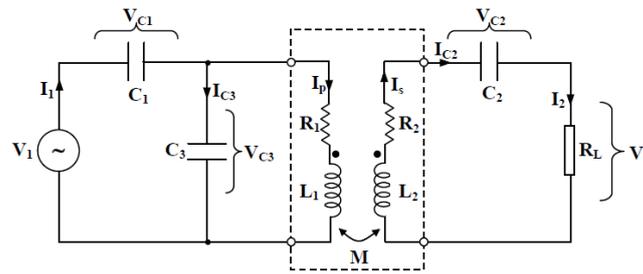


Fig. 4 Circuito equivalente topología SPS

En el sistema “Serie-Paralelo-Serie” los condensadores se encuentran en serie con las bobinas L1 y L2, esta topología nace de la combinación de la compensación paralelo serie y la incorporación de un condensador en serie con la fuente.

Sus ecuaciones son:

$$C_2 = \frac{1}{L_2 \omega_d^2} \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{L_2 C_2}{L_1 + \frac{M^4}{L_1 L_2 C_2 R_L^2}} \quad (5)$$

Sus características son:

- Gráficamente estamos combinando la topología SS con la PS hemos solucionado los picos de consumo de intensidad frente a desalineamientos y aumentado el margen útil del cargador.
- Al contrario que en el caso anterior PS en el que caía la tensión y la intensidad por igual al salirnos del alineamiento aquí decae la tensión y la intensidad, crece pero dentro de un rango seguro.

3.4. El parámetro KC

El parámetro KC nos permite variar con un solo parámetro el juego de condensadores de primario y secundario aparece para la compensación SPS, pero sus valores límite KC=1 y KC=0 guardan relación con las compensaciones SS y PS respectivamente.

En la compensación SPS tenemos dos condensadores en el primario C1 el condensador en serie y C3 el condensador en paralelo.

Partiendo del caso paralelo serie reducimos el condensador C3 un factor KC el resto de la capacidad necesaria para trabajar en resonancia será aportado por un segundo condensador C1 ahora en serie, para evitar que cortocircuitasen en las conmutaciones debemos introducir una inductancia L3 en serie con C1 para ello lo reducimos a su vez un factor KC1.

$$C'_1 = C_1 * K_{c1} \quad (6)$$

$$C'_3 = C_3 * K_c \quad (7)$$

Seleccionando un valor $KC = 0,85$ se pueden conseguir desalineamientos de hasta el 40% sin incremento en la potencia absorbida y por tanto sin necesidad de control, mejorando notablemente el comportamiento respecto de las topologías clásicas. Si la fuente se diseña para corrientes del orden de 2 veces la nominal eligiendo un $KC=0,7$, se pueden conseguir desalineamientos del 70 % de la anchura de la bobina receptora permitiendo un elevado grado de libertad en la transferencia. [2]

3.5. Algoritmo para la búsqueda de la solución optima

El algoritmo propuesto por el director del trabajo fin de grado consta de un proceso iterativo en el que por cada combinación de espiras entre el primario y secundario el algoritmo guarda una posible solución hasta satisfacer las condiciones óptimas de trabajo.

Los parámetros de entrada al algoritmo son:

Tabla 1: Parámetros de entrada del algoritmo

Nombre	El nombre del conjunto de datos	r1[m]	Radio de la bobina 1
KC	Factor KC	r2[m]	Radio de la bobina 2
Vcc [V]	Tensión del bus	V batería [V]	Tensión de la Batería
V1 [V]	Tensión alimentación	V deseada [V]	Tensión deseada
fmax [Hz]	Frecuencia máxima	P deseada [W]	Potencia a suministrar
maxN1	Numero espiras máximo	maxN2	Número de espiras
Densidad1[A/mm2]	Conductividad del cobre para el primario	Densidad 1 2 [A/mm2]	Conductividad del cobre para el secundario
a1 [m]	Longitud del lado a1	a2 [m]	Longitud del lado a1
b1 [m]	Longitud del lado b1	b2 [m]	Longitud del lado b1
c [m]		e [m]	
h [m]	Distancia entre bobinas		

Los parámetros de salida:

Tabla 2: Parámetros de salida del algoritmo

Pabs[W]	Potencia absorbida	Pcarga[W]	Potencia en la carga
densil1 [A/mm ²]	Densidad de corriente del conductor primario	densil2 [A/mm ²]	Densidad de corriente del conductor del secundario
rend	Rendimiento	fr [Hz]	Frecuencia
N1	numero de espiras del primario	N2	Numero de espiras del secundario
L1 [H]	Inductancia del primario	L2 [H]	Inductancia del secundario
R1 [Om]	radio del primario	R2 [Om]	Radio de secundario
S1 [mm ²]	Sección de la bobina del primario	S2 [mm ²]	Sección de la bobina del secundario
I1 [A]	Intensidad suministrada al primario	I2 [A]	Intensidad secundario
Ip[A]	Intensidad del primario	M [H]	Inducción mutua

Condensadores y bobinas:

Tabla 3 : Condensadores y bobinas mostrados

C1 [F]	Condensador1	VC1 [V]	Tensión condensador 1	IC1 [A]	Corriente condensador 1
C2 [F]	Condensador2	VC2 [V]	Tensión condensador 2	IC2[A]	Corriente condensador 2
C3 [F]	Condensador3	VC3 [V]	Tensión condensador 3	IC3 [A]	Corriente condensador 3
L3[H]	Inductancia 3	VL3 [V]	Tensión inductancia 3	IL3 [A]	Corriente bobina 3

EL algoritmo iterativo se divide en dos partes. para cada combinación de espiras:

- Tras calcularse todos los parámetros fijos de esa combinación aproximaremos una potencia inicial a la potencia deseada para ello aumentaremos gradualmente la frecuencia hasta que la potencia inicial alcanza la deseada, en estas primeras iteraciones vamos guardando los valores para próximos pasos.
- Una vez alcanzada la potencia deseada aplicamos las condiciones de corrección, vemos si podemos aumentar la sección (la densidad de corriente máxima limita cuanto pude aumentar la sección) y la frecuencia. Tras varias iteraciones y una vez que alcancemos las densidades de corriente máximas podremos entrar en las condiciones finales de frecuencia, y factor de diseño (una evolución del factor de calidad). Comentar que llegados a este punto ya cumplíamos la condición de potencia.

Nuestras condiciones para una solución óptima para este algoritmo serán:

- Frecuencia de trabajo entre el 90% y el 102% de la frecuencia máxima introducida
- Densidades de corriente por debajo de las máximas introducidas
- Potencia en la carga debe ser mayor que la potencia deseada.
- El factor de calidad del primario sea mayor que el del secundario $q_p(N_1, N_2) > q_s(N_1, N_2)$ asegurando así una única frecuencia de resonancia siendo q_s el factor de calidad del secundario y q_p el factor de calidad del primario.

Es posible encontrar más de una combinación (N_1, N_2) que cumpla con todos los requerimientos, en estos casos el sistema devolverá la primera solución que encuentre, se cumple que en la matriz de soluciones el primer valor obtenido presenta mejores prestaciones para asegurarnos restringimos como ya hemos comentado para aquellas soluciones con un $KD=1$ Siendo KD el factor de diseño.

$$K_D(N_1, N_2) = \frac{1}{\left[1 + \ln\left(\frac{q_p(N_1, N_2)}{q_s(N_1, N_2)}\right)\right] * \left[1 + \ln\left(\frac{f_{max}}{f_0(N_1, N_2)}\right)\right]} \quad (8)$$

Donde:

$q_p(N_1, N_2)$ Es el factor de calidad del primario

$q_s(N_1, N_2)$ Es el factor de calidad del secundario

$f_0(N_1, N_2)$ Es la frecuencia solución para esa combinación espiras

f_{max} Es la frecuencia máxima introducida

N_1 Numero de espiras del primario (índice de la matriz soluciones)

N_2 Numero de espiras del secundario (índice de la matriz soluciones)

4. Introducción al asistente “Appdesigner”

En este apartado describiré un breve resumen de algunas de las características principales de las que dispone Appdesigner.

“Appdesigner integra las dos tareas principales de la creación de una app: la organización de los componentes visuales de una interfaz gráfica de usuario (GUI) y la programación del comportamiento de la app.” [3]

El asistente se divide en dos vistas principales:

4.1. La vista de la interfaz o “Design view”

Esta vista está pensada para que el usuario pueda añadir y personalizar la interfaz.

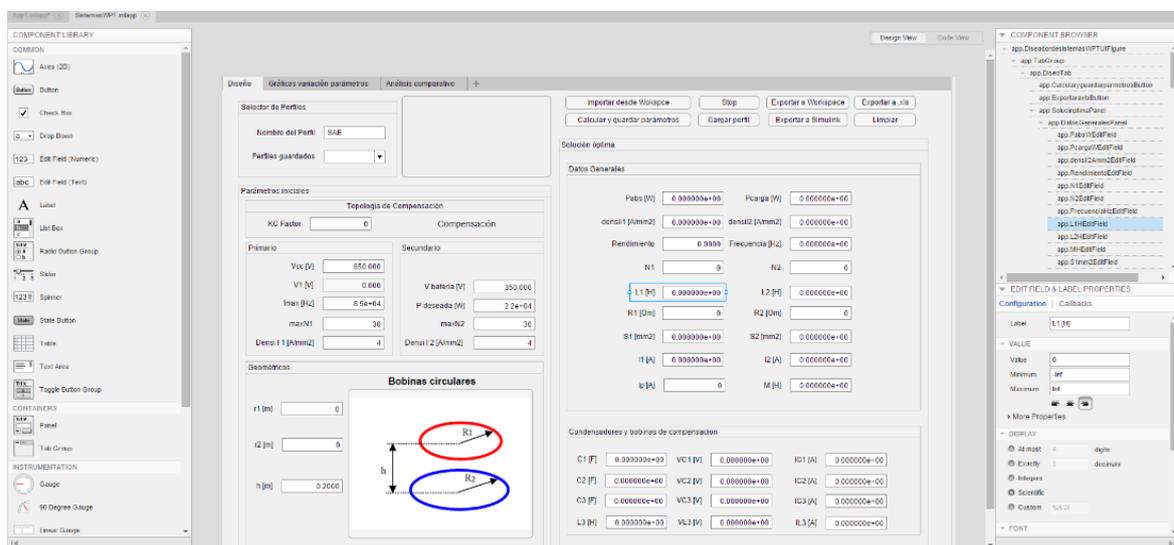


Fig. 5: Vista diseño Appdesigner

Esta vista se encuentra dividida en cuatro zonas

4.1.1. Librería de componentes “component library”

Donde encontramos un listado de los componentes que podemos usar para nuestra aplicación, para ellos bastará con arrastrar hasta nuestra aplicación activa.

La librería cuenta con toda clase de botones, controles, selectores tablas soportes gráficos que podemos incorporar a nuestra ventana.

4.1.2. Navegador de componentes “component browser”

Una vez arrastrado un componente a la aplicación activa nos aparecerá con su nombre de referencia para que podamos tener un acceso rápido.

4.1.3. Editor de propiedades

Cada componente tiene unas propiedades internas, que varían dependiendo de las características de elemento así un selector no tiene las mismas propiedades que un botón, pero sí que compartirá la propiedad visibilidad, todo el desglose de las propiedades se encuentra en la referencia de Appdesigner.

El editor de propiedades permite pues interaccionar con algunas de estas propiedades o con el texto que muestra el componente en la ventana activa.

4.1.4. La aplicación activa

El asistente gráfico en sí, permite ver una versión preliminar de nuestra aplicación además manualmente podemos ordenar los componentes con ayudas gráficas y guías.



Fig. 6 Barra de herramientas (cavans) Appdesigner

En la barra de herramientas observamos las diferentes formas de alienación para los componentes opciones de malla redimensionamiento etc.

4.2. La vista del código o “Code View”

En esta ventana encontramos el código de nuestra aplicación; tras arrastrar los componentes en la ventana anterior se habrá generado el código correspondiente en la zona oscurificada, dicho código generado automáticamente no se podrá editar.

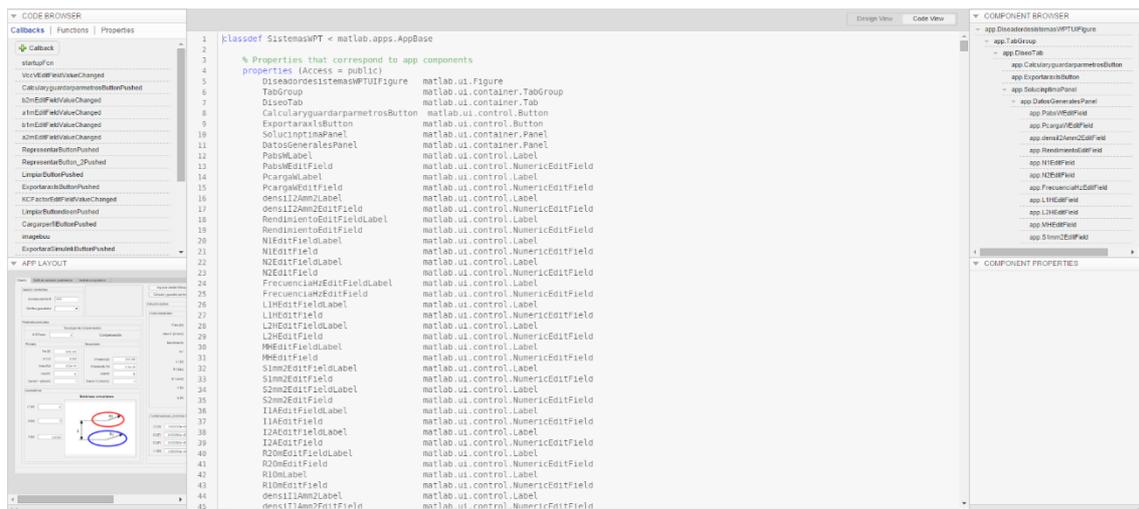


Fig. 7 Vista de código Appdesigner

Desde aquí la aplicación nos permitirá realizar tres acciones:

4.2.1. Añadir una llamada o “callback”

En la parte inferior izquierda nos aparece una ventana con la previsualización de nuestra aplicación aquí podemos seleccionar cualquier componente de nuestra aplicación, otra manera puede ser desde el navegador de componentes, una vez seleccionado podemos añadirle una llamada en el código para la que el programa nos dará varias opciones dependiendo de qué tipo de componente se trate; por ejemplo una de estas llamadas puede ocurrir al cambiar el texto de una ventana o al pulsar un botón.

Una vez seleccionada la opción preferida se desbloqueará una parte de la sección del código para que podamos escribir el código de la función de “callback”.

4.2.2. Añadir una función

Las funciones no necesitan que se seleccione previamente un componente, tras clicar en añadir función podemos comenzar a añadir el código.

Al igual que cualquier script escrito en Matlab Appdesigner se comportará de la misma manera a la hora de llamar otros script o clases externas.

4.2.3. Añadir una propiedad

Las propiedades de nuestra aplicación actúan a modo de variables globales, el asistente nos permite elegir si serán públicas o privadas por si queremos acceder desde otros scripts.

4.3. Lanzar nuestra aplicación



Fig. 8 Barra de herramientas Appdesigner

En la barra de herramientas encontramos los controles típicos de Matlab: guardar, guardar como, abrir, empaquetar aplicación, una ayuda y el botón correr

Basta con pulsar el botón “run ” y se lanzara la ventana que hemos programado para tal efecto ,en el caso de modificar el código no hace falta cerrar la ventana y volver a pulsar el botón “run ” bastara con guardar , en ese momento veremos cómo los cambios que le hemos hecho a la aplicación se actualizan

5. La interfaz

La Herramienta está dividida en tres pestañas:

5.1. La pestaña de Diseño

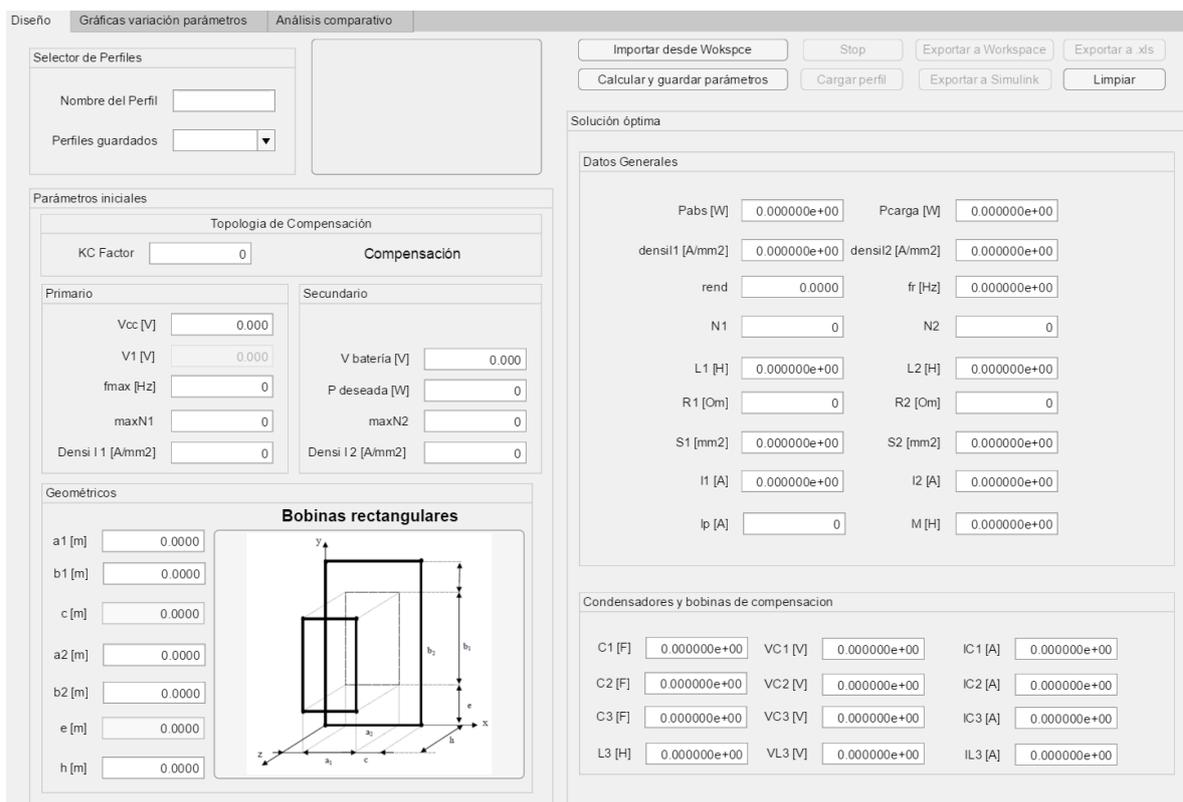


Fig. 9 Pestaña de diseño

Es la ventana principal de la aplicación donde si iniciamos por primera vez, estarán bloqueados el resto de los botones salvo la opción importar y calcular.

De esta manera para comenzar a utilizar el programa podemos optar por:

- Crear un conjunto de datos para sistema nuevo

Para ello introducimos los datos del sistema a calcular, el primer dato que introduciremos será un nombre para el conjunto de datos que vamos a calcular, después rellenaremos dentro del grupo “parámetros iniciales” el valor de KC, los valores máximos de frecuencia, número de bobinas la carga deseada la tensión de alimentación y la tensión deseada para la carga, después los datos referidos para las dimensiones del primario y secundario así como la distancia entre bobinas, clicando en la figura que aparece en dicho apartado podemos cambiar entre bobinas rectangulares y circulares.

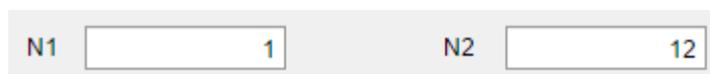


Fig. 10 El incremento de N1 N2 nos permite visualizar el progreso

Una vez pulsado Calcular y guardar parámetros podemos visualizar el progreso fijándonos en N_1 N_2 puesto que a medida que vaya avanzando la iteración irán incrementándose hasta alcanzar N_{1max} N_{2max} :

- Si se encuentra solución se mostrará la ventana “Solución encontrada” que se muestra en la imagen superior, además se cargarán los datos en la parte derecha de la ventana. Siempre que el nombre de perfil no contenga espacios o este únicamente compuesto por números el programa podrá exportar los resultados a Excel mediante el botón “Exportar a .xls”, al Workspace de Matlab con el botón “Exportar a Workspace ” y portar los datos a variables globales para utilizarlas en Simulink mediante el botón “Exportar a Simulink”

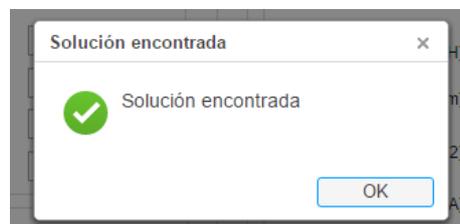


Fig. 11 Solución encontrada

- Si no se ha llegado a una solución tras comprobar todas las combinaciones de espiras el programa devolverá la ventana de “Warning” con el mensaje “no se han encontrado solución, considere aumentar N1 N2”, después de ese momento el programa volverá al estado justo anterior al pulsar el botón “Calcular y guardar parámetros”.

Al recibir el error “no se ha encontrado solución” podemos optar por :

- Aumentar el número de espiras en el caso de haber introducido un numero bajo de combinaciones puede ser suficiente para encontrar solución.
- Aumentar en tamaño de la bobina puede ser una opción válida si el tamaño de las bobinas es equivalente a la distancia que las separa.

He de comentar que ambas correcciones tienen como objetivo mejorar el factor de autoinducción mutua dado que si es muy pequeño el algoritmo lo encontrará insuficiente para satisfacer las condiciones del algoritmo.

- Si se ha interrumpido la operación con el botón “Stop” el programa también mostrara una ventana de “Warning” “Se ha parado la operación”. La aplicación se comportará igual que si no hubiera encontrado solución posible, volviendo justo al estado anterior a pulsar Calcular y guardar parámetros.

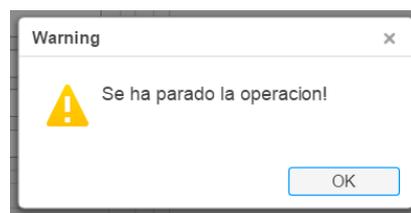


Fig. 12 Ventana de "Warning"

- Cargar un sistema que anteriormente guardamos en el Workspace de Matlab
Para ello escribimos en el recuadro “nombre de perfil” el nombre que le dimos en la otra sesión al conjunto de datos, en el caso de usar números o no existir devolverá el “Warning” “No existe una variable con ese nombre”.
Si hemos tenido éxito dicho conjunto de datos aparecerá en el menú desplegable “Perfiles Guardados” y estará disponible dentro de la aplicación, si queremos ver la solución de dicho sistema y las gráficas grupales debemos seleccionarlo en el desplegable “Perfiles Guardados” y presionar el botón “cargar perfil”.

Si ya tenemos un conjunto de datos en el menú desplegable se habrán desbloqueado el resto de las opciones y podremos:

- Calcular otro conjunto de datos, solo habría que escribir en “nombre de perfil” otro nombre distinto o escribir el mismo para que se sobrescribiera y pulsar “calcular y guardar parámetros”
- Limpiar borra únicamente los valores que se muestran en la pantalla no borra la memoria del programa.

Las funciones de exportar requieren que el conjunto de datos además de existir en el desplegable “perfiles guardados” se encuentre cargado este estado ocurre después de calcular y guardar parámetros para el último perfil calculado y para el resto (perfiles dentro de perfiles guardados o después de importar desde Workspace) será necesario cargarlos mediante el botón “Cargar perfil” tras hacerlo se visualizarán las soluciones en el grupo soluciones óptimas.

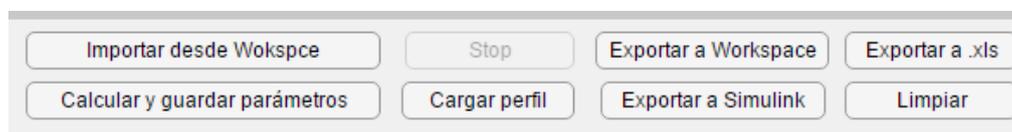


Fig. 13 Opciones activas tras cargar datos

- Exportar al Workspace el conjunto de datos seleccionado en el menú desplegable al pulsar se exporta con el nombre que le hayamos dado es importante no usar números ni caracteres extraños. Cabe comentar que al salir y entrar al programa los perfiles creados serán borrados; la única manera para conservar los datos entre sesiones es guardando los perfiles en el Workspace de Matlab
- Exportar a Excel, guarda en un archivo de Excel la solución seleccionada en el menú desplegable con el nombre que aparece en dicho menú, (no hace falta cargar dicho perfil previamente). Esta función solo permite realizar una exportación por sesión si la licencia de Microsoft Office no se encuentra activada correctamente en el caso contrario permitirá realizar varias exportaciones en la misma sesión.
- Exportar a Simulink, carga las variables necesarias en el Workspace y lanza el modelo en Simulink con el nombre “Modelosim”.

En todas las funciones anteriores existe la posibilidad de que no se realicen con éxito, como por ejemplo si como nombre de perfil se introdujo un texto con caracteres extraños o con espacios, o se ha intentado cargar un objeto de Matlab que no corresponde con los objetos internos del programa para ello, el programa devuelve dos ventanas distintas en el caso de éxito o fracaso, todas ellas agrupadas en una tabla en los anexos.

Otra función es la de cambiar entre coordenadas rectangulares y circulares en la siguiente imagen observamos como al clicar en la imagen que orienta sobre el diseño de bobinas rectangulares hace cambiar el sistema a coordenadas cilíndricas.

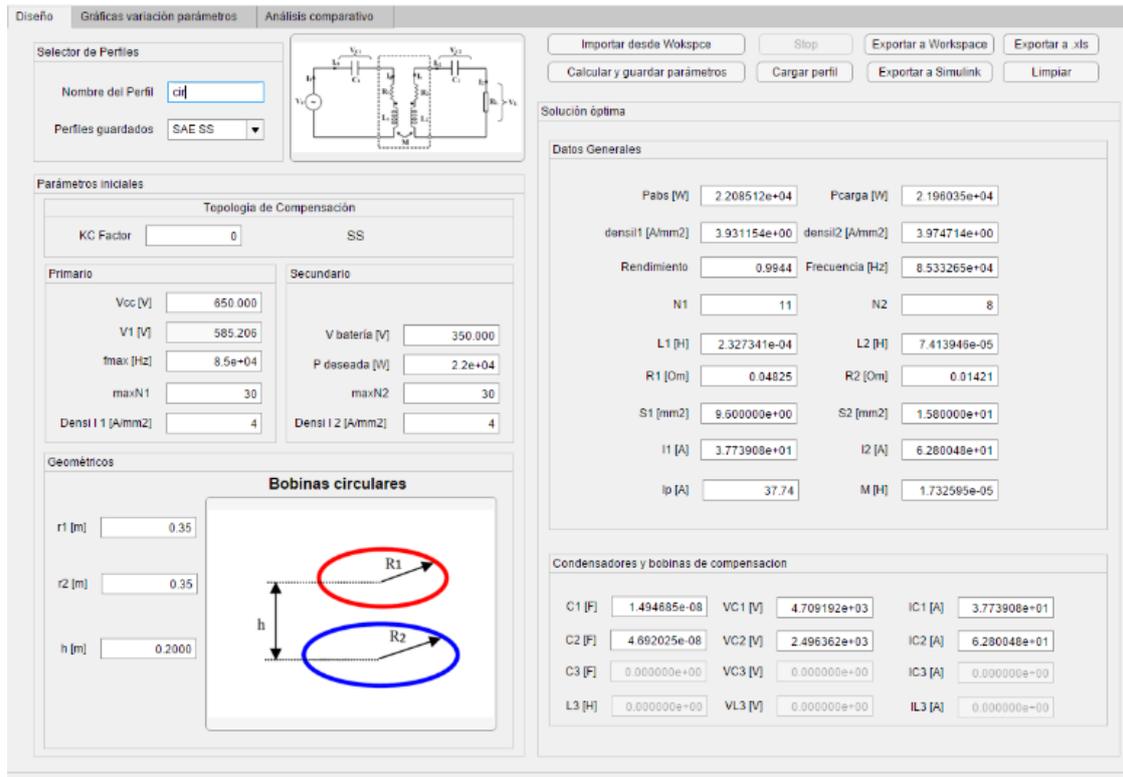


Fig. 14 Modo bobinas circulares

Ahora las gráficas de variación de parámetros se verán limitadas a menos opciones esto es debido a limitaciones que impone el cálculo de inductancia para bobinas circulares, pero aun así obtendremos: la variación de distancia carga y frecuencia

Para volver al modo anterior basta con volver a clicar en las bobinas en este caso circulares.

5.2. La pestaña de variación de parámetros

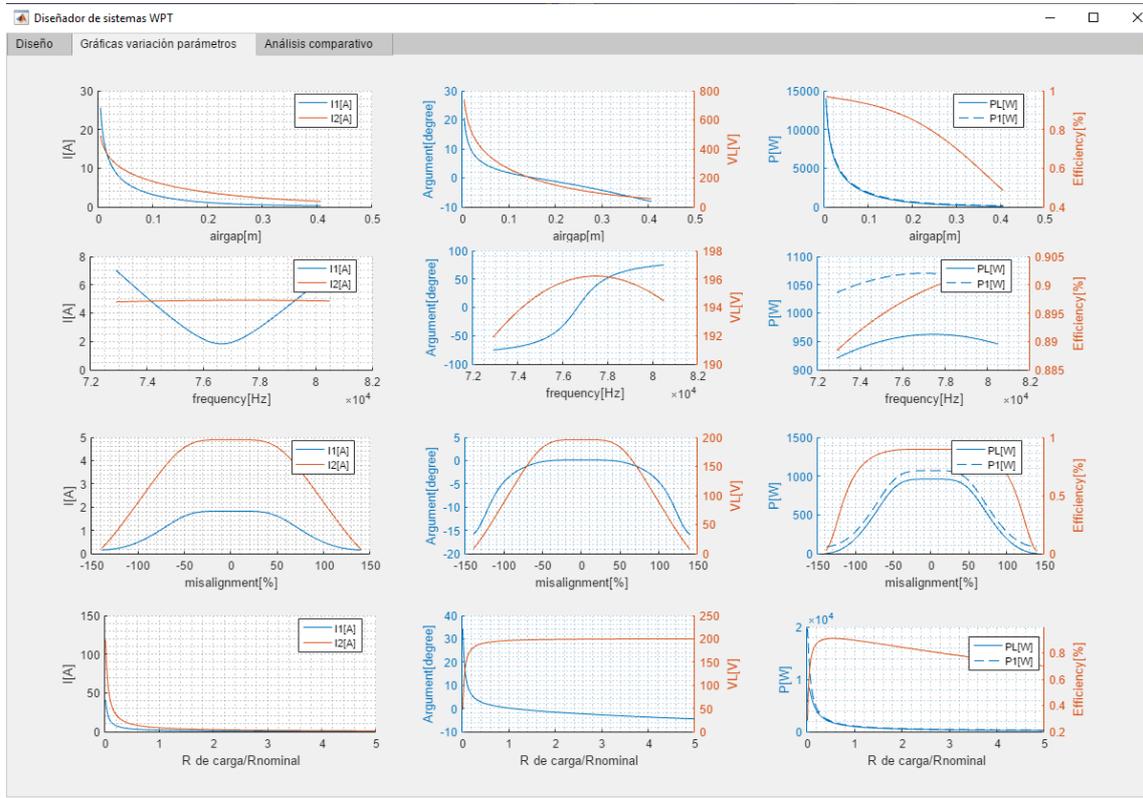


Fig. 15 Pestaña gráficas variación parámetros

Una vez se calcularon los datos de un sistema en la ventana de gráficas grupales podemos observar para los resultados de la variación de parámetros las gráficas resultantes.

Las gráficas se dividen en cuatro filas una por cada caso de variación de parámetros, en orden tenemos distancia entre bobinas, frecuencia desalineamiento y variación en la carga. De izquierda a derecha el programa representa las variables más características del sistema: intensidad de corriente del primario y secundario, tensión en el secundario y argumento, y en la gráfica de la derecha del todo rendimiento potencia absorbida y cedida a la carga.

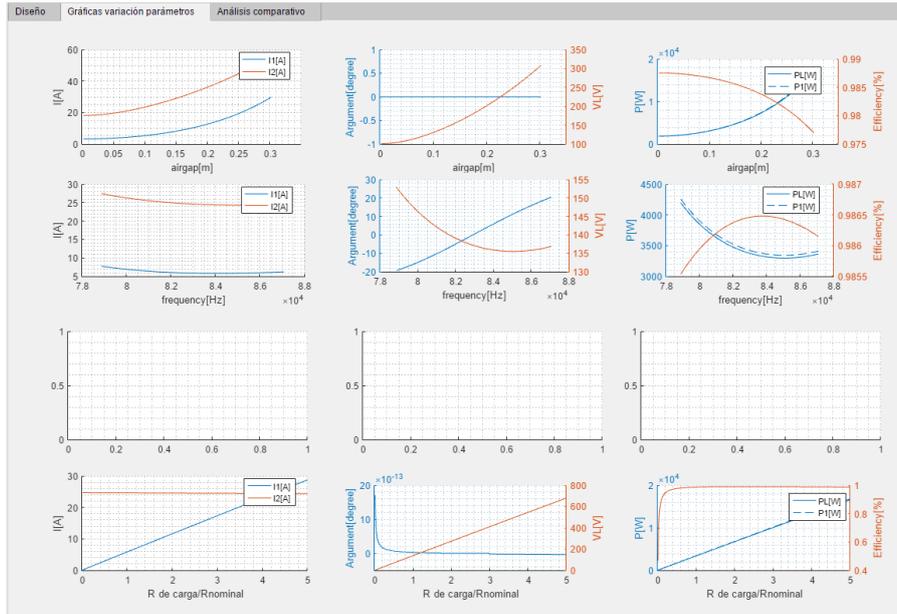


Fig. 16 Pestaña gráficas variación parámetros para el caso de bobina circular

Como hemos comentado en la ventana anterior en el modo bobinas circulares las gráficas grupales estarán limitadas a distancia entre bobinas, frecuencia y variación en la carga.

5.3. La pestaña de Análisis individual

Para observar los resultados de la variación de parámetros con mayor detenimiento en este apartado se encuentra una gráfica personalizable en la que podemos seleccionar dos conjuntos de datos y representar cualquiera de sus variables entre sí para comparar entre distintos sistemas de compensación, se pueden combinar dos o más conjuntos de datos siempre y cuando compartan los mismos ejes.

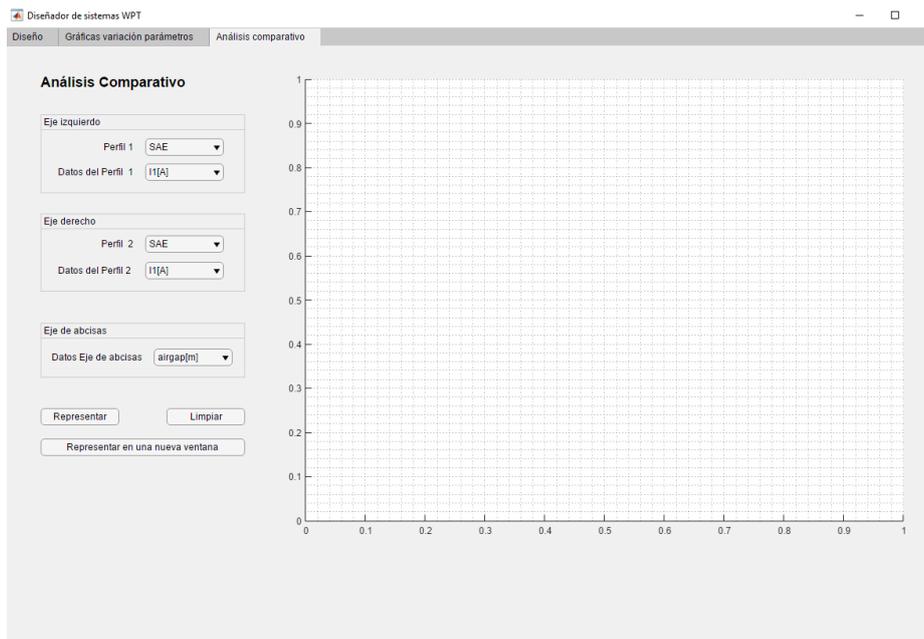


Fig. 17 Análisis individual

La pestaña de análisis individual permite visualizar más variables que las vistas en la ventana anterior como: “ I_1 [A], I_2 [A], V_L [V], Argument[degree], P_L [W], Efficiency[%], P_1 [W], I_p [A], I_c3 [A], V_{C1} [V], V_{C2} [V]”.

Cabe mencionar que no se podrá acceder al botón representar hasta que no se haya cargado un primer conjunto de datos. Se deben introducir los datos en ambos ejes y posteriormente accionar representar, en el caso de querer representar únicamente un dato se deben hacer coincidir ambos ejes con los mismos datos como en el ejemplo de la figura.

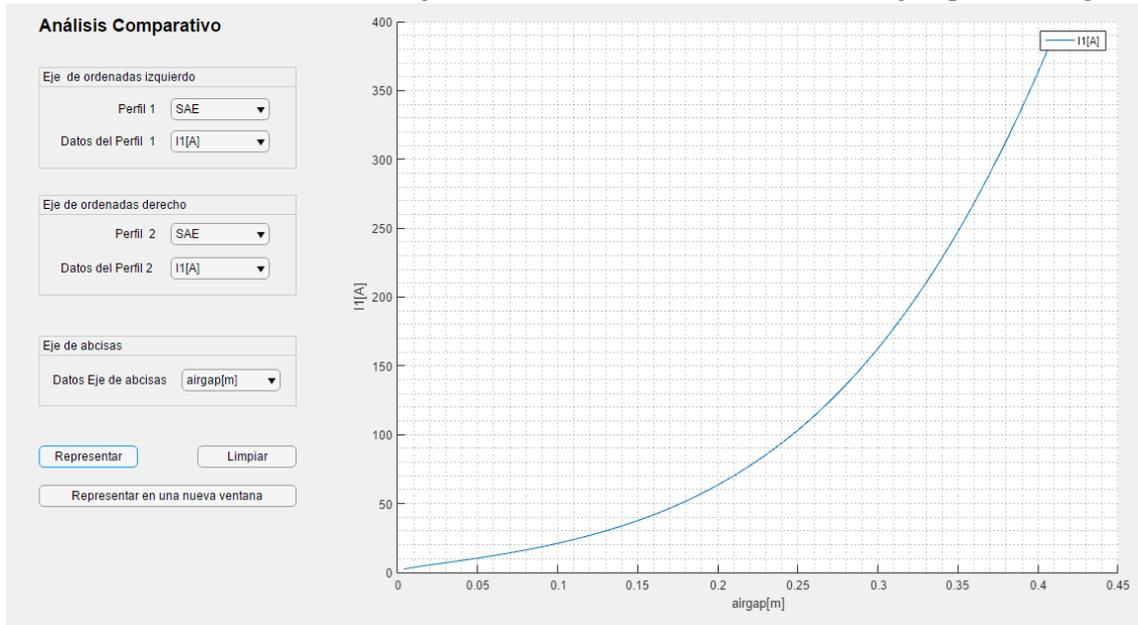


Fig. 18 Representación de una única variable

Además, existe la posibilidad de visualizar las gráficas de manera externa a la aplicación mediante el botón representar en ventana externa lo cual permite utilizar las características propias de Matlab como los marcadores, la lupa, exportar como figura o imagen etc.

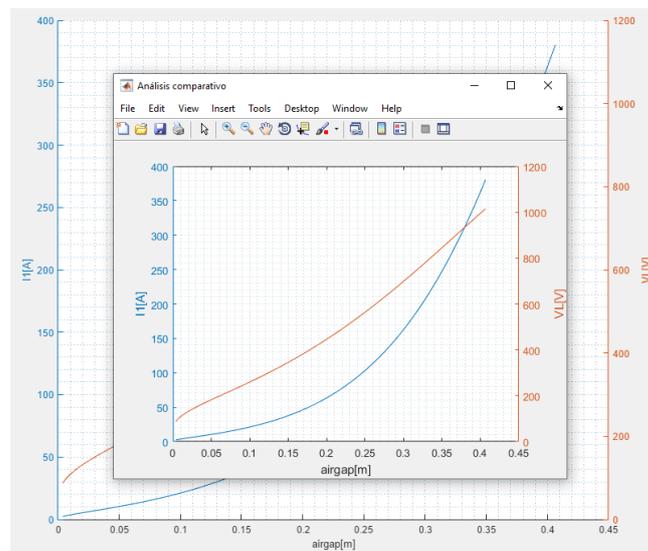


Fig. 19 Ventana externa

6. Ejemplo sobre el estándar SAE J2954

Con la intención de enfrentar la aplicación a una situación basada en un estándar real, buscaremos y compararemos entre las soluciones obtenidas para distintas topologías de compensación.

Con el estándar SAE J2954 se tiene como objetivo, la estandarización del vehículo eléctrico buscando la compatibilidad entre los desarrollos que se realizan mundialmente, así como también las estaciones de carga.

Para este ejemplo dispondremos de:

- Una potencia 22 kW
- Dos bobinas rectangulares de 0.4 x 0.8 la del primario y 0.4 x 0.4m la del secundario, separadas a 0.15 m de distancia.
- Tensión del Bus a 650V
- Y una tensión en la carga de 350V.
- Una frecuencia de y 85 kHz

Como condiciones máximas

- Una densidad de corriente de 4 [A/mm²]
- Unas 30 vueltas de primario y secundario

Parámetros iniciales

KC Factor SS

Primario	Secundario
Vcc [V] <input type="text" value="650.000"/>	V batería [V] <input type="text" value="350.000"/>
V1 [V] <input type="text" value="585.206"/>	P deseada [W] <input type="text" value="2.2e+04"/>
fmax [Hz] <input type="text" value="8.5e+04"/>	maxN2 <input type="text" value="30"/>
maxN1 <input type="text" value="30"/>	Densi I 2 [A/mm ²] <input type="text" value="4"/>
Densi I 1 [A/mm ²] <input type="text" value="4"/>	

Geométricos

Bobinas rectangulares

a1 [m] <input type="text" value="0.4000"/>	
b1 [m] <input type="text" value="0.8000"/>	
c [m] <input type="text" value="-0.0000"/>	
a2 [m] <input type="text" value="0.4000"/>	
b2 [m] <input type="text" value="0.4000"/>	
e [m] <input type="text" value="0.2000"/>	
h [m] <input type="text" value="0.1500"/>	

Fig. 20 Datos sistema SAE

Con la finalidad de utilizar todas las funciones que ofrece la herramienta desarrollada crearé dos perfiles uno con topología SS (KC=0) Y topología SPS con KC=0.84.

Para realizar la comparación partimos de las tres topologías ya comentadas sin embargo la compensación PS tiene dificultades para converger en una solución que podamos considerar acertada, esto se debe principalmente al trabajar con distancias entre bobinas muy grandes. Es por esto por lo que no se considerara para esta comparativa; de esta pasamos a comparar los comportamientos de la topología SS Y SPS.

A continuación, se muestran ambas soluciones tal cual son mostradas en la aplicación cabe mencionar que en la compensación SS los valores de los condensadores C3 y la bobina L3 aparecen sombreados dado que no existen para esa compensación

Tabla 4 : Resultados para la topología SS y SPS

Topología	SS	SPS
KC	0	0,84
f(Hz)	85332,65	84016,95
P1(W)	22085,12	21976,67
PL(W)	21960,35	21828,68
Rendimiento	0,994351	0,993266
L1(H)	0,000233	1,63E-05
L2(H)	7,41E-05	3,08E-05
N1	11	3
N2	8	5
S1(mm2)	9,6E-06	5,6E-05
S2(mm2)	1,58E-05	1,58E-05
C1(F)	1,49E-08	9,67E-09
C2(F)	4,69E-08	1,16E-07
C3(F)	0	1,84E-07
L3(H)	0	0,000278
VC1(V)	4709,192	7359,532
VC2(V)	2496,362	1019,363
VC3(V)	0	1930,709
VL3(V)	0	5519,649



Fig. 21 Solución sistema SAE SPS



Fig. 22 Solución sistema SAE SS

6.1. La variación de parámetros

El dimensionamiento del sistema WPT estudiado se obtiene para unas condiciones nominales, es interesante para comprender el funcionamiento del sistema someterlo a una variedad de situaciones. En este apartado se somete el sistema a la variación de parámetros esto es manipular las características críticas de nuestro sistema partiendo de su valor nominal.

De esta manera someteremos nuestro sistema a: desalineamiento, variación de distancias entre bobinas, variaciones de la frecuencia o a distintos niveles de carga en una batería.

6.1.1. Variación de la distancia entre las bobinas

La distancia entre bobinas es un parámetro de diseño; pero en un proceso de carga la distancia entre bobinas puede variar, observaremos en este apartado los cambios de los valores del circuito para distintas distancias entre bobinas.

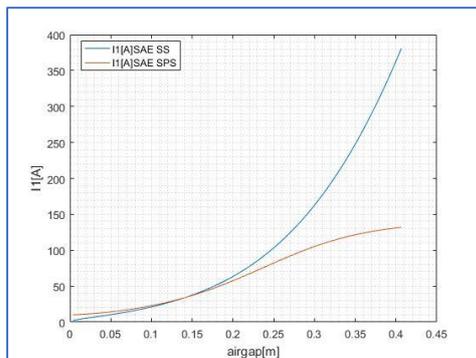


Fig. 24 Gráfica I1[A] distancia

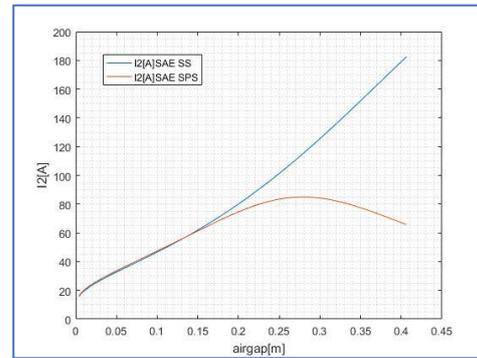


Fig. 23 Gráfica I2[A] distancia

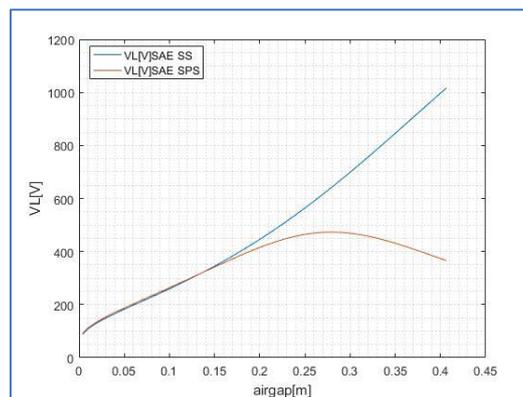


Fig. 25 Gráfica VL[V] distancia

En esta gráfica podemos observar como la corriente por el primario crece para la topología SS a medida que aumentamos la distancia entre bobinas hasta un 700% la intensidad nominal, lo cual puede ser perjudicial para los componentes sin embargo la en el circuito SPS la corriente no se dispara; se estabiliza para unos 120A un 200% la intensidad nominal.

En el secundario observamos prácticamente el mismo comportamiento si bien la intensidad no se dispara como en el primario para la compensación SS esto no es

impedimento para duplicar su intensidad nominal, la compensación SPS se estabiliza más rápido que en el primario y empieza a decrecer

En las tensiones a la salida del secundario ocurre lo mismo que con sus respectivas intensidades al aumentar la distancia entre bobinas

6.1.2. Variación de la frecuencia de trabajo

Variaremos la frecuencia partiendo de su valor nominal de esta manera observaremos como el sistema se sale de resonancia pudiendo entrar en la zona inestable.

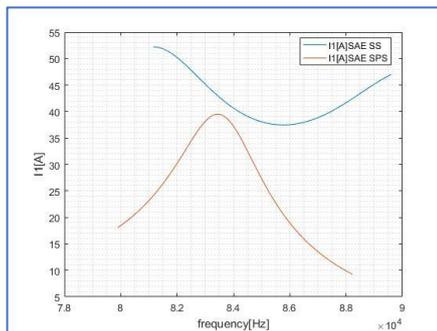


Fig. 27 Gráfica I[A] frecuencia

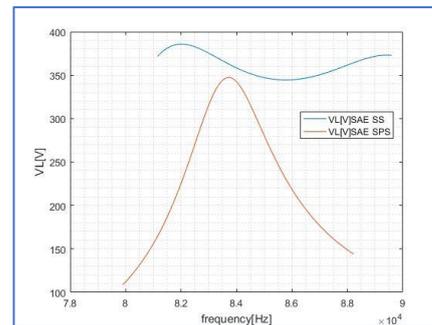


Fig. 26 Gráfica VL[V] frecuencia

Como podemos observar en ambas graficas la perdida de la frecuencia nominal afecta de forma notable a ala compensación SPS al caer drásticamente la tensión y la frecuencia no estamos poniendo en peligro al sistema, al contrario que lo que ocurre en la compensación SS.

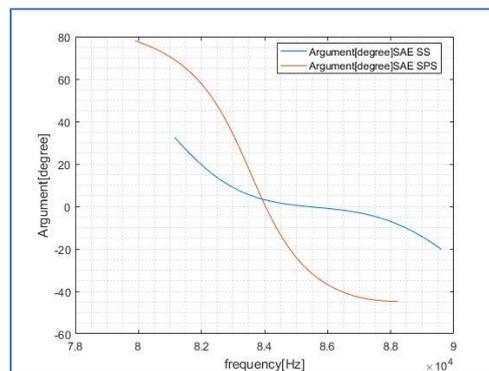


Fig. 28 Gráfica Argumento frecuencia

En esta grafica se representa el argumento de la impedancia total del sistema, vista desde la fuente con el cual podemos observar como la compensación SPS es mucho más sensible a la frecuencia que la SS.

6.1.3. Variación de la posición relativa entre las bobinas

Como dato de partida ambas bobinas se encuentran alienadas así que variaremos la distancia relativa entre ellas.

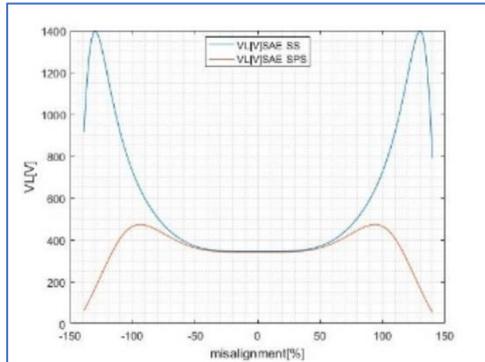


Fig. 29 Gráfica VL[V] desalineamiento

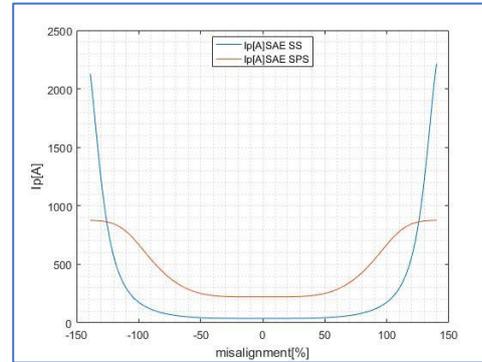


Fig. 30 Gráfica Ip[A] desalineamiento

Al igual que en el apartado sobre las topologías vemos como en el caso de la SS las intensidades se disparan sin embargo con en el caso de las SPS la intensidad decrece al salirnos del alineamiento si observamos la gráfica de I_p vemos como la intensidad del primario SPS queda acotada mientras que la del SS se dispara.

6.1.4. Variación de la carga

Para representar la variación de carga del receptor utilizaremos una carga equivalente conectada al secundario, la impedancia de esta carga varía progresivamente incrementándose, partiendo del cortocircuito hasta alcanzar el circuito abierto.

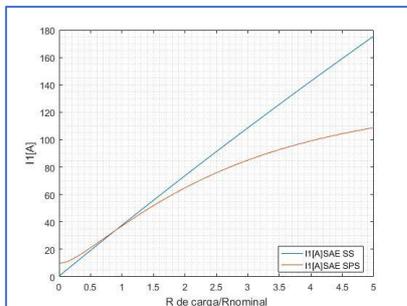


Fig. 33 Gráfica I1[A] Carga

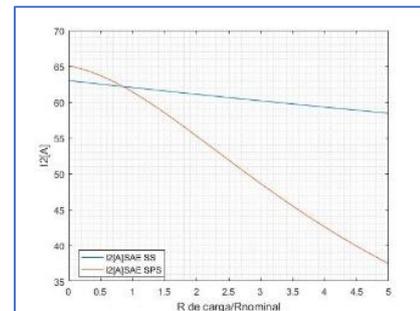


Fig. 31 Gráfica I2[A] Carga

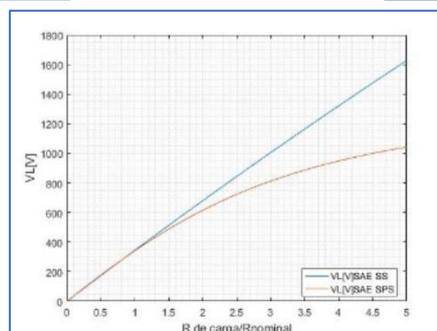


Fig. 32 Gráfica VL[V] Carga

En la compensación SS la intensidad crece peligrosamente cuando ya hemos alcanzado la carga nominal mientras que en la SPS la intensidad se encuentra acotada.

6.2. Conclusiones tras el análisis variación de parámetros

Tras el análisis de parámetros y el resumen de las soluciones obtenidas se ha llegado a las siguientes conclusiones.

- La topología SS tiene problemas con el desalineamiento los altos valores de intensidad y tensión alcanzados pueden provocar daños en los equipos sería preferible diseñar utilidades mecánicas físicas o mediante un control que limiten el desalineamiento sobre el que trabajan.
- La topología SPS pierde tensión en el secundario conforme aumenta el desalineamiento, esto limita la potencia perdida y la intensidad de primario que el circuito puede llegar a alcanzar en el sistema cuando perdemos el alineamiento.
- La compensación SPS es muy sensible a la pérdida de la frecuencia nominal para esta topología será necesario un férreo control de la frecuencia.
- Durante la carga la compensación SS no pierde valor de intensidad de primario conforme aumenta la carga es más aumenta dando lugar a un escenario peligroso donde la batería sufrirá una sobrecarga de intensidad en estos sistemas es necesario limitar la intensidad del primario durante las cargas.
- Durante las cargas en la compensación SPS la intensidad decrece conforme la tensión aumenta lo que es un comportamiento ideal para la carga de baterías.
- Al aumentar la distancia entre bobinas en la topología SS la intensidad y la tensión aumentan dando lugar a escenarios peligrosos
- Al disminuir la distancia entre bobinas para ambas topologías trabajamos en un rango seguro

Por todo ello podemos decir que la topología SPS presenta mejores características que la SS y será preferible su uso en aquellos sistemas en los que la distancia o el alineamiento entre bobinas pueda variar, aunque requerirá de un férreo control de frecuencia para evitar inestabilidades.

Se puede recomendar la topología SS en el caso de ambas bobinas tengan limitados sus grados de libertad mediante elementos mecánicos.

7. Posibles Mejoras y conclusiones

Una de las metas propuestas de este TFG fue la de crear una herramienta capaz de comparar entre distintos sistemas de compensación y generar un conjunto de datos con los que poder trabajar, alcanzada esta meta el usuario dispone de una herramienta intuitiva con la que ayudarse a desarrollar sistemas WPT.

Uno de los puntos que se quedaron fuera del proyecto fue la posibilidad de portar la herramienta fuera del entorno Matlab pues si bien se pueden ejecutar sus funciones principales si abrir el entorno, no es independiente, funciones como guardar en Workspace o la opción de abrir Simulink necesita de este.

Otras posibles mejoras podrían ser incluir un menú exportar interno en la aplicación donde visualizar en una tabla que datos se exportarían a Excel, un sistema de archivos que hiciera la aplicación independiente del Workspace para guardar conjuntos de datos y cargarlos en la próxima sesión, o una mayor integración con Simulink que permitiera visualizar dentro de la aplicación los transitorios.

Este TFG me ha aportado un conocimiento más profundo de los sistemas WPT y de algunas posibilidades que guarda la movilidad eléctrica, me ha descubierto una nueva herramienta de Matlab con la que desarrollar mis proyectos y de cara al futuro me motiva pensar, que haber desarrollado un programa que facilita en cierta medida el trabajo de investigación pueda influir, aunque sea levemente en que dicha tecnología prospere.

8. Bibliografía y referencias

- [1]. IDAE. <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/transporte>.
- [2]. Villa, Gazulla, Juan Luis. Sistemas de Transferencia de Energía para Vehículos Eléctricos mediante Acoplamiento Inductivo. *Thesis*. , Zaragoza, Spain Universidad de Zaragoza, Marzo de 2009.
- [3]. Página principal appdesigner.
<https://es.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>.
- [4]. Riba, Villagrasa , David. Desarrollo de una aplicación interactiva para el cálculo óptimo de sistemas de transferencia de potencia inalámbrica. *Trabajo Fin de Grado*. Zaragoza, Zaragoza, España : Universidad de Zaragoza, 11 de Septiembre de 2018.
- [5]. Endesa vehículo eléctrico.
<https://endesavehiculoelectrico.com/recarga/tipos-de-recarga/>.
- [7]. Lafuente, Salvador Guerrero. Adaptación de parkings existentes con puntos de recarga de vehículos eléctricos. 2011. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/14002>.