ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA** 



### Trabajo Fin de Grado

### Análisis, diseño y caracterización experimental del modelo eléctrico de un enlace inductivo para la transmisión inalámbrica de potencia

Analysis, design and experimental characterization of the electrical model of an inductive coupling link for wireless power transfer

Para acceder al Título de

*Graduado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación* 

Autor: Víctor José López Pérez

01-2022



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

### GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

#### CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

**Realizado por:** Víctor José López Pérez **Director del TFG:** Jose Ángel Miguel Díaz **Título:** "Análisis, diseño y caracterización experimental del modelo eléctrico de un enlace inductivo para la transmisión inalámbrica de potencia" **Title:** "Analysis, design and experimental characterization of the elect

**Title:** "Analysis, design and experimental characterization of the electrical model of an inductive coupling link for wireless power transfer"

#### Presentado a examen el día: 20 de enero del 2022

#### para acceder al Título de

### GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Sánchez Espeso, Pablo Pedro Secretario (Apellidos, Nombre): Miguel Díaz, Jose Ángel Vocal (Apellidos, Nombre): Arce Hernando, Jesús Antonio

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

V° B° del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº

# ÍNDICE

1	Intr	odu	cción13			
	1.1	Cla	sificación de enlaces inalámbricos14			
	1.2	Tra	nsferencia inalámbrica de potencia por acoplo inductivo16			
2	Enla	ace I	nductivo: Teoría Básica19			
	2.1	Mo	delo eléctrico del enlace inductivo20			
	2.2	Cálculo de la eficiencia del enlace				
	2.3	Cálculo de la potencia entregada al circuito <b>RX</b>				
	2.4 en el e	Infl enla	uencia del factor de calidad de las bobinas y del coeficiente de acoplo ce41			
	2.5	Infl	uencia de resonancias del <b>TX</b> y <b>RX</b> en el enlace48			
	2.6	Efe	cto de división de frecuencia58			
3	Pun	to ó	ptimo de operación66			
	3.1	Pur	nto de máxima eficiencia (MEP) en sistema de dos bobinas69			
	3.2 bobin	3.2 Punto de máxima transferencia de potencia (MPP) en sistema de dos pobinas				
	3.2. seri	l e.	MPP para circuito TX con fuente de tensión y capacidad resonante 75			
	3.2. seri	2 e.	MPP para circuito TX con fuente de intensidad y capacidad resonante 81			
	3.3	Sele	ección entre puntos de MEP y MPP 87			
4	Dise	eño	y caracterización experimental93			
	4.1	Dise	eño y fabricación de las bobinas94			
	4.1.1		Introducción teórica95			
	4.1.2	2	Especificaciones técnicas96			
	4.2	Sist	ema WPT con capacidad de $CRX = 10 \text{ pF}$ 101			
	4.2.	1	Fabricación y caracterización de inductancias101			
	4.2.2	2	Identificación de la frecuencia de resonancia102			
	4.2.3	3	Medida indirecta del coeficiente de acoplo109			

4.2.	2.4 Medida de la tensión entregada al circuito RX	111
4.2	2.5 Medida de la tensión entregada a la carga RL	117
4.2	<ul> <li>Medida de eficiencia del enlace y potencia entregada al cir</li> <li>121</li> </ul>	rcuito RX.
4.2	2.7 Conclusiones	130
4.3	Sistema WPT con capacidad de <i>CRX</i> = <b>470 pF</b>	131
4.3	B.1 Fabricación y caracterización de inductancias	131
4.3	3.2 Identificación de la frecuencia de resonancia	
4.3	3.3 Medida indirecta del factor de acoplo	137
4.3	8.4 Medida de la tensión entregada al circuito RX	
4.3	B.5 Medida de la tensión entregada a la carga <i>RL</i>	143
4.3	3.6 Medida de eficiencia del enlace y potencia entregada al cir 147	rcuito RX.
4.3	3.7 Inconvenientes de bobinas menores	153
4.4	Resultados comparación de los diferentes tamaños	
4.4.	I.1 Factor de calidad	156
4.4.	.2 Conclusiones	
4.4. 5 Cor	0.2 Conclusiones Conclusiones y líneas futuras	
4.4. 5 Cor 6 Bib	l.2 Conclusiones onclusiones y líneas futuras bliografía	
<ul> <li>4.4.</li> <li>5 Con</li> <li>6 Bib</li> <li>7 Apo</li> </ul>	4.2 Conclusiones onclusiones y líneas futuras bliografía béndices	
4.4. 5 Con 6 Bib 7 Apo 7.1	A.2 Conclusiones onclusiones y líneas futuras bliografía béndices Código "EFICIENCIA_VS_REALZMN_RL_01"	
4.4. 5 Con 6 Bib 7 Apo 7.1 7.2	A.2 Conclusiones onclusiones y líneas futuras bliografía béndices Código "EFICIENCIA_VS_REALZMN_RL_01" Código "EFICIENCIA_VS_K_Q_01"	
4.4. 5 Con 6 Bib 7 Apo 7.1 7.2 7.3	<ul> <li>L2 Conclusiones</li> <li>onclusiones y líneas futuras</li> <li>bliografía</li> <li>béndices</li> <li>Código "EFICIENCIA_VS_REALZMN_RL_01"</li> <li>Código "EFICIENCIA_VS_K_Q_01"</li> <li>Código "PMN_VS_K_Q_01"</li> </ul>	
4.4. 5 Con 6 Bib 7 Apo 7.1 7.2 7.3 7.4	<ul> <li>Conclusiones</li> <li>Onclusiones y líneas futuras</li> <li>bliografía</li> <li>béndices</li> <li>Código "EFICIENCIA_VS_REALZMN_RL_01"</li> <li>Código "EFICIENCIA_VS_K_Q_01"</li> <li>Código "PMN_VS_K_Q_01"</li> <li>Código "RESONANCIAS_TX_RX_01"</li> </ul>	
4.4. 5 Con 6 Bib 7 Apo 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5	<ul> <li>Conclusiones</li> <li>Onclusiones y líneas futuras</li> <li>bliografía</li> <li>péndices</li> <li>Código "EFICIENCIA_VS_REALZMN_RL_01"</li> <li>Código "EFICIENCIA_VS_K_Q_01"</li> <li>Código "PMN_VS_K_Q_01"</li> <li>Código "RESONANCIAS_TX_RX_01"</li> <li>Código "EFICIENCIA_PMN_VS_RL_01"</li> </ul>	
4.4. 5 Con 6 Bib 7 Apo 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 7.6	<ul> <li>8.2 Conclusiones</li></ul>	
4.4. 5 Con 6 Bib 7 Apo 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 7.6 7.7	<ul> <li>4.2 Conclusiones</li> <li>onclusiones y líneas futuras</li> <li>bliografía</li> <li>péndices</li> <li>Código "EFICIENCIA_VS_REALZMN_RL_01"</li> <li>Código "EFICIENCIA_VS_K_Q_01"</li> <li>Código "PMN_VS_K_Q_01"</li> <li>Código "RESONANCIAS_TX_RX_01"</li> <li>Código "EFICIENCIA_PMN_VS_RL_01"</li> <li>Código "FREQUENCY_SPLITTING_01"</li> <li>Código "EFICIENCIA_PMN_VS_ZMN_01"</li> </ul>	
4.4. 5 Con 6 Bib 7 Apo 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 7.6 7.7 7.8	<ul> <li>4.2 Conclusiones</li></ul>	

7.10	Código "FCN_GRAFICAS_2D_2021".	.298
7.11	Código "FCN_GRAFICAS_2D_DOBLEY_2021"	302
7.12	Código "FCN_GRAFICAS_SURF_2021"	309
7.13	Código "FCN_GRAFICAS_SURF_ZLOG_2021"	. 314
7.14	Código "FCN_GRAFICAS_XLOG_2021".	. 319
7.15	Código "FCN_SAVE_FIGURES"	.322

# ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Regiones de operación para antenas de longitud mucho menor que la longitud de onda de la señal transmitida; extraído de [1]14
Fig. 1.2. Relación de técnicas de transferencia inalámbrica de potencia; adaptado de [3]
Fig. 1.3. Diagrama de bloques de un sistema WPT por acoplo inductivo; adaptado de [1]16
Fig. 1.4. Diagrama de bloques simplificado para un sistema WPT por acoplo inductivo
Fig. 2.1. Modelo eléctrico de sistema WPT basado en acoplo inductivo19
Fig. 2.2. Esquema simplificado de sistema WPT por acoplo inductivo; adaptado de [1]21
Fig. 2.3. Modelo eléctrico inicial del sistema WPT por acoplo inductivo; adaptado de [1]
Fig. 2.4. Modelo eléctrico completo del sistema WPT por acoplo inductivo22
Fig. 2.5. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo, considerando resonancia en el circuito <b>RX</b> ; adaptado de [1]
Fig. 2.6. Eficiencias de las bobinas <i>TX</i> y <i>RX</i> , y del enlace, en función de la parte real de la impedancia de entrada del circuito <i>RX</i>
Fig. 2.7. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito <b>RX</b> resonante serie; adaptado de [1]29
Fig. 2.8. Eficiencias de las bobinas <i>TX</i> y <i>RX</i> , y del enlace, en función de la resistencia de carga <i>RL</i> para un circuito <i>RX</i> resonante serie31
Fig. 2.9. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito <b>RX</b> resonante paralelo; adaptado de [1]31
Fig. 2.10. Eficiencias de las bobinas <b>TX</b> y <b>RX</b> , y del enlace, en función de la resistencia de carga <b>RL</b> para un circuito <b>RX</b> resonante paralelo
Fig. 2.11. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito <i>TX</i> resonante serie y fuente de tensión <i>VS</i> ; adaptado de [2]
Fig. 2.12. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito <i>TX</i> resonante paralelo y fuente de tensión <i>VS</i> ; adaptado de [2]
Fig. 2.13. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito <i>TX</i> resonante serie y fuente de intensidad <i>IS</i> ; adaptado de [2]39

Fig. 2.14. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito <i>TX</i> resonante paralelo y fuente de intensidad <i>IS</i> ; adaptado de [2]40
Fig. 2.15. Influencia de los factores de calidad de las bobinas $QTX$ y $QRX$ ; y del factor de acoplo $kTX - RX$ sobre la eficiencia del enlace $\eta link$
Fig. 2.16. Influencia de los factores de calidad de las bobinas $QTX$ y $QRX$ ; y del factor de acoplo $kTX - RX$ sobre la eficiencia de la bobina transmisora $\eta LTX$
Fig. 2.17. Influencia de los factores de calidad de las bobinas $QTX$ y $QRX$ ; y del factor de acoplo $kTX - RX$ sobre la eficiencia de la bobina receptora $\eta LRX$
Fig. 2.18. Influencia de los factores de calidad de las bobinas $QTX$ y $QRX$ ; y del factor de acoplo $kTX - RX$ sobre la potencia entregada al circuito receptor $PMN$ ; para un circuito $TX$ resonante serie con fuente de intensidad $IS$
Fig. 2.19. Influencia de los factores de calidad de las bobinas $QTX$ y $QRX$ ; y del factor de acoplo $kTX - RX$ sobre la potencia entregada por la fuente $PTX$ ; para un circuito $TX$ resonante serie con fuente de intensidad $IS$
Fig. 2.20. Influencia de los factores de calidad de las bobinas $QTX$ y $QRX$ ; y del factor de acoplo $kTX - RX$ sobre la potencia entregada al circuito receptor <i>PMN</i> ; para un circuito <i>TX</i> resonante serie con fuente de tensión <i>VS</i> 47
Fig. 2.21. Influencia de los factores de calidad de las bobinas $QTX$ y $QRX$ ; y del factor de acoplo $kTX - RX$ sobre la potencia entregada por la fuente $PTX$ ; para un circuito $TX$ resonante serie con fuente de tensión $VS$
Fig. 2.22. Circuitos WPT simplificados para las diferentes condiciones de resonancia consideradas; (a) circuito <i>TX</i> no resonante y circuito <i>RX</i> no resonante; (b) circuito <i>TX</i> no resonante y circuito <i>RX</i> resonante; (c) circuito <i>TX</i> resonante y circuito <i>RX</i> resonante; (d) circuito <i>TX</i> resonante y circuito <i>RX</i> no resonante; adaptado de [1]
Fig. 2.23. Influencia de resonancias del <i>TX</i> y <i>RX</i> sobre la eficiencia del enlace <i>ηlink</i> . 
Fig. 2.24. Influencia de resonancias del <b>TX</b> y <b>RX</b> sobre la eficiencia <b>ηLTX</b> de la bobina <b>TX</b>
Fig. 2.25. Influencia de resonancias del <b>TX</b> y <b>RX</b> sobre la eficiencia <b>ηLRX</b> de la bobina <b>RX</b>
Fig. 2.26. Influencia de resonancias del <b>TX</b> y <b>RX</b> sobre la potencia <b>PTX</b> entregada por la fuente de tensión <b>VS</b>
Fig. 2.27. Influencia de resonancias del <i>TX</i> y <i>RX</i> sobre la potencia entregada al circuito receptor <i>PMN</i>
Fig. 2.28. Eficiencia del enlace <b><i>ηlink</i></b> frente al valor de la carga <b><i>RL</i></b> , para topologías de circuito <b><i>RX</i></b> resonantes serie y paralelo; adaptado de [1]

Fig. 2.29. Potencia entregada al circuito receptor <b>PMN</b> frente al valor de la carga <b>RL</b> , para topologías de circuito <b>RX</b> resonantes serie y paralelo; adaptado de [1]
Fig. 2.30. Ejemplo de sistema WPT resonante serie – serie, utilizado para el estudio del fenómeno de división de frecuencias; adaptado de [1]
Fig. 2.31. Efecto del fenómeno de división de frecuencias sobre la eficiencia del enlace <b>ηlink</b> , para el caso de sistemas WPT sobre acoplados61
Fig. 2.32. Efecto del fenómeno de división de frecuencias sobre la potencia <i>PMN</i> entregada al <i>RX</i> , para el caso de sistemas WPT sobre acoplados
Fig. 2.33. Transformación para modelo equivalente de tipo "T"; (a) modelo de dos puertos para dos bobinas acopladas; (b) equivalencia utilizando el modelo de tipo "T"; adaptado de [1]
Fig. 2.34. Ejemplo de sistema WPT resonante serie – serie, utilizado para el estudio del fenómeno de división de frecuencias, con modelo de tipo "T"; adaptado de [1]. 
Fig. 3.1. Esquema simplificado de sistema WPT con dos bobinas; utilizado para definir las eficiencias <b>ηlink</b> , <b>ηTX</b> y <b>ηRX</b> ; y adaptado de [1]66
Fig. 3.2. Modelo eléctrico de sistema WPT utilizado para introducir los conceptos de MEP y MPP; adaptado de [1]
Fig. 3.3. Eficiencia del enlace, <i>ηlink</i> , en función de las partes real e imaginaria de la impedancia <i>ZMN</i> de entrada del circuito <i>RX</i> 68
Fig. 3.4. Potencia entregada al circuito <b>RX</b> , <b>PMN</b> , en función de las partes real e imaginaria de la impedancia <b>ZMN</b> de entrada del circuito <b>RX</b>
Fig. 3.5. Sistema ejemplo para el estudio del valor óptimo de la impedancia <b>ZMN</b> que implique la obtención del Punto de Máxima Eficiencia o MEP; adaptado de [1]. 
Fig. 3.6. Eficiencias <i>ηLTX</i> , <i>ηLRX</i> y <i>ηlink</i> en función de la parte real de la impedancia <i>ZMN</i> de entrada del circuito <i>RX</i> 73
Fig. 3.7. Modelo simplificado de sistema WPT con circuito <b>TX</b> basado en una fuente de tensión y resonancia de tipo serie; adaptado de [1]74
Fig. 3.8. Modelo simplificado de sistema WPT con circuito <b>TX</b> basado en una fuente de intensidad y resonancia de tipo serie; adaptado de [1]74
Fig. 3.9. Modelo simplificado de sistema WPT con circuito <b>TX</b> basado en una fuente de tensión y resonancia de tipo serie; y su equivalente Thévenin; adaptado de [1]
Fig. 3.10. Metodología del cálculo de la tensión <i>VTH</i> y la impedancia <i>ZTH</i> del circuito equivalente Thévenin para un sistema WPT con circuito <i>TX</i> basado en fuente de tensión y resonancia tipo serie; adaptado de [1]

Fig. 3.11. Modelo simplificado de sistema WPT con circuito <b>TX</b> basado en una fuente de intensidad y resonancia de tipo serie; y su equivalente Thévenin; adaptado de [1]
Fig. 3.12. Metodología del cálculo de la tensión <i>VTH</i> y la impedancia <i>ZTH</i> del circuito equivalente Thévenin para un sistema WPT con circuito <i>TX</i> basado en fuente de intensidad y resonancia tipo serie; adaptado de [1]
Fig. 3.13. Sistema para la comparación de MEP y MPP, basado en circuito <i>TX</i> con fuente de tensión y capacidad resonante serie; adaptado de [1]
Fig. 3.14. Resultados de comparativa entre MEP y MPP para un circuito <i>TX</i> con fuente de tensión y capacidad resonante serie; eficiencia <i>ηlink</i> y potencia <i>PMN</i> frente a <i>Re</i> { <i>ZMN</i> }
Fig. 3.15. Resultados de comparativa entre MEP y MPP para un circuito <i>TX</i> con fuente de tensión y capacidad resonante serie; <i>ReZMN</i> frente al factor de acoplo <i>kTX – RX</i>
Fig. 3.16. Resultados de comparativa entre MEP y MPP para un circuito <i>TX</i> con fuente de tensión y capacidad resonante serie; eficiencia <i>ηlink</i> frente al factor de acoplo <i>kTX</i> – <i>RX</i> 92
Fig. 3.17. Resultados de comparativa entre MEP y MPP para un circuito <i>TX</i> con fuente de tensión y capacidad resonante serie; potencia <i>PMN</i> frente al factor de acoplo <i>kTX – RX</i> 92
Fig. 4.1. Diagrama de bloques simplificado para un sistema WPT por acoplo inductivo; reproducción de la Fig. 2.193
Fig. 4.2. Representación simplificada de solenoide; adaptado de [13]96
Fig. 4.3. Respuesta de variación de capacidad con la temperatura para un condensador con dieléctrico Y5V; extraído de [11]97
Fig. 4.4. Inductancia medida experimentalmente para bobinas circulares y cuadradas, en función del número de vueltas del bobinado99
Fig. 4.5. Voltaje recibido, medido experimentalmente para bobinas circulares y cuadradas, en función de la distancia entre las bobinas100
Fig. 4.6. Modelo eléctrico del sistema WPT demostrador; con dispositivos genéricos101
Fig. 4.7. Modelo eléctrico del sistema WPT demostrador para <i>CTX</i> = <b>10 pF</b> ; previo a la optimización de la carga <i>RL</i> 102
Fig. 4.8. Circuito eléctrico utilizado para identificar la frecuencia resonancia del condensador <i>CTX</i> con la bobina <i>LTX</i> 103
Fig. 4.9. Resultado de simulación en PSPICE de la tensión de entrada Vin del

Fig. 4.9. Resultado de simulación en PSPICE de la tensión de entrada *Vin* del circuito transmisor, con la frecuencia de resonancia identificada en 13.774 MHz.103

Fig. 4.10. Circuito equivalente del transmisor considerando la influencia de la sonda del osciloscopio; (a) bajas frecuencias; (b) altas frecuencias
Fig. 4.11. Representación gráfica de las medidas experimentales para la identificación de la frecuencia de resonancia del circuito transmisor106
Fig. 4.12. Circuito eléctrico utilizado para identificar la frecuencia resonancia del condensador <i>CRX</i> con la bobina <i>LRX</i>
Fig. 4.13. Resultado de simulación en PSPICE de la tensión de entrada <i>Vin</i> del circuito receptor, con la frecuencia de resonancia identificada en 13.90 MHz 107
Fig. 4.14. Representación gráfica de las medidas experimentales para la identificación de la frecuencia de resonancia del circuito receptor108
Fig. 4.15. Circuito utilizado para la medida indirecta del factor de acoplo entre bobinas
Fig. 4.16. Representación gráfica de las medidas experimentales para el cálculo del coeficiente de acoplo entre bobinas110
Fig. 4.17. Modelo del circuito eléctrico con <b><i>RL</i></b> óptima para alcanzar los puntos de MEP y MPP112
Fig. 4.18. Modelo del circuito eléctrico con <i>RL</i> óptima para alcanzar el punto de MEP113
Fig. 4.19. Gráfica <i>VRX</i> ideal frente a Frecuencia (azul, k=0.12; rojo, k=0.0658; verde, k=0.0429)
Fig. 4.20. Circuito real con sondas en VRX
Fig. 4.21. Gráfica real de Voltaje frente a Frecuencia variando el factor de acoplo 115
Fig. 4.22. Frecuencia frente a tensión suministrada al circuito receptor en el laboratorio (Azul->0.5cm, Naranja->1.5cm y gris->3cm)
Fig. 4.23. Circuito con sondas en <i>VOUT</i> 118
Fig. 4.24. Tensión del circuito de carga <i>VOUT</i> frente a frecuencia con los valores(k=0.12, azul; k=0.0658, rojo y k=0.028, verde)118
Fig. 4.25. Tensión en el circuito de carga ( <b>VOUT</b> ) en laboratorio a diferentes distancias
Fig. 4.26. Circuito ideal con resistencia de carga en puntos MEP y MPP 122
Fig. 4.27. Frecuencia frente a potencia sin sondas en el circuito receptor a diferentes impedancias de carga
Fig. 4.28. Frecuencia frente a eficiencia ideal del circuito a diferentes impedancias de carga

Fig. 4.29. Frecuencia frente a potencia en el circuito transmisor en MEP y MPP del laboratorio
Fig. 4.30. Frecuencia frente a potencia en el circuito receptor en MEP y MPP del laboratorio126
Fig. 4.31. Frecuencia frente a eficiencia en el circuito receptor en MEP y MPP del laboratorio
Fig. 4.32 Circuito real con sondas en <i>VRX</i> para medir <i>PMN</i> con diferentes resistencias de carga
Fig. 4.33 Gráfica de Frecuencia vs Potencia del circuito transmisor en circuito real con sondas en MEP y MPP128
Fig. 4.34. Gráfica de frecuencia frente a Potencia en el circuito receptor ( <b>PMN</b> )129
Fig. 4.35 Gráfica de la frecuencia vs eficiencia en circuito real con sondas en el MEP y el MPP
Fig. 4.36 Circuito de resonadores LC con bobinas pequeñas132
Fig. 4.38 Circuito de medida de la resonancia del circuito transmisor
Fig. 4.39 Gráfica de la resonancia del circuito transmisor de Frecuencia vs Voltaje de entrada
Fig. 4.40 Gráfica de resonancia del circuito transmisor en laboratorio 135
Fig. 4.41 Circuito para medida de la frecuencia de resonancia del circuito receptor 
Fig. 4.42 Gráfica que muestra la resonancia del circuito receptor en laboratorio . 136
Fig. 4.43 Circuito de medida del factor de acoplo con la bobina transmisora conectada a fuente y la receptora a la sonda137
Fig. 4.44 Gráfica de la relación entre acoplo y distancia entre bobinas138
Fig. 4.45 Circuito base con todos los componentes139
Fig. 4.46 Gráfica de Frecuencia frente a <i>VRX</i> con diferentes distancias (verde; k=0.025), (rojo; k=0.068) y (azul; k=0.1)140
Fig. 4.47 Circuito real con sondas en VRX140
Fig. 4.48 Gráfica de Frecuencia frente a <i>VRX</i> real con diferentes distancias (verde; k=0.025), (rojo; k=0.068) y (azul; k=0.1)141
Fig. 4.49 Gráfica de la tensión suministrada a la bobina receptora en laboratorio (VRX)
Fig. 4.50 Circuito real con sondas colocadas en <i>VOUT</i> 144

Fig. 4.51 Tensión en el circuito de carga variando el factor de acoplo con sonda (azul, k=0.1), (Rojo, k=0.068), (verde, k=0.025)144
Fig. 4.52 Tensión en el circuito de carga variando el factor de acoplo sin sondas (azul, k=0.1), (Rojo, k=0.068), (verde, k=0.025)145
Fig. 4.53 Tensión en circuito de carga ( <i>VOUT</i> ) en laboratorio a diferentes distancias entre bobinas (azul; d=0.5cm), (naranja; d=1cm) y (gris; d=2cm)147
Fig. 4.54 Circuito base sin sondas 148
Fig. 4.55 Frecuencia frente a potencia generada por la bobina receptora ( <b>PMN</b> ) con diferentes impedancias de carga148
Fig. 4.56 Frecuencia frente a la eficiencia con diferentes impedancias de carga 149
Fig. 4.57 Frecuencia frente a potencia de transmisión150
Fig. 4.58 Frecuencia frente a la potencia generada por la bobina receptora ( <b>PMN</b> ) 151
Fig. 4.59 Frecuencia frente a la eficiencia del dispositivo151
Fig. 4.60 Circuito real con sondas colocadas para medir VRX152
Fig. 4.61 Gráfica de la frecuencia frente a la potencia de transmisión en el circuito con sondas
Fig. 4.62 Gráfica de la frecuencia frente la potencia generada por la bobina receptora en el circuito
Fig. 4.63 Gráfica de la frecuencia frente a la eficiencia en el circuito con sondas en <b>VRX</b>
Fig. 4.64 Circuito real con sondas colocadas para medir <b>VRX</b> 154
Fig. 4.65 Gráfica de la frecuencia frente a la caída de tensión en el circuito de carga con diferentes impedancias de carga154
Fig. 4.66 Frecuencia frente a la potencia generada por la bobina receptora a diferentes impedancias de carga155
Fig. 4.67 Frecuencia frente a la eficiencia en el circuito con diferentes impedancias de carga
Fig. 4.68 Frecuencia frente a la potencia generada por la bobina receptora con las bobinas pequeñas
Fig. 4.69 Frecuencia frente a la potencia generada por la bobina receptora con las bobinas grandes

### 1 Introducción

En la última década se ha producido un incremento significativo, tanto del número de dispositivos móviles en el mercado, como de su variedad de aplicaciones y contextos de utilización. En general, estos dispositivos hacen uso de baterías recargables v/o reemplazables como fuentes de energía para su alimentación. En el caso de determinados dispositivos móviles para aplicaciones médicas, como el caso de los Dispositivos Médicos Implantables Activos (Active Implantable Medical Devices, AIMDs) el uso de baterías reemplazables es inviable debido a la necesidad de acceder al implante; lo que implica un riesgo elevado para el paciente y unos costes económicos excesivos. En algunos casos, los propios dispositivos implantados pueden recoger energía del entorno para recargar sus baterías (Energy Harvesting), en forma de radiación electromagnética, movimiento, calor, etc.; aunque la cantidad de potencia obtenida es muy limitada y puede llegar a ser insuficiente. Es en este tipo de situaciones en las que el uso de métodos de Transferencia Inalámbrica de Potencia (Wireless Power Transfer, PWT) supone una solución adecuada para recargar las baterías de los dispositivos implantados, o incluso llegar a no depender de ellas en absoluto [1].

Por definición, la WPT consiste en la transmisión de energía eléctrica sin necesidad de un medio o conductor eléctrico que conecte físicamente la fuente de alimentación con la carga de consumo [2]. Una de sus aplicaciones más extendidas reside en la Identificación por Radiofrecuencia (*Radio Frequency Identification*, RFID); siendo particularmente interesante la utilización de etiquetas (*tags*) RFID pasivas que prescinden del uso de baterías, y presentan mayor robustez y periodo de vida útil. En la actualidad, tanto la eficiencia como los niveles de potencia entregados mediante tecnologías WPT se han incrementado drásticamente; permitiendo que estas técnicas sean utilizadas en dispositivos que previamente dependían de cableado para su alimentación; tales como teléfonos móviles, automóviles eléctricos, electrodomésticos, etc. [1].

El tipo de enlace WPT y su rendimiento queda determinado a partir de una serie de parámetros específicos; incluyendo la distancia entre el transmisor  $(T_x)$  y el receptor  $(T_x)$ ,  $D_{T_X-R_X}$ ; la orientación relativa entre ambos; el área de la bobina transmisora,  $A_{T_X}$ ; el área de la bobina receptora  $A_{R_X}$ ; la frecuencia de la señal portadora de potencia,  $f_0$ ; la potencia entregada a la carga (Power Delivered to the Load, PDL),  $P_L$ ; y la eficiencia de transferencia de potencia (Power Transfer Efficiency, PTE),  $\eta_{TOT}$ .

Existen, generalmente, muchos compromisos a la hora de maximizar estos parámetros; y la selección de aquellos a optimizar depende principalmente de la aplicación. A modo de ejemplo, para el caso de vehículos eléctricos, el área de las bobinas  $T_x$  y  $R_x$  no supone una limitación de diseño importante; mientras que el objetivo primordial de la aplicación reside en conseguir una alta PTE con suficiente PDL, de forma que se minimice la disipación de potencia en forma de

calor y se reduzca el peso de la instalación en la bobina receptora. Por el contrario, en los AIMDs, el tamaño de la bobina  $R_x$  implantada es un factor crítico; los niveles de potencia transmitida y PDL son mucho menores que en el caso de los vehículos eléctricos; y la disipación de potencia en forma de calor es mucho más restrictiva debido su potencial daño sobre el tejido circundante [1].

### 1.1 Clasificación de enlaces inalámbricos

Los sistemas WPT pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios; aunque el método más habitual consiste en distinguir entre enlaces de campo cercano y de campo lejano. Esta clasificación se basa en su principio físico de operación; ya que las transmisiones de campo lejano implican el transporte de energía por la señal electromagnética; mientras que para enlaces de campo cercano la transferencia de energía se realiza mediante acoplo magnético o eléctrico. En el caso particular de antenas de longitud mucho menor que la longitud de onda de la señal trasmitida ( $\lambda = c/f_0$ ), las zonas de operación correspondientes a campo cercano y campo lejano se muestran en la Fig. 1.1. La región ubicada entre las zonas correspondientes a los campos cercano y lejano, se denomina zona de transición o campo medio; y presenta características comunes a ambos. Por su parte, la zona de campo cercano puede subdividirse en enlaces de tipo inductivo o de acoplo magnético; y enlaces de tipo capacitivo o de acoplo eléctrico; atendiendo a cuál de los campos es el dominante [1].



Fig. 1.1. Regiones de operación para antenas de longitud mucho menor que la longitud de onda de la señal transmitida; extraído de [1].

Para aplicaciones en las que es necesario transmitir potencia a grandes distancias, en el rango de los metros, la opción de emisión en campo lejano es preferible; principalmente debido a la capacidad de apuntamiento del haz en la dirección del receptor. Este tipo de enlace WPT, basado en haz, presenta la capacidad de transmitir niveles de potencia del orden de los kilovatios a distancias de decenas de metros y con una eficiencia superior al 50 %; aunque con el inconveniente de ser sensibles a interferencias de otras señales de radio. Por el contrario, para la transmisión de potencia a distancias cortas, inferiores a las decenas de centímetros, la opción de campo cercano permite conseguir mayores eficiencias en la transmisión de potencia, sin la necesidad de línea de vista entre el transmisor y el receptor [1].

Dentro de la operación en campo cercano, la opción de enlaces capacitivos por acoplo eléctrico ha sido generalmente utilizada para transmisiones sobre distancias cortas, del orden de los milímetros; además de haber probado su capacidad de penetración en obstáculos metálicos. Sin embargo, los enlaces inductivos basados en acoplo magnético son más comúnmente utilizados, ya que permiten fácilmente alcanzar transferencias de potencia a distancias del orden de los centímetros; además de ser prácticamente inocuos para el cuerpo humano al estar basados en campos variables de tipo magnético en lugar de eléctrico. Esta última característica hace que este tipo de acoplo inductivo suponga la opción preferente a la hora de implementar un enlace WPT para sistemas biomédicos [1] [3]. Adicionalmente, la Fig. 1.2 y la Tabla 1-1 incluyen una relación de las técnicas de telemetría biomédica más habituales, junto con sus características más relevantes. En ellas se puede apreciar como las técnicas basadas en acoplo inductivo son preferibles para la transmisión de potencia a AIMDs de bajo consumo [1] [3].



Fig. 1.2. Relación de técnicas de transferencia inalámbrica de potencia; adaptado de [3].

Técnica	Frecuencia	Directividad	Alcance	Penetración	Eficiencia
Acoplo inductivo	Baja (Hz – MHz)	Baja	Corto	Fuerte	Alta
Acoplo capacitivo	Baja (Hz – MHz)	Baja	Corto	Fuerte	Alta
Propagación electromagnética	Media (MHz – GHz)	Media	Medio	Media	Media
Microondas	Alta (GHz – THz)	Alta	Alto	Baja	Baja
Fotoelectricidad	Alta (> THz)	Alta	Alto	Baja	Baja

Tabla 1-1. Comparativa de técnicas de transmisión inalámbrica de potencia para uso biomédico; adaptado de [3].

# 1.2 Transferencia inalámbrica de potencia por acoplo inductivo

El diagrama de bloques general de un sistema WPT basado en acoplo inductivo se muestra en la Fig. 1.3. El funcionamiento básico de este sistema se basa en un circuito transmisor ( $T_x$ ) que genera un corriente alterna a través de la bobina transmisora ( $L_{T_x}$ ); la cual induce un voltaje variable en la bobina receptora ( $L_{R_x}$ ). El circuito receptor es el encargado de adaptar el voltaje inducido para alimentar la carga del sistema ( $R_L$ ). La eficiencia total de transferencia de potencia ( $\eta_{TOT}$ ), se determina a partir de las eficiencias individuales del enlace ( $\eta_{link}$ ), del circuito transmisor ( $\eta_{T_x}$ ), y del circuito receptor ( $\eta_{R_x}$ ).



Fig. 1.3. Diagrama de bloques de un sistema WPT por acoplo inductivo; adaptado de [1].

Los bloques principales que constituyen el modelo general del sistema WPT, como se aprecia en la Fig. 1.3, incluyen convertidores DC-DC, inversores, redes de adaptación de impedancias, rectificadores y el propio enlace inalámbrico. A continuación, se incluye una breve descripción de cada uno de ellos, incluyendo su funcionalidad en el sistema y sus características principales.

• Convertidor DC-DC del transmisor. Todo sistema WPT incluye una fuente de energía en el transmisor; y dependiendo de la aplicación, esta puede ser tanto de tipo portable, en forma de baterías, como fijo, mediante conexión a la toma de red. Sin embargo, la tensión de salida de esta fuente puede no ser la adecuada para alimentar el sistema durante sus distintos estados de operación. Para solucionar este problema, los convertidores DC-DC se utilizan tras la fuente de energía, con la función de controlar la potencia transmitida  $P_{T_X}$ . En su implementación más sencilla, el bloque DC-DC opera en lazo abierto (*openloop*), de forma que proporciona siempre la misma potencia  $P_{T_X}$ ; la cual coincide con la potencia requerida por el receptor en su "peor caso" de operación. Esta implementación es claramente ineficiente, dado que presenta una transmisión de potencia fija incluso en situaciones en las que el receptor requiera de menor entrega de potencia; llegando incluso a poder dañarlo cuando el  $T_X$  y  $R_X$  se

encuentran a distancias cortas. Por tanto, una mejora de los convertidores DC-DC supone su operación el lazo cerrado (*closed-loop*); donde la potencia transmitida  $P_{T_X}$  se ajusta en función de las necesidades instantáneas del receptor; lo que repercute en una mayor eficiencia y menor disipación de potencia en forma de calor en el  $T_X$  y el  $R_X$  [1].

- Inversor. Dado que la señales de continua no afectan al enlace inductivo; tal y como expone la Ley de Faraday [1] [2], es necesario el uso de un bloque inversor para generar la señal portadora de potencia de alterna, así como para seleccionar la frecuencia de oscilación de la misma. En principio, los amplificadores de potencia de clases A y B pueden ser utilizados para alimentar la bobina *T<sub>x</sub>*, pero ambos presentan eficiencias reducidas. En este sentido, las topologías de amplificadores de clase C, D y E, con mayor eficiencia, son las más habituales para la implementación de bloques inversores. La eficiencia del este bloque y su potencia de salida dependen fuertemente de la impedancia de carga; por lo que se hace uso de una red de adaptación en el transmisor para ajustar la carga vista por el bloque inversor [1].
- Red de adaptación de impedancias del transmisor. La red de adaptación del  $T_x$  se encarga de ajustar la carga vista por el bloque inversor previo, así como de asegurar el cumplimiento de la resonancia en el circuito  $T_x$ ; de forma que se cancele la reactancia de la bobina  $L_{T_x}$ . Sin embargo, como se explica detalladamente en la sección 2.5, en algunos casos puede ser interesante evitar dicha resonancia, de forma que se limite la intensidad proporcionada por el bloque inversor y la potencia entregada al circuito  $R_x$  [1].
- Enlace inductivo. A grandes rasgos, el enlace inductivo opera como un transformador, de forma que la potencia es transferida entre dos bobinas a través de un campo magnético con frecuencia variable. Dada la importancia de este bloque para el enlace WPT, y especialmente su modelado eléctrico, los capítulos 2 y 3 de este trabajo se centran en su estudio analítico pormenorizado. Para el caso particular de los AIMDs, donde se requiere del uso de bobinas de pequeño tamaño y la transmisión de potencia para distancias relativamente elevadas, es la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  la que limita la eficiencia de transferencia de potencia total  $\eta_{TOT}$  [1]. Con la finalidad de solventar este inconveniente, en este trabajo se analizan la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  y la potencia  $P_{R_X}$  entregada al circuito  $R_X$ , y especialmente su optimización a través de la identificación de los Puntos Óptimos de Operación (*Optimum Operation Point*, OOP); cuyo estudio está incluido en el capítulo 3.
- Red de adaptación de impedancias del receptor. La red de adaptación del  $R_x$  es la encargada de adaptar la carga de la bobina  $L_{R_x}$  al resto del enlace inductivo [1]. Habitualmente, también es utilizada para asegurar la resonancia del circuito  $R_x$ , de forma que sea posible cancelar la reactancia de la bobina  $L_{R_x}$ . Además, como se detalla en el capítulo 3, la parte real de su impedancia de entrada ( $Z_{MN}$ ) puede ajustarse para maximizar la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ .

- Rectificador. El bloque rectificador es generalmente requerido tras el enlace inductivo; principalmente debido a que el circuito de carga necesita de una tensión continua para su alimentación. Su arquitectura de diseño, incluyendo puentes de diodos, multiplicadores de voltaje pasivos, diodos activos, etc., depende fuertemente de la frecuencia de operación del sistema y del nivel de potencia requerido en la carga. En cualquier caso, independientemente de la arquitectura utilizada, los objetivos básicos del bloque son: conseguir una rectificación lo más eficiente posible de la señal de entrada, minimizar la disipación de potencia y, en algunos casos, regular el voltaje a su salida [1].
- Convertidor DC-DC del receptor. El bloque convertidor DC-DC puede situarse tras el rectificador, con la finalidad de regular el voltaje de salida y adecuarlo a las necesidades del circuito de carga. Las arquitecturas más utilizadas para estos convertidores DC-DC incluyen los reguladores de baja caída de tensión (*Low-Dropout Regulators*), los convertidores *buck* y *buck-boost*, y los convertidores con capacidades conmutadas (*Switched-Capacitors Converters*). Como en el resto de bloques del sistema, una alta eficiencia es clave para los convertidores DC-DC; de forma que se aproveche la totalidad de la potencia recibida y se eviten problemas de disipación de potencia. Otros parámetros de rendimiento importantes de estos convertidores son el factor de regulación de línea (*Line Regulation Factor*), el factor de regulación de carga (*Load Regulation Factor*) y la razón de rechazo a la alimentación (*Power Supply Rejection Ratio*, PSRR) [1] [4].

Para el caso particular tratado en este trabajo, el sistema WPT se ha reducido a los bloques indicados en la Fig. 1.4. Esto es debido a que el objetivo principal reside en el análisis, modelado y caracterización experimental del enlace WPT por acoplo inductivo; por lo que aspectos de diseño de bloques como los convertidores DC-DC, el inversor, y el rectificador quedan fuera del interés de este trabajo; aunque en la práctica estos bloques presentan influencia sobre aspectos de rendimiento del enlace como la eficiencia  $\eta_{link}$  o la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_x$  [1].



Fig. 1.4. Diagrama de bloques simplificado para un sistema WPT por acoplo inductivo.

### 2 Enlace Inductivo: Teoría Básica

En el año 1831, el científico inglés Michael Faraday (1791 - 1867) realizó una extensa serie de experimentos enfocados en la generación de electricidad a través del magnetismo. Los resultados obtenidos demostraron que una corriente eléctrica variable fluyendo a través de un solenoide era capaz de inducir una corriente en un segundo solenoide situado alrededor del primero. El estudio de este fenómeno dio lugar a la Ley de Inducción de Faraday; la cual estipula que una fuerza electromagnética puede ser inducida en un conductor mediante la exposición de este a un flujo magnético variable en el tiempo; sentando las bases de los actuales sistemas de Transferencia Inalámbrica de Potencia (*Wireless Power Transfer*, WPT) [5] [1].



Fig. 2.1. Modelo eléctrico de sistema WPT basado en acoplo inductivo.

De forma análoga, los cambios en un campo magnético, como resultado de la variación de la corriente fluyendo a través de un conductor, pueden afectar a ese mismo conductor y provocar una variación en la diferencia de potencial entre sus extremos. Este efecto es más significativo cuando el conductor tiene forma de bucle; y es modelado en Teoría de Circuitos a través del parámetro de autoinductancia (L). Por tanto, asumiendo la existencia de una corriente sinusoidal i con frecuencia f, fluyendo a través de un conductor en forma de bucle (bobina), la amplitud del voltaje autoinducido puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$v = j2\pi f L \tag{2.1}$$

Adicionalmente, cuando se expone un segundo conductor al campo magnético generado por el primero, el voltaje inducido se puede modelar mediante el parámetro de inductancia mutua (M). Asumiendo, de nuevo, una corriente sinusoidal *i* con frecuencia *f*, que circula por el primer conductor, es posible calcular la amplitud del voltaje inducido en el segundo conductor como:

$$v = j2\pi f M \tag{2.2}$$

De esta forma, y siguiendo el principio de superposición, el voltaje total en cada una de las bobinas presentes en un sistema acoplado será el resultado de la suma del voltaje autoinducido por la propia bobina y el voltaje inducido por las bobinas próximas. Esta propiedad, tal y como se muestra en la Fig. 2.1, posibilita el modelado del fenómeno de acoplo inductivo mediante un sistema eléctrico sencillo basado en componentes discretos; lo cual simplifica el análisis y diseño de este tipo de sistemas de transferencia inalámbrica de potencia.

Alternativamente, con el objetivo de normalizar la intensidad de acoplo mutuo entre bobinas, es posible definir el parámetro de factor de acoplo (k). Este coeficiente, con valores comprendidos entre k = [0, 1], representa el grado de acoplo entre las dos bobinas; y depende de la geometría de las bobinas, de su distancia de separación, y del alineamiento y orientación entre ellas. Así pues, un factor de acoplo de valor k = 1 indicaría que la bobina transmisora produce un voltaje inducido en la bobina receptora de idéntico valor a su voltaje autoinducido. Por el contrario, un factor de acoplo k = 0, supondría que el campo magnético generado por la bobina transmisora no produce efecto alguno sobre la bobina receptora.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{2.3}$$

La expresión mostrada en (2.3) indica como el coeficiente de acoplo k es proporcional al factor de inductancia mutua M, normalizado mediante los valores de autoinductancia de las bobinas acopladas  $L_1$  y  $L_2$ . A modo de ejemplo, un par de inductancias idénticas y totalmente próximas presentará un coeficiente de acoplo de  $k \approx 1$ ; lo que implica que, físicamente, todas las líneas de flujo magnético generadas por una de las inductancias atraviesan el bobinado de la inductancia restante. Así pues, la inductancia mutua resultante será igual a la media geométrica de las autoinductancias de cada bobina, de forma que  $L_1 = L_2 \approx M$ .

En los sistemas WPT, como se detalla en la sección 2.2, la maximización de la eficiencia de transferencia de potencia requiere del coeficiente de acoplo más alto posible, idealmente  $k \approx 1$ . Sin embargo, en la práctica, la mayor parte de los sistemas de acoplo inductivo presentan valores de coeficiente de acoplo inferiores a k = 0.4; lo que limita tanto la eficiencia del enlace como la potencia total entregada [6].

### 2.1 Modelo eléctrico del enlace inductivo

La implementación más sencilla de un sistema WPT basado en enlace inductivo, tal y como se muestra en la Fig. 2.2, consiste idealmente en un par de bobinas acopladas. Sin embargo, cada bobina del enlace presenta, además de su valor deseado de autoinductancia, una serie de características eléctricas no deseadas que pueden ser modeladas mediante resistencias y capacidades parásitas intrínsecas. Para simplificar el análisis del sistema WPT, en adelante no se considerará el efecto de las capacidades parásitas de las bobinas; siendo estas modeladas únicamente a través de sus valores de autoinductancia  $(L_{T_X}, L_{R_X})$ , junto con sus resistencias parásitas serie equivalentes  $(R_{T_X}, R_{R_X})$ . Adicionalmente, el efecto del acoplo inductivo estará representado por la inductancia mutua entre las bobinas transmisora y receptora, indicado en el modelo eléctrico como  $M_{T_X-R_X}$ .



Fig. 2.2. Esquema simplificado de sistema WPT por acoplo inductivo; adaptado de [1].

Así pues, el modelo eléctrico equivalente del sistema WPT presenta el aspecto mostrado en la Fig. 2.3. Además de los dispositivos que modelan el funcionamiento de las bobinas acopladas, el modelo eléctrico incluye los bloques correspondientes a los circuitos transmisor  $(T_x)$  y receptor  $(R_x)$ . Estos bloques representan, de forma genérica, a los circuitos conectados antes de la bobina transmisora y después de la bobina receptora, respectivamente. Más concretamente, el bloque correspondiente al circuito receptor está definido por su impedancia de entrada equivalente  $(Z_{MN})$ , de forma que pueda estudiarse la influencia de esta sobre el rendimiento del enlace. Adicionalmente, los parámetros de potencia transmitida al circuito receptor  $(P_{MN})$  y eficiencia del enlace  $(\eta_{link})$  han sido también incluidos en la Fig. 2.3, y serán utilizados para cuantificar en rendimiento del sistema WPT.





Finalmente, para completar el modelo eléctrico del sistema WPT, es necesario incluir el efecto del voltaje inducido entre las bobinas acopladas. Como se observa en la Fig. 2.4, este fenómeno es modelado a través de dos fuentes de tensión alterna; definidas como:

$$v_{T_X - R_X} = i_{T_X} j w M_{T_X - R_X} \tag{2.4}$$

$$v_{R_X - T_X} = i_{R_X} j w M_{T_X - R_X}$$
(2.5)

Estas fuentes,  $v_{T_X-R_X}$  y  $v_{R_X-T_X}$ , representan el voltaje inducido por la bobina  $T_X$  en la bobina  $R_X$ , y el voltaje inducido por la bobina  $R_X$  en la bobina  $T_X$ , respectivamente; y son proporcionales a las corrientes alternas circulando a través de cada bobina  $(i_{T_X}, i_{R_X})$  y al factor de inductancia mutua  $M_{T_X-R_X}$ .



Fig. 2.4. Modelo eléctrico completo del sistema WPT por acoplo inductivo.

De esta forma, el modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo se da por finalizado (Fig. 2.4); siendo este modelo el utilizado a lo largo del presente trabajo para analizar el rendimiento del sistema bajo las distintas condiciones de operación consideradas.

### 2.2 Cálculo de la eficiencia del enlace

En primer lugar, es posible considerar que las técnicas WPT basadas en acoplo inductivo son de tipo no radiante, ya que prácticamente la totalidad de la energía queda confinada en el espacio entre las bobinas. Para puntos del espacio alejados de las bobinas, la atenuación energética es proporcional al cubo de la distancia o incluso mayor [7]. Bajo estas condiciones, es posible asumir la no existencia de elementos radiantes en el circuito, por lo que las pérdidas del enlace serán debidas únicamente a la potencia disipada en las resistencias parásitas de las bobinas acopladas,  $R_{T_X}$  y  $R_{R_X}$  [1]. Por lo tanto, como se muestra en la Fig. 2.3, la potencia proporcionada por el circuito  $T_X$ ,  $P_{T_X}$ , es la suma de la potencia entregada al circuito  $R_X$ ,  $P_{MN}$ , más la potencia disipada en las resistencias de pérdidas de las bobinas. Por definición, la eficiencia de transferencia de potencia (*Power Transfer Efficiency*, PTE) del enlace,  $\eta_{link}$ , se define como la relación entre la potencia entregada a la carga y la potencia proporcionada por el circuito  $T_x$ , de forma que:

$$\eta_{link} = \frac{P_{MN}}{P_{T_X}} \tag{2.6}$$

#### Eficiencia de la bobina receptora

Para calcular la eficiencia del enlace, es necesario obtener previamente los valores de eficiencia de cada una de las bobinas  $(\eta_{L_{T_X}}, \eta_{L_{R_X}})$ . En primer lugar, la eficiencia de la bobina  $R_X$  se define como la relación entre la potencia entregada a la impedancia de entrada  $Z_{MN}$  del circuito  $R_X$ , y la potencia total disipada en la resistencia de pérdidas de la bobina  $R_X$  y en el circuito  $R_X$ ; siguiendo la expresión:

$$\eta_{L_{R_X}} = \frac{Re\{Z_{MN}\}\frac{i_{R_X}^2}{2}}{Re\{Z_{MN}\}\frac{i_{R_X}^2}{2} + R_{R_X}\frac{i_{R_X}^2}{2}} = \frac{\frac{1}{R_{R_X}}}{\frac{1}{R_{R_X}} + \frac{1}{Re\{Z_{MN}\}}} \frac{R_{R_X}Re\{Z_{MN}\}}{R_{R_X}Re\{Z_{MN}\}}$$
(2.7)

Donde la variable  $i_{R_X}$  representa el valor de pico de la intensidad alterna circulando por el circuito  $R_X$ , y  $Re\{Z_{MN}\}$  corresponde con la parte real de la impedancia de entrada del circuito  $R_X$ .

Realizando la operación de multiplicar el numerador y denominador de la expresión (2.7) por el término  $wL_{R_X}$ , es posible expresar la eficiencia de la bobina  $R_X$  en función de los factores de calidad de la bobina  $(Q_{R_X})$  y de la carga  $(Q_L)$ .

$$\eta_{L_{R_X}} = \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L}$$
(2.8)

Pudiendo definirse los factores de calidad de la bobina  $R_X$  y de la carga  $R_L$  según las expresiones:

$$Q_{R_X} = \frac{wL_{R_X}}{R_{R_X}} \tag{2.9}$$

$$Q_L = \frac{wL_{R_X}}{Re\{Z_{MN}\}} \tag{2.10}$$

#### Eficiencia de la bobina transmisora

En segundo lugar, la eficiencia de la bobina  $T_x$  puede definirse a través de la relación entre la potencia transferida a la bobina  $R_x$  y la suma de la potencia disipada en la resistencia de pérdidas de la bobina  $T_x$  y la potencia entregada a la bobina  $R_x$ ; siguiendo la expresión:

$$\eta_{L_{T_X}} = \frac{Re\left\{Z_{R_X - T_{X_{ref}}}\right\} \frac{i_{T_x}^2}{2}}{Re\left\{Z_{R_X - T_{X_{ref}}}\right\} \frac{i_{T_X}^2}{2} + R_{T_x} \frac{i_{T_x}^2}{2}}$$
(2.11)

Siendo  $i_{T_X}$  el valor de pico de la intensidad alterna circulando por la bobina  $T_X$ , y  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$  la impedancia reflejada por la bobina  $R_X$  en el circuito  $T_X$ . Por tanto, puede apreciarse la necesidad de calcular la expresión de la impedancia  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , ya que la potencia disipada en ella modela la eléctricamente la magnitud de la potencia entregada a la bobina  $R_X$  a través del acoplo inductivo [1].

Como primera aproximación al cálculo de  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , se estimará el valor de la impedancia vista por el circuito  $T_X$ , definida como  $Z_{T_X}$ . Esta impedancia incluirá la autoinductancia de la bobina  $T_X$ , su resistencia de pérdidas  $R_{T_X}$  y el efecto de la impedancia reflejada por la bobina  $R_X$ . Un análisis de mallas del circuito mostrado en la Fig. 2.4 permite obtener las expresiones necesarias para la obtención de  $Z_{T_X}$ .

Por un lado, la tensión vista desde el circuito  $T_x$ , definida en la Fig. 2.4 mediante la variable  $V_{L_{T_x}}$ , puede expresarse en función de la tensión inducida por la bobina  $R_x$  en la bobina  $T_x$ ; según la ecuación:

$$V_{L_{T_X}} = (R_{T_X} + jwL_{T_X})i_{T_X} + jwM_{T_X - R_X}i_{R_X}$$
(2.12)

Por otro lado, el estudio del circuito receptor permite obtener la expresión del valor de la intensidad  $i_{R_X}$  circulando por la bobina  $R_X$ , a través de la relación siguiente:

$$i_{R_X} = \frac{-i_{T_X} j w M_{T_X - R_X}}{R_{R_X} + j w L_{R_X} + Z_{MN}}$$
(2.13)

Por tanto, haciendo uso de las expresiones (2.12) y (2.13), es posible calcular el valor de la impedancia  $Z_{T_X}$ .

$$Z_{T_X} = \frac{V_{L_{T_X}}}{i_{T_X}} = R_{T_X} + jwL_{T_X} + \underbrace{\frac{w^2 M_{T_X - R_X}^2}{R_{R_X} + jwL_{R_X} + Z_{MN}}}_{Z_{R_X} - T_{X_{ref}}}$$
(2.14)

Observando la definición de  $Z_{T_X}$  en la ecuación (2.14), es sencillo identificar la contribución de impedancia reflejada por la bobina  $R_X$ .

$$Z_{R_X - T_{X_{ref}}} = \frac{w^2 M_{T_X - R_X}^2}{R_{R_X} + jw L_{R_X} + Z_{MN}}$$
(2.15)

Considerando la expresión (2.11), correspondiente a la eficiencia de la bobina  $T_X$ , es posible constatar que la máxima eficiencia  $\eta_{LT_X}$  se consigue cuando, a su vez, la parte real de la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$  es máxima. Realizando el cálculo del valor real de la impedancia  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , puede apreciarse que su máximo se alcanza cuando el subcircuito receptor presenta resonancia, de forma que la parte imaginaria de  $j_W L_{R_X} + Z_{MN}$  es nula.

$$Re\left\{Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}}\right\} = \\ = Re\left\{\frac{w^{2}M_{T_{X}-R_{X}}^{2}}{R_{R_{X}}+jwL_{R_{X}}+Z_{MN}}\right\} \\ = Re\left\{\frac{w^{2}M_{T_{X}-R_{X}}^{2}}{R_{R_{X}}+jwL_{R_{X}}+Re\{Z_{MN}\}+jIm\{Z_{MN}\}}\right\}$$
(2.16)  
$$= Re\left\{\frac{w^{2}M_{T_{X}-R_{X}}^{2}\left[R_{R_{X}}+Re\{Z_{MN}\}-j(wL_{R_{X}}+Im\{Z_{MN}\})\right]\right\} \\ \left(R_{R_{X}}+Re\{Z_{MN}\}\right)^{2}+(wL_{R_{X}}+Im\{Z_{MN}\})^{2}}\right\} \\ = \frac{w^{2}M_{T_{X}-R_{X}}^{2}\left(R_{R_{X}}+Re\{Z_{MN}\}\right)}{\left(R_{R_{X}}+Re\{Z_{MN}\}\right)^{2}+(wL_{R_{X}}+Im\{Z_{MN}\})^{2}}$$

Así pues, queda demostrado que la parte real de la impedancia  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$  se maximiza para la condición de resonancia del  $R_X$ , de forma que se obtiene su valor más elevado siempre que se cumpla:

$$wL_{R_X} = -Im\{Z_{MN}\}$$
(2.17)

Por consiguiente, la condición de resonancia del subcircuito  $R_x$  es de crítica importancia a la hora de optimizar la eficiencia PTE de los sistemas WPT por acoplo inductivo. Esta característica hace que la mayor parte de los circuitos receptores cuenten con una primera etapa en forma de red de adaptación de impedancias (*Matching Network*, MN), encargada de garantizar el cumplimiento de la condición indicada en (2.17).

Suponiendo la condición de resonancia de (2.17), y utilizando la relación entre la inductancia mutua  $M_{T_X-R_X}$  y el factor de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  indicado en (2.3), es posible calcular el valor máximo de la impedancia reflejada por la bobina  $R_X$ ; el cual es de tipo resistivo  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$ .

$$Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}} = \frac{w^{2}M_{T_{X}-R_{X}}^{2}}{R_{R_{X}} + jwL_{R_{X}} + Re\{Z_{MN}\} + jlm\{Z_{MN}\}}$$

$$= \frac{w^{2}K_{T_{X}-R_{X}}^{2}}{R_{R_{X}} + Re\{Z_{MN}\}}$$

$$= R_{R_{X}-T_{X_{ref}}}$$
(2.18)

De forma análoga al caso de la eficiencia de la bobina  $R_x$ , es factible reescribir la eficiencia de la bobina  $T_x$  en función de los factores de calidad de la bobina  $R_x$  y de la carga  $R_L$ ; incluyendo además el factor de calidad de la bobina  $T_x$ , definido como:

$$Q_{T_X} = \frac{wL_{T_X}}{R_{T_X}}$$
(2.19)

Así, utilizando las definiciones de los factores de calidad  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $Q_L$ , la expresión (2.18) puede reformularse de la forma siguiente:

$$R_{R_{X}-T_{X_{ref}}} = \frac{w^{2}k_{T_{X}-R_{X}}^{2}L_{T_{X}}L_{R_{X}}}{R_{R_{X}} + Re\{Z_{MN}\}}$$

$$= \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}wL_{T_{X}}}{\frac{R_{R_{X}}}{wL_{R_{X}}} + \frac{Re\{Z_{MN}\}}{wL_{R_{X}}}}$$

$$= \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}\frac{wL_{T_{X}}}{R_{T_{X}}}R_{T_{X}}}{\frac{R_{R_{X}}}{wL_{R_{X}}} + \frac{Re\{Z_{MN}\}}{wL_{R_{X}}}}$$

$$= \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}R_{T_{X}}}{\frac{1}{Q_{R_{X}}} + \frac{1}{Q_{L}}}$$

$$= k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}R_{T_{X}}} \underbrace{\left(\frac{Q_{R_{X}}Q_{L}}{Q_{R_{X}-L}}\right)}{Q_{R_{X}-L}}$$

$$= k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}-L}}R_{T_{X}}$$

Donde el nuevo factor de calidad introducido,  $Q_{R_X-L}$ , se define como:

$$Q_{R_X-L} = \frac{Q_{R_X}Q_L}{Q_{R_X} + Q_L} = \frac{wL_{R_X}}{R_{R_X} + Re\{Z_{MN}\}}$$
(2.21)

Para finalizar, la condición de resonancia del subcircuito  $R_x$  da lugar al modelo eléctrico mostrado en la Fig. 2.5; para el que la eficiencia de la bobina  $T_x$  indicada en (2.11) puede simplificarse como:

$$\eta_{L_{T_X}} = \frac{R_{R_X - T_{X_{ref}}}}{R_{R_X - T_{X_{ref}}} + R_{T_x}} = \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} R_{T_X}}{R_{T_X} (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} + 1)}$$
(2.22)

#### Eficiencia del enlace

Una vez conocidos los valores de las eficiencias de las bobinas  $\eta_{L_{T_X}}$  y  $\eta_{L_{R_X}}$ , bajo la condición de resonancia del subcircuito  $R_X$ , la expresión de la eficiencia del enlace introducida en (2.6) puede reescribirse de la forma siguiente:

$$\eta_{link} = \eta_{L_{T_X}} \eta_{L_{R_X}} = \underbrace{\frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L}}_{\eta_{L_{R_X}}} \underbrace{\frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} + 1}}_{\eta_{L_{T_X}}}$$
(2.23)

Como se ha comentado previamente, la primera etapa del circuito  $R_X$  consiste habitualmente en una red de adaptación de impedancias, encargada de asegurar la condición de resonancia del  $R_X$ , de forma que  $wL_{R_X} = -Im\{Z_{MN}\}$ . Bajo esta condición, la expresión de la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  expuesta en (2.23) puede considerarse válida para cualquier topología del circuito  $R_X$ ; además de ser independiente del tipo de circuito  $T_X$  utilizado en el sistema WPT.



Fig. 2.5. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo, considerando resonancia en el circuito *R<sub>X</sub>*; adaptado de [1].

Por otro lado, la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  presenta una fuerte dependencia con el factor de calidad de la carga  $Q_L$ ; apreciable al desarrollar la expresión (2.23) considerando que  $Q_L = wL_{R_X}/Re\{Z_{MN}\}$ ; y obteniéndose el resultado siguiente:

$$\eta_{link} = \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L}$$
(2.24)

Por su parte, el factor de calidad  $Q_L$ , como se expone en (2.10), es proporcional a  $Re\{Z_{MN}\}$ ; por lo que su valor depende de la red de adaptación de impedancias y, por consiguiente, de la topología del circuito  $R_X$ . Este efecto puede apreciarse analizando las eficiencias de las bobinas  $\eta_{L_{T_X}}$  y  $\eta_{L_{R_X}}$  en función de la parte real de la impedancia de entrada del circuito  $Re\{Z_{MN}\}$ ; obteniéndose las expresiones resultantes incluidas a continuación:

$$\eta_{L_{R_X}} = \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L} = \frac{\frac{w_{L_{R_X}}}{R_{R_X}}}{\frac{w_{L_{R_X}}}{R_{R_X}} + \frac{w_{L_{R_X}}}{Re\{Z_{MN}\}}} = \frac{Re\{Z_{MN}\}}{R_{R_X} + Re\{Z_{MN}\}}$$
(2.25)

$$\eta_{L_{T_X}} = \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L}$$

$$= \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_{R_X} \frac{wL_{R_X}}{Re\{Z_{MN}\}}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} \frac{wL_{R_X}}{Re\{Z_{MN}\}} + Q_{R_X} + \frac{wL_{R_X}}{Re\{Z_{MN}\}}}$$

$$= \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1 + \frac{Re\{Z_{MN}\}}{R_{R_X}}}$$
(2.26)

Por un lado, atendiendo a (2.25), la eficiencia de la bobina receptora  $\eta_{L_{R_X}}$  presenta una dependencia creciente con  $Re\{Z_{MN}\}$ ; llegándose al valor máximo de  $\eta_{L_{R_X}} = 1$ para la condición de  $Re\{Z_{MN}\} \gg R_{R_X}$ . Por otro lado, según lo expuesto en (2.26), la eficiencia de la bobina transmisora  $\eta_{L_{T_X}}$  alcanzará su valor máximo para valores de  $Re\{Z_{MN}\}$  que cumplan la condición de  $Re\{Z_{MN}\} \ll R_{R_X}(k_{T_X-R_X}^2Q_{T_X}Q_{R_X}+1)$ . Este comportamiento opuesto de las eficiencias de las bobinas respecto a  $Re\{Z_{MN}\}$  hace que la selección de su valor óptimo para maximizar  $\eta_{link}$  sea un aspecto crítico del diseño de los sistemas WPDT por acoplo inductivo; tal y como se detalla en el capítulo 3 de este trabajo.

A modo de ejemplo, la dependencia de las eficiencias de las bobinas  $T_X$  y  $R_X$  respecto a  $Re\{Z_{MN}\}$  se muestra gráficamente en la Fig. 2.6. En este caso, se han computado las eficiencias  $\eta_{LT_X}$ ,  $\eta_{LR_X}$  y  $\eta_{link}$  para un sistema WPT con una frecuencia de resonancia de  $f_0 = 13.56$  MHz, unas resistencias de pérdidas de las bobinas de valores  $R_{T_X} = R_{R_X} = 5 \Omega$ ; unos factores de calidad  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = 500$ ; y un coeficiente de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = 0.01$ . Las eficiencias de las bobinas  $\eta_{LR_X}$  y  $\eta_{LT_X}$ , muestran la dependencia con  $Re\{Z_{MN}\}$  indicada en las expresiones (2.25) y (2.26), respectivamente. Así,  $\eta_{LR_X}$  es creciente con  $Re\{Z_{MN}\}$ ; tendiendo a su valor máximo ideal de  $\eta_{LR_X} = 1$  para valores de  $Re\{Z_{MN}\} \gg R_{R_X} = 5 \Omega$ . Por el contrario,  $\eta_{LT_X}$  presenta su máximo de  $\eta_{LT_X} = k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} / (k_{T_X-R_X}^2 Q_{R_X} + 1)$  para el valor mínimo de  $Re\{Z_{MN}\} = 0$ ; mostrando después una tendencia decreciente con  $Re\{Z_{MN}\}$ .



Fig. 2.6. Eficiencias de las bobinas  $T_X$  y  $R_X$ , y del enlace, en función de la parte real de la impedancia de entrada del circuito  $R_X$ .

Con la finalidad de cuantificar el impacto del circuito  $R_x$  sobre la eficiencia del enlace, se incluye a continuación un estudio detallado de la influencia de las topologías de  $R_x$  más comunes sobre el factor de calidad de la carga.

#### Eficiencia del enlace para circuito RX resonante serie

La primera de las topologías evaluadas consiste en un circuito  $R_X$  resonante serie, como el mostrado en la Fig. 2.7. En este circuito, la red de adaptación de impedancias está constituida por un único condensador  $C_{R_X}$ . Además, el esquema de la Fig. 2.7 incluye la carga del circuito  $R_L$ ; cuyo valor dependerá de las especificaciones de tensión y corriente de una etapa posterior conectada a la salida del sistema WPT. En este caso, para simplificar los cálculos, la impedancia de entrada de dicha etapa de carga se ha considerado exclusivamente resistiva.



Fig. 2.7. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito  $R_X$  resonante serie; adaptado de [1].

Así pues, observando el esquema del circuito  $R_x$  de la Fig. 2.7, es sencillo obtener la expresión de la impedancia  $Z_{MN}$  vista desde la entrada de la red de adaptación de impedancias.

$$Z_{MN} = R_L - \frac{j}{wC_{R_X}} \tag{2.27}$$

Como se puede apreciar, la parte real de  $Z_{MN}$  coincide con el valor de la resistencia de carga del sistema  $R_L$ .

$$Re\{Z_{MN}\} = R_L \tag{2.28}$$

Además, la red de adaptación de impedancias debe asegurar el cumplimiento de la condición de resonancia del circuito  $R_X$ ; de forma que el valor de la capacidad  $C_{R_X}$  queda fijado por la autoinductancia de la bobina receptora  $L_{R_X}$  y la frecuencia de resonancia del circuito  $f_0$ , de forma que:

$$wL_{R_X} = -Im\{Z_{MN}\} = \frac{1}{wC_{R_X}}$$
(2.29)

El valor de la impedancia de entrada  $Z_{MN}$  indicado en (2.27) permite obtener el factor de calidad de la carga  $Q_L$ ; el cual es inversamente proporcional a la resistencia de carga.

$$Q_L = \frac{wL_{R_X}}{Re\{Z_{MN}\}} = \frac{wL_{R_X}}{R_L}$$
(2.29)

Haciendo uso de un circuito ejemplo, con una frecuencia de resonancia dada de  $f_0 = 13.56$  MHz, unas resistencias de pérdidas de valores  $R_{T_X} = R_{R_X} = 5 \Omega$ ; unos factores de calidad  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = 500$ ; y un coeficiente de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = 0.01$ ; se ha representado en la Fig. 2.8 la respuesta de las eficiencias  $\eta_{L_{T_X}}$ ,  $\eta_{L_{R_X}}$  y  $\eta_{link}$  respecto a la resistencia de carga  $R_L$ . Como puede apreciarse en la Fig. 2.8, el valor óptimo de eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  se consigue para una resistencia de carga  $R_L$  próxima a la resistencia de pérdidas  $R_{R_X}$  de la bobina receptora.

Por tanto, puede concluirse que la topología de circuito  $R_X$  resonante serie supone opción de diseño interesante únicamente para cargas  $R_L$  pequeñas y de valores cercanos a las pérdidas propias de la bobina  $R_X$  [1]. Este comportamiento se observa de forma intuitiva en el esquema de la Fig. 2.7, donde el camino de la intensidad  $i_{R_X}$ inducida en la bobina  $R_X$  incluye a la resistencia de carga  $R_L$ . Para valores elevados de  $R_L$ , la intensidad inducida en la bobina  $R_X$  será pequeña; llegando a alcanzar un valor nulo para  $R_L = \infty \Omega$ . Así pues, para valores de carga  $R_L$  elevados, el circuito  $R_X$ resonante serie presentará una eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  reducida, así como una potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$  mínima [1].



Fig. 2.8. Eficiencias de las bobinas  $T_X$  y  $R_X$ , y del enlace, en función de la resistencia de carga  $R_L$  para un circuito  $R_X$  resonante serie.

#### Eficiencia del enlace para circuito RX resonante paralelo

La segunda topología evaluada consiste en un circuito  $R_X$  resonante paralelo, similar el presentado en la Fig. 2.9. En este caso, la red de adaptación de impedancias está formada por un condensador  $C_{R_X}$ ; dispuesto en paralelo con la resistencia de carga  $R_L$ .



Fig. 2.9. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito  $R_X$  resonante paralelo; adaptado de [1].

El valor de la impedancia  $Z_{MN}$ , vista a la entrada de la red de adaptación, puede deducirse mediante la inspección del circuito de la Fig. 2.9; obteniéndose:

$$Z_{MN} = \frac{R_L}{1 + jwC_{R_X}R_L} = \frac{R_L(1 - jwC_{R_X}R_L)}{1 + (wC_{R_X}R_L)^2}$$
(2.30)

Por un lado, la parte real de  $Z_{MN}$  presenta una dependencia proporcional con la resistencia de carga  $R_L$ ; al contrario que el caso del circuito resonante serie. Además, como se apreciar en (2.24), el valor de  $Re\{Z_{MN}\}$  depende de la frecuencia angular de resonancia del sistema y del valor de la capacidad de la red de adaptación.

$$Re\{Z_{MN}\} = \frac{R_L}{\underbrace{1 + (wC_{R_X}R_L)^2}_{(wC_{R_X}R_L)^2 \gg 1}} \cong \frac{1}{R_L(wC_{R_X})^2}$$
(2.31)

Por otro lado, la parte imaginaria de  $Z_{MN}$  es idéntica a la obtenida para el circuito resonante serie; siempre y cuando se cumpla la condición de  $(wC_{R_X}R_L)^2 \gg 1$ .

$$Im\{Z_{MN}\} = -\frac{wC_{R_X}R_L^2}{\underbrace{1 + (wC_{R_X}R_L)^2}_{(wC_{R_X}R_L)^2 \gg 1}} \cong -\frac{1}{wC_{R_X}}$$
(2.32)

Para cualquier topología, la red de adaptación debe asegurar el cumplimiento de la condición (2.17), de forma que se garantice la resonancia del circuito  $R_X$ . En este caso, y al igual que para el circuito resonante serie, el valor de la capacidad de la red  $C_{R_X}$  queda impuesto por la autoinductancia de la bobina receptora  $L_{R_X}$  y la frecuencia de resonancia del circuito.

$$wL_{R_X} = -Im\{Z_{MN}\} = \frac{1}{wC_{R_X}}$$
(2.33)

Finalmente, el factor de calidad de la carga  $Q_L$  puede derivarse de la expresión (2.30) de la impedancia  $Z_{MN}$ ; resultando en una dependencia de  $Q_L$  directamente proporcional al valor de la resistencia de carga. Debe repararse en que  $Q_L$ , para el circuito resonante paralelo, muestra una dependencia con  $R_L$  inversa a la del circuito resonante serie; lo que influirá a la hora de seleccionar el valor óptimo de  $Z_{MN}$  para maximizar la eficiencia del enlace.

$$Q_{L} = \frac{wL_{R_{X}}}{Re\{Z_{MN}\}} \cong \frac{wL_{R_{X}}}{\frac{1}{R_{L}(wC_{R_{X}})^{2}}} = \frac{wL_{R_{X}}}{\frac{1}{R_{L}\left(\frac{1}{wL_{R_{X}}}\right)^{2}}} = \frac{R_{L}}{wL_{R_{X}}}$$
(2.34)

De forma similar al caso previo, se ha utilizado un circuito ejemplo, con frecuencia de resonancia de  $f_0 = 13.56$  MHz, resistencias de pérdidas de las bobinas de valores  $R_{T_X} = R_{R_X} = 5 \Omega$ ; factores de calidad  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = 500$ ; y coeficiente de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = 0.01$ ; para obtener la respuesta de las eficiencias  $\eta_{L_{T_X}}$ ,  $\eta_{L_{R_X}}$  y  $\eta_{link}$  respecto a la resistencia de carga  $R_L$ . Como se observa en la Fig. 2.10, el valor

máximo de eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  se alcanza para resistencias de carga  $R_L$  del orden de la centena de kilo ohmios.

En conclusión, la topología de circuito  $R_x$  resonante paralelo es apropiada para su aplicación bajo cargas  $R_L$  elevadas; de valores muy superiores a las pérdidas propias de la bobina  $R_x$  [1]. Intuitivamente, el esquema de la Fig. 2.9 permite apreciar como la intensidad  $i_{R_x}$  presenta un camino de baja impedancia a través de la capacidad  $C_{R_x}$ ; lo que posibilita valores de intensidad inducida,  $\eta_{link}$  y  $P_{MN}$  altos, para sistemas WPT con resistencias de carga  $R_L$  elevadas [1].



Fig. 2.10. Eficiencias de las bobinas  $T_X$  y  $R_X$ , y del enlace, en función de la resistencia de carga  $R_L$  para un circuito  $R_X$  resonante paralelo.

Para terminar, es preciso indicar que la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ , expresada en (2.23), es idéntica para circuitos  $R_X$  resonantes serie y paralelo; siempre que se cumpla la condición de resonancia en el  $R_X$  impuesta por  $wL_{R_X} = -Im\{Z_{MN}\}$ . Por el contrario, la expresión (2.23) es independiente de la topología y resonancia del circuito  $T_X$ ; por lo que este únicamente afectará a su potencia entregada  $P_{T_X}$ , pero no así a las eficiencias  $\eta_{L_{T_X}}$ ,  $\eta_{L_{R_X}}$  y  $\eta_{link}$ .

A modo de resumen, en este capítulo ha quedado demostrado como la condición de resonancia del circuito  $R_x$  permite maximizar la parte real de la impedancia reflejada  $Re\left\{Z_{R_X-T_{X_{ref}}}\right\}$ ; lo que incrementa la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ . Además, esta eficiencia es independiente de la topología y resonancia del circuito  $T_x$ ; el cual solo afecta a la potencia entregada  $P_{T_X}$ . Finalmente, se ha cuantificado el impacto del factor de calidad de la carga  $Q_L$  y de la resistencia de carga  $R_L$  sobre la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ . Para ello, se han considerado dos topologías de circuito  $R_x$  resonante: serie y paralelo. La topología de circuito  $R_x$  resonante serie ha demostrado ser óptima para el caso de resistencias de carga de valores pequeños y próximos a las pérdidas de la bobina receptora  $R_{R_X}$ . Por el contrario, la topología de circuito  $R_x$  resonante resistencias de cargas elevadas.

### 2.3 Cálculo de la potencia entregada al circuito $R_X$ .

La potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$  puede escribirse en función de la eficiencia de transferencia de potencia del enlace  $\eta_{link}$ , según la expresión (2.6).

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X} \tag{2.6}$$

Como se ha demostrado en la sección 2.2, la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  es independiente de las características del circuito  $T_x$ , como su topología o resonancia. Sin embargo, estas propiedades del circuito  $T_x$  sí presentan una influencia significativa sobre su potencia proporcionada  $P_{T_x}$ ; y sobre la potencia final  $P_{MN}$ entregada al circuito  $R_x$ , tal y como se indica en la relación (2.6).

Por lo tanto, en esta sección se considerarán las cuatro topologías más comunes de circuito  $T_x$ ; cuantificándose su influencia sobre la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_x$ . Para todos los casos evaluados se han considerado las siguientes condiciones de funcionamiento: impedancia interna de la fuente nula; resonancia en el circuito  $R_x$  ( $wL_{R_x} = -Im\{Z_{MN}\}$ ); resonancia en el circuito  $T_x$  ( $wL_{T_x} = 1/wC_{T_x}$ ).

#### Circuito TX resonante serie con fuente de tensión

La primera de las topologías de circuito  $T_x$  evaluadas, mostrada en la Fig. 2.11, consiste en una fuente de tensión alterna con valor de pico  $V_s$ , y un condensador  $C_{T_x}$  para conseguir resonancia serie con la inductancia  $L_{T_x}$ .



Fig. 2.11. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito  $T_x$  resonante serie y fuente de tensión  $V_s$ ; adaptado de [2].

La potencia proporcionada por la fuente de tensión  $P_{T_X}$  puede expresarse en función de la tensión de pico de la fuente  $V_s$  y de la impedancia  $Z_s$  vista por esta; según el desarrollo descrito a continuación.

$$P_{T_X} = \frac{1}{2} Re\{V_S I_S^*\}$$
(2.35)

$$= \frac{1}{2} Re \left\{ V_S \left( \frac{V_S}{Z_S} \right)^* \right\}$$
$$= \frac{1}{2} Re \left\{ V_S V_S^* \left( \frac{1}{Z_S} \right)^* \frac{Z_S}{Z_S} \right\}$$
$$= \frac{1}{2} \frac{|V_S|^2}{|Z_S|^2} Re\{Z_S\}$$

Como se aprecia en la expresión (2.35), es necesario conocer la impedancia vista por la fuente  $Z_s$  para poder calcular la potencia  $P_{T_X}$ . Analizando el circuito de la Fig. 2.11, es posible obtener la expresión de la impedancia  $Z_s$ , de la forma:

$$Z_{S} = -\frac{j}{wC_{T_{X}}} + R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} + R_{R_{X}-T_{X_{ref}}}$$
(2.36)

En la formulación de la expresión de  $Z_s$  se ha considerado la condición de resonancia del circuito  $R_x$ ; lo que implica una impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{Xref}}$  máxima y de tipo resistivo; tal y como se demostró en la sección 2.2. Además, asumiendo resonancia en el circuito  $T_x$ , de modo que  $wL_{T_X} = 1/wC_{T_X}$ , la expresión de  $Z_s$  puede simplificarse como:

$$Z_S = R_{T_X} + R_{R_X - T_{X_{ref}}}$$
(2.37)

Una vez conocida la impedancia  $Z_s$ , es posible calcular la expresión de la potencia  $P_{T_X}$ ; haciendo uso de las ecuaciones (2.35) y (2.37). Adicionalmente, utilizando la definición de  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  indicada en (2.20), la potencia  $P_{T_X}$  puede expresarse en función de los factores de calidad  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $Q_L$ , y del factor de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  del sistema WPT por acoplo inductivo.

$$P_{T_{X}} = \frac{V_{S}^{2}/2}{R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}}$$

$$= \frac{V_{S}^{2}/2}{R_{T_{X}} + \underbrace{k_{T_{X} - R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X} - L}R_{T_{X}}}_{R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}}$$

$$= \frac{V_{S}^{2}/2}{R_{T_{X}}(k_{T_{X} - R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X} - L} + 1)}$$
(2.38)

A partir de la expresión (2.38), es necesario destacar que la potencia  $P_{T_X}$  es inversamente proporcional a la resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{Xref}}$ . La inspección del esquema de la Fig. 2.11; permite apreciar como una resistencia  $R_{R_X-T_{Xref}}$  mayor implica menor intensidad  $i_{T_X}$  circulando por el circuito; por lo que la potencia  $P_{T_X}$  se verá también reducida. Este comportamiento es contrario al presentado por la

eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ , la cual es mayor cuanto más alto es el valor de la resistencia reflejada; tal y como se indica en la sección 2.2.

Finalmente, la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_x$  puede calcularse haciendo uso de la ecuación inicial (2.6); obteniéndose una respuesta proporcional a la tensión suministrada por la fuente  $V_s$ , y decreciente con la resistencia reflejada por la bobina  $R_x$ .

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X} = \frac{V_S^2}{2R_{T_X}} \frac{Q_{R_X - L}}{Q_L} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}}{\left(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} + 1\right)^2}$$
(2.39)

#### Circuito TX resonante paralelo con fuente de tensión

La segunda topología de circuito  $T_x$  considerada se presenta en la Fig. 2.12, e incluye una fuente de tensión alterna con valor de pico  $V_s$ , en paralelo con una capacidad  $C_{T_x}$ ; responsable junto con la inductancia  $L_{T_x}$  de la resonancia paralelo del circuito.



Fig. 2.12. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito  $T_x$  resonante paralelo y fuente de tensión  $V_s$ ; adaptado de [2].

En este caso, la impedancia  $Z_s$  vista por la fuente de tensión estará definida como el paralelo de la capacidad  $C_{T_X}$  con el conjunto formado por la inductancia  $L_{T_X}$ , su resistencia pérdidas  $R_{T_X}$  y la resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{Xref}}$ ; según la expresión:

$$Z_{S} = \frac{1}{jwC_{T_{X}}} || \left( R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}} \right)$$
  
$$= \frac{R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}}{jwC_{T_{X}} \left( R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}} \right) + 1}$$
(2.40)
Una primera aproximación, indicada en (2.40), permite simplificar la expresión de la impedancia  $Z_s$ . Esta suposición se basa en considerar un factor de calidad de la bobina  $T_x$  relativamente elevado; junto con una resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  mayor que la resistencia de pérdidas de la bobina  $T_x$ , pero de valor no muy superior a esta.

$$\left. \begin{array}{l} Q_{T_X} = \frac{wL_{T_X}}{R_{T_X}} \gg 1 \\ R_{R_X - T_{X_{ref}}} > R_{T_X} \end{array} \right\} \Longrightarrow wL_{T_X} \gg R_{T_X} + R_{R_X - T_{X_{ref}}}$$

$$(2.41)$$

Ambas asunciones son razonables [1]; y su no cumplimiento implicaría que los cambios en la resistencia reflejada afectasen a la frecuencia de resonancia  $w_o$  del circuito  $T_x$ . Esta dependencia no deseada de  $w_o$  con la resistencia  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  puede derivarse del estudio de la condición de  $Im\{Z_s\} = 0$ ; de forma que:

$$Im\{Z_{S}\} = Im\left\{\frac{R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}}{jwC_{T_{X}}\left(R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}\right) + 1}\right\}$$
$$= Im\left\{\frac{R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}} + jwL_{T_{X}}}{1 - w^{2}C_{T_{X}}L_{T_{X}} + jwC_{T_{X}}\left(R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}\right)}\right\}$$
$$= \frac{wL_{T_{X}}\left(1 - w^{2}C_{T_{X}}L_{T_{X}}\right) - wC_{T_{X}}\left(R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}\right)^{2}}{\left[1 - w^{2}C_{T_{X}}L_{T_{X}}\right]^{2} + \left[wC_{T_{X}}\left(R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}\right)\right]^{2}}$$
$$= 0$$

Así, la frecuencia de resonancia del circuito  $T_X$  derivada de la condición (2.42) resulta ser, efectivamente, dependiente de la resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{Xref}}$ .

$$w_{0} = \sqrt{\frac{-1}{C_{T_{X}}L_{T_{X}}} \left[ \frac{C_{T_{X}} \left( R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}} \right)^{2} - L_{T_{X}}}{L_{T_{X}}} \right]}$$
(2.43)

Además, como se aprecia en la expresión (2.43), la única posibilidad de obtener una frecuencia de resonancia  $w_o$  real implica que se cumpla la condición de:

$$L_{T_X} > C_{T_X} \left( R_{T_X} + R_{R_X - T_{Xref}} \right)^2 \xrightarrow[wL_{T_X} = \frac{1}{wC_{T_X}}]{} wL_{T_X} > R_{T_X} + R_{R_X - T_{Xref}}$$
(2.44)

Esta condición es similar a la considerada inicialmente, y expuesta en (2.41). Además, su cumplimiento implica la obtención de una frecuencia de resonancia  $w_o$  real e igual al parámetro de diseño inicial del sistema WPT.

$$w_{0} = \sqrt{\frac{-1}{C_{T_{X}}L_{T_{X}}} \left[ \frac{C_{T_{X}} \left( R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}} \right)^{2} - L_{T_{X}}}{L_{T_{X}}} \right]}_{(2.41)} w_{0} = \frac{1}{\sqrt{C_{T_{X}}L_{T_{X}}}}$$
(2.43)

Así, la expresión simplificada de la impedancia  $Z_s$ , suponiendo la condición de (2.41), resulta en:

$$Z_{S} = \frac{R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}}{jwC_{T_{X}}\left(R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}\right)} \cong \frac{L_{T_{X}}}{C_{T_{X}}\left(R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}\right)}$$
(2.44)

Una vez conocida la impedancia  $Z_s$ , es posible calcular la potencia entregada por la fuente de tensión  $V_s$ . Dicha potencia  $P_{T_x}$  será mayor cuanto más elevada sea la resistencia reflejada; ya que la impedancia  $Z_s$  decrece con  $R_{R_x-T_{xref}}$ , lo que implica un aumento en la intensidad  $i_{T_x}$  proporcionada por la fuente de tensión.

$$P_{T_{X}} = \frac{1}{2} \frac{|V_{S}|^{2}}{|Z_{S}|^{2}} Re\{Z_{S}\}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{V_{S}^{2}}{|Z_{S}|}$$

$$= \frac{V_{S}^{2}}{2} \frac{C_{T_{X}} \left(R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}\right)}{L_{T_{X}}}$$

$$= \frac{V_{S}^{2}}{2 \frac{\left(wL_{T_{X}}\right)^{2}}{wL_{T_{X}} = \frac{1}{wC_{T_{X}}}}} \left(R_{T_{X}} + \overline{k_{T_{X} - R_{X}}^{R_{R_{X} - T_{X_{ref}}}}\right)$$

$$= \frac{V_{S}^{2}}{2 \frac{\left(wL_{T_{X}}\right)^{2}}{wL_{T_{X}} = \frac{1}{wC_{T_{X}}}}} R_{T_{X}} \left(k_{T_{X} - R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X} - L} R_{T_{X}}\right)$$

$$= \frac{V_{S}^{2}}{2 \left(wL_{T_{X}}\right)^{2}} R_{T_{X}} \left(k_{T_{X} - R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X} - L} + 1\right)$$
(2.45)

Para finalizar, la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$  es fácilmente deducible de la expresión (2.6); consiguiéndose un valor proporcional a la tensión suministrada por la fuente  $V_s$ , y a la resistencia reflejada por la bobina  $R_X$ .

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X} = \frac{V_S^2}{2(wL_{T_X})^2} R_{T_X} \frac{Q_{R_X - L}}{Q_L} k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}$$
(2.46)

#### Circuito TX resonante serie con fuente de intensidad

La tercera topología de circuito  $T_x$  evaluada, cuyo esquemático se muestra en la Fig. 2.13, incluye una fuente de intensidad alterna con valor de pico  $I_s$ , en serie con una capacidad  $C_{T_x}$ . Esta capacidad es responsable de la resonancia serie del circuito, junto con la autoinductancia  $L_{T_x}$  de la bobina  $T_x$ .



Fig. 2.13. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito  $T_x$  resonante serie y fuente de intensidad  $I_s$ ; adaptado de [2].

Para esta topología resonante serie; y considerando resonancia en el circuito  $R_x$ ; la impedancia vista por la fuente de intensidad,  $Z_s$ , presenta el mismo valor que para el caso del circuito resonante serie con fuente de tensión  $V_s$ , indicado en la ecuación (2.37).

La potencia  $P_{T_X}$  entregada por la fuente de intensidad  $I_S$  puede calcularse siguiendo un desarrollo similar al del caso de fuente de tensión  $V_S$ ; de forma que:

$$P_{T_{X}} = \frac{1}{2} Re\{V_{S}I_{S}^{*}\}$$

$$= \frac{1}{2} Re\{(I_{S}Z_{S})I_{S}^{*}\}$$

$$= \frac{1}{2} Re\{I_{S}I_{S}^{*}Z_{S}\}$$

$$= \frac{|I_{S}|^{2}}{2} Re\{Z_{S}\}$$

$$= \frac{I_{S}^{2}}{2} \left(R_{T_{X}} + R_{R_{X}-T_{X_{ref}}}\right)$$

$$= \frac{I_{S}^{2}}{2} \left(R_{T_{X}} + \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}-L}R_{T_{X}}}{R_{R_{X}-T_{X_{ref}}}}\right)$$

$$= \frac{I_{S}^{2}}{2} R_{T_{X}} \left(k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}-L}R_{T_{X}} + 1\right)$$

$$(2.47)$$

Aplicando la relación (2.6), es sencillo obtener la expresión final de la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$ . Esta potencia  $P_{MN}$  es proporcional a la resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$ ; ya que para mayores impedancias  $Z_S$  vistas por la fuente  $I_S$ , se obtendrán valores de tensión  $V_S$  más elevados; lo que redundará en un aumento de la potencia  $P_{T_X}$  entregada por la fuente; tal y como se puede apreciar de la inspección del circuito de la Fig. 2.13.

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X} = \frac{I_S^2}{2} R_{T_X} \frac{Q_{R_X - L}}{Q_L} k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}$$
(2.48)

#### Circuito TX resonante paralelo con fuente de intensidad

La última topología de circuito  $T_x$  considerada se expone en la Fig. 2.12, y está formada por una fuente de intensidad alterna con valor de pico  $I_s$ , en paralelo con una capacidad  $C_{T_x}$ ; la cual es responsable, junto con la inductancia  $L_{T_x}$ , de la resonancia paralelo del circuito.



Fig. 2.14. Modelo eléctrico del sistema WPT por acoplo inductivo con circuito  $T_X$  resonante paralelo y fuente de intensidad  $I_S$ ; adaptado de [2].

La impedancia  $Z_s$  vista por la fuente de intensidad  $I_s$  tendrá la misma expresión que la calculada para el caso de circuito  $T_x$  resonante paralelo con fuente de tensión  $V_s$ ; tomando el valor indicado en (2.44).

Así, la potencia  $P_{T_x}$  entregada por la fuente de intensidad  $I_s$ , puede calcularse utilizando el desarrollo (2.47); de forma que:

$$P_{T_X} = \frac{|I_S|^2}{2} Re\{Z_S\}$$

$$= \frac{|I_S|^2}{2} Re\left\{\frac{R_{T_X} + jwL_{T_X} + R_{R_X - T_{X_{ref}}}}{jwC_{T_X} \left(R_{T_X} + jwL_{T_X} + R_{R_X - T_{X_{ref}}}\right)}\right\}$$
(2.49)

$$\approx \frac{I_{S}^{2}}{2} \frac{L_{T_{X}}}{\underbrace{C_{T_{X}} \left(R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{Xref}}\right)}_{jwL_{T_{X}} \gg R_{T_{X}} + R_{R_{X} - T_{Xref}}}$$

$$= \frac{I_{S}^{2} \underbrace{\left(wL_{T_{X}}\right)^{2}}_{2} \left(\frac{1}{R_{T_{X}} + \underbrace{k_{T_{X} - R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X} - L}R_{T_{X}}}_{R_{R_{X} - T_{Xref}}}\right)$$

$$= \frac{I_{S}^{2} \left(wL_{T_{X}}\right)^{2}}{2} \frac{1}{R_{T_{X}} \left(k_{T_{X} - R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X} - L}R_{T_{X}} + 1\right)}$$

Finalmente, la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$  se calcula a partir de la relación (2.6). De esta forma, puede verse como  $P_{MN}$  decrece con la resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , ya que la impedancia  $Z_S$  vista por la fuente de intensidad será menor cuanto mayor sea  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , lo que repercutirá en una menor potencia entregada por la fuente  $I_S$ .

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X} = \frac{I_S^2 (wL_{T_X})^2}{2R_{T_X}} \frac{Q_{R_X - L}}{Q_L} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} R_{T_X}}{\left(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} R_{T_X} + 1\right)^2}$$
(2.50)

En conclusión, se ha demostrado como las topologías de los circuitos  $T_X$  influyen en la potencia entregada por la fuente  $P_{T_X}$ , lo que afecta directamente a la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$ , a través de la relación  $P_{MN} = \eta_{link}P_{T_X}$ . Tras el estudio detallado de las cuatro topologías presentadas, puede afirmarse que las configuraciones basadas en fuentes de tensión  $V_S$  presentan mayores potencias  $P_{T_X}$ entregadas para impedancias  $Z_S$  pequeñas, tal y como es esperable de la inspección de los circuitos de la Fig. 2.11 y la Fig. 2.12. Por el contrario, las configuraciones con fuentes de intensidad  $I_S$  proporcionarán mayor potencia  $P_{T_X}$  cuando la impedancia  $Z_S$  vista por dichas fuentes sea máxima; siendo este comportamiento también apreciable intuitivamente observando la Fig. 2.13 y la Fig. 2.14.

# 2.4 Influencia del factor de calidad de las bobinas y del coeficiente de acoplo en el enlace.

En esta sección del trabajo se realizará un análisis de la influencia de los factores de calidad de las bobinas  $Q_{T_X}$  y  $Q_{R_X}$ , así como del coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$ , sobre la eficiencia de transferencia de potencia del enlace  $\eta_{link}$  y sobre la potencia total entregada al circuito recepto $P_{MN}$ r. Como se ha comprobado en la sección 2.3, ambos parámetros de rendimiento se relacionan a través de  $P_{MN} = \eta_{link}P_{T_X}$ ; lo que implica que la potencia  $P_{MN}$  se verá afectada por  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$  a través, tanto de la eficiencia  $\eta_{link}$ , como de la potencia entregada por la fuente  $P_{T_X}$ . De forma previa al estudio de su influencia sobre  $\eta_{link}$  y  $P_{MN}$ , es necesario recordar las definiciones de los parámetros de calidad Q de las bobinas y del coeficiente acoplo  $k_{T_X-R_X}$  entre dichas bobinas.

En primer lugar, el factor de calidad de las bobinas Q, como se indica en (2.9) y (2.19), relaciona su reactancia wL y su resistencia de pérdidas R, según la expresión Q = wL/R. Así, un factor de calidad Q < 1 implica un efecto resistivo; y disipativo de potencia; dominante sobre el efecto inductivo de la bobina. Atendiendo a la definición de Q, puede afirmarse que la generación de un campo magnético mediante las bobinas de forma efectiva, y con bajas pérdidas, requiere de inductancias con factores de calidad lo más alto posibles.

Por otro lado, el coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$ , tal y como se comentó en la sección 2.1, cuantifica el grado de acoplamiento entre las bobinas del sistema WPT; tomando valores normalizado entre  $k_{T_X-R_X} = [0, 1]$ .

#### Influencia de $Q_{T_X}$ , $Q_{R_X}$ y $k_{T_X-R_X}$ sobre la eficiencia del enlace.

La expresión de eficiencia de transferencia de potencia del enlace, demostrada en la sección 2.2, presenta la dependencia con los factores de calidad  $Q_{T_X}$  y  $Q_{R_X}$ , con y el coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$ , indicada en la ecuación (2.23).

$$\eta_{link} = \eta_{L_{T_X}} \eta_{L_{R_X}} = \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} + 1}$$
(2.23)

Es posible observar en (2.23) que para mayores valores de  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$  se obtendrán eficiencias del enlace  $\eta_{link}$  más altas. Este comportamiento es acorde con la idea fundamental de transferencia de potencia por acoplo inductivo, en la que se requiere del uso de altos factores de calidad para reducir las pérdidas por disipación de potencia, así como elevados coeficientes de acoplo para maximizar la tensión inducida entre las bobinas del enlace [1].

Con el objetivo de ejemplificar este comportamiento, se presentan distintas gráficas mostrando la dependencia de la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ , respecto a los factores de calidad  $Q_{T_X}$  y  $Q_{R_X}$ , y al coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$ . Concretamente, el ejemplo utilizado está basado en un sistema WPT con una frecuencia de resonancia de  $f_0 = 13.56 MHz$  y un factor de calidad de la carga de  $Q_L = 50$ . Adicionalmente, los factores de calidad de las bobinas se consideran idénticos, y se ha evaluado su magnitud entre  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = [0, 1000]$ ; mientras que se ha considerado el funcionamiento del sistema bajo coeficientes de acoplo de valores  $k_{T_X-R_X} = [0.005, 0.01, 0.5]$ . Así pues, la Fig. 2.15 confirma la respuesta esperada de la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ , según la expresión (2.23). Como se puede apreciar en la Fig. 2.15, mayores valores de  $Q_{T_X}, Q_{R_X}$  y de  $k_{T_X-R_X}$  implican menores pérdidas por disipación de potencia y mayor tensión inducida entre las bobinas, respectivamente; lo que repercute claramente en un aumento de la eficiencia  $\eta_{link}$ .



Fig. 2.15. Influencia de los factores de calidad de las bobinas  $Q_{T_x} y Q_{R_x}$ ; y del factor de acoplo  $k_{T_x-R_x}$  sobre la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ .

Adicionalmente, se han incluido las respuestas de las eficiencias de las bobinas  $\eta_{L_{T_X}}$  y  $\eta_{L_{R_X}}$  respecto a sus factores de calidad  $Q_{T_X}$  y  $Q_{R_X}$ , y al coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$ ; con la finalidad de evaluar individualmente su dependencia respecto a cada parámetro. El mismo sistema WPT utilizado como ejemplo para cuantificar la influencia de  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$  sobre la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  ha sido, también, utilizado para el análisis de su efecto sobre factores de calidad de las bobinas.

Primero, la eficiencia de la bobina  $T_x$  ha sido definida en la sección 2.2; y sigue la relación indicada en (2.22). Así, la eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$  será mayor cuanto más elevados sean los valores de  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$ ; alcanzándose el máximo ideal de  $\eta_{L_{T_X}} = 1$  cuando se cumpla la condición de  $k_{T_X-R_X}^2 Q_{R_X-L} \gg 1$ .

$$\eta_{L_{T_X}} = \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} + 1}$$
(2.22)

Este comportamiento queda probado numéricamente a través del análisis del sistema WPT utilizado como ejemplo; el cual presenta la respuesta de  $\eta_{L_{T_X}}$  incluida en la Fig. 2.16. Como es apreciable, la eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$  es creciente con  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$ ; y alcanza su límite superior de  $\eta_{L_{T_X}} = 1$  cuando se hace posible el cumplimiento de la condición  $k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X-L} \gg 1$ . Concretamente, el ejemplo muestra cómo, para un coeficiente de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = 0.5$  y factores de calidad bajos, de valores  $Q_{T_X} = Q_{T_X} = 5$ , el sistema alcanza una eficiencia de  $\eta_{L_{T_X}} = 0.85$ . Sin embargo, las implementaciones prácticas de sistemas WPT por acoplo inductivo presentan coeficientes de acoplo inferiores a  $k_{T_X-R_X} = 0.4$  [6]; por lo que las curvas correspondientes a  $k_{T_X-R_X} = 0.01$  y  $k_{T_X-R_X} = 0.05$  suponen una estimación más realista de la respuesta de la eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$ .



Fig. 2.16. Influencia de los factores de calidad de las bobinas  $Q_{T_X} y Q_{R_X}$ ; y del factor de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  sobre la eficiencia de la bobina transmisora  $\eta_{L_{T_Y}}$ .

Segundo, la eficiencia de la bobina  $R_x$  es independiente del coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  y del factor de calidad de la bobina transmisora  $Q_{T_X}$ ; aunque sí muestra una fuerte dependencia con el factor de calidad  $Q_{R_X}$  y su relación con el factor de calidad de la carga  $Q_L$ ; como se ha demostrado en la sección 2.2 y se indica en (2.8).

$$\eta_{L_{R_X}} = \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L} \tag{2.8}$$

Por tanto, para factores de calidad de la bobina  $Q_{R_X}$  cercanos al factor de calidad de la carga  $Q_L$ , se conseguirán valores de eficiencia  $\eta_{L_{R_X}}$  próximos al 50 %; lo que supone que las pérdidas de la bobina  $R_X$  sean similares a la parte real de la impedancia de entrada del circuito  $R_X$ , de forma que  $R_{R_X} = Re\{Z_{MN}\}$ . Por otro lado, para valores de  $Q_{R_X} \gg Q_L$ , la eficiencia tenderá a su valor óptimo de  $\eta_{L_{R_X}} = 1$ ; para lo que es necesario el cumplimiento de  $R_{R_X} \ll Re\{Z_{MN}\}$ .

El estudio del sistema WPT utilizado como ejemplo no hace más que corroborar este comportamiento; pudiendo distinguirse en las curvas de la Fig. 2.17 que todas ellas son idénticas para los valores de  $k_{T_X-R_X}$  evaluados. Además, el ejemplo presenta una eficiencia de  $\eta_{L_{R_X}} = 0.5$  para el caso de factores de calidad de la bobina  $R_X$  y de la carga idénticos, concretamente de  $Q_{R_X} = Q_L = 50$ . Finalmente, es apreciable en la Fig. 2.17 que, para valores de  $Q_{R_X} \gg Q_L = 50$ , la eficiencia tiende a su límite superior de  $\eta_{L_{R_X}} = 1$ . Por tanto, dado que la condición de  $Q_{R_X} \gg Q_L$  implica que  $R_{R_X} \ll Re\{Z_{MN}\}$ , es asumible concluir que la eficiencia  $\eta_{L_{R_X}}$  será óptima para circuitos  $R_X$  en los que la parte real de su impedancia  $Z_{MN}$  sea lo más alta posible. Concretamente, el estudio incluido en la sección 2.2 demuestra cómo las configuraciones  $R_X$  resonantes en paralelo son recomendables para sistemas con cargas  $R_L$  elevadas y presentan mayores valores de  $Re\{Z_{MN}\}$ ; lo que hace que alcancen eficiencias  $\eta_{L_{R_X}}$  más altas que las configuraciones de tipo serie.



Fig. 2.17. Influencia de los factores de calidad de las bobinas  $Q_{T_X} y Q_{R_X}$ ; y del factor de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  sobre la eficiencia de la bobina receptora  $\eta_{L_{R_Y}}$ .

#### Influencia de $Q_{T_X}$ , $Q_{R_X}$ y $k_{T_X-R_X}$ sobre la potencia entregada al circuito RX.

El efecto de los factores de calidad de las bobinas  $Q_{T_X}$  y  $Q_{R_X}$ , y del coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  sobre la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$  es más complejo que el ejercicio sobre la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ . Por un lado, como se ha comprobado en la sección 2.3, la potencia  $P_{T_X}$  suministrada por el circuito  $T_X$  depende de la impedancia  $Z_S$  vista por este; la cual incluye a la resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{Xref}}$ . A su vez, esta resistencia  $R_{R_X-T_{Xref}}$  es fuertemente dependiente de  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$ ; según la expresión (2.20) y lo demostrado en la sección 2.2. Así pues, la relación  $P_{MN} = \eta_{link}P_{T_X}$  supone que la potencia  $P_{MN}$  está influencia por  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$ , tanto a través de la potencia  $P_{T_X}$  como de la eficiencia  $\eta_{link}$ .

Así pues, en el caso de un circuito  $T_x$  resonante serie con fuente intensidad  $I_s$ , el incremento de  $Q_{T_x}$ ,  $Q_{R_x}$  y  $k_{T_x-R_x}$  causa el aumento de la eficiencia  $\eta_{link}$  y de la potencia suministrada  $P_{T_x}$ ; siguiendo lo indicado por las expresiones (2.23) y (2.47), respectivamente. Este comportamiento ha sido analizado en un sistema ejemplo con una frecuencia de resonancia de  $f_0 = 13.56 MHz$ , una fuente de intensidad de valor pico  $I_s = 1$  A, un factor de calidad de la carga de  $Q_L = 50$ , factores de calidad de las bobinas  $T_x$  y  $R_x$  idénticos y de valores en el rango de  $Q_{T_x} = Q_{R_x} = [0, 1000]$ , y coeficientes de acoplo  $k_{T_x-R_x} = [0.005, 0.01, 0.5]$ . La respuesta mostrada en la Fig. 2.18 presenta el comportamiento anticipado por las expresiones (2.23) y (2.47). Por un lado, la potencia  $P_{MN}$  se ve incrementada por el aumento de la eficiencia  $\eta_{link}$ ; siendo esta eficiencia creciente con los parámetros  $Q_{T_x}$ ,  $Q_{R_x}$  y  $k_{T_x-R_x}$ , tal como se aprecia en la Fig. 2.15. Por otro lado, la Fig. 2.19 incluye la respuesta de la potencia  $Z_s$  y, por lo tanto, creciente con  $Q_{T_x}$ ,  $Q_{R_x}$  y  $k_{T_x-R_x}$ ; análogamente a lo demostrado a través de la expresión (2.47).



Fig. 2.18. Influencia de los factores de calidad de las bobinas  $Q_{T_X} y Q_{R_X}$ ; y del factor de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  sobre la potencia entregada al circuito receptor  $P_{MN}$ ; para un circuito  $T_X$  resonante serie con fuente de intensidad  $I_S$ .



Fig. 2.19. Influencia de los factores de calidad de las bobinas  $Q_{T_X}$  y  $Q_{R_X}$ ; y del factor de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  sobre la potencia entregada por la fuente  $P_{T_X}$ ; para un circuito  $T_X$  resonante serie con fuente de intensidad  $I_S$ .

Por el contrario, en el caso de un circuito  $T_X$  resonante serie con fuente de tensión  $V_S$ , el aumento de  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$  repercute en un incremento de la eficiencia  $\eta_{link}$ ; mientras que produce el decremento de la potencia suministrada  $P_{T_X}$ ; atendiendo a lo indicado en las expresiones (2.23) y (2.38). De forma similar al caso anterior, este comportamiento ha sido analizado en un sistema ejemplo con una frecuencia de resonancia de  $f_0 = 13.56 \text{ MHz}$ , una fuente de tensión de valor pico  $V_S = 1 \text{ V}$ , un factor de calidad de la carga de  $Q_L = 50$ , unos factores de calidad de las bobinas  $T_X$  y  $R_X$  idénticos y con valores en el rango de  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = [0, 1000]$ , y unos coeficientes de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = [0.005, 0.01, 0.5]$ . La respuesta del sistema se muestra en la Fig. 2.20, donde se aprecia el aumento de la potencia  $P_{MN}$  con  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$ , únicamente para los casos en los que el coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  es reducido. En

estos casos, la resistencia reflejada  $R_{T_X-R_{X_{ref}}}$  no será excesivamente alta, lo que reducirá su impacto negativo sobre la potencia proporcionada por la fuente  $P_{T_X}$ , según la expresión (2.38) y lo mostrado en la Fig. 2.21. Así, para valores de coeficientes de acoplo inferiores a  $k_{T_X-R_X} = 0.4$ , la influencia creciente de  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$  sobre la eficiencia  $\eta_{link}$  tiene más peso que su influencia decreciente sobre  $P_{T_X}$ ; lo que hace que la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$  resultante aumente para incrementos en  $Q_{T_X}$  y  $Q_{R_X}$ . Por el contrario, para valores de  $k_{T_X-R_X} > 0.4$ , el efecto negativo de  $Q_{T_X}$ ,  $Q_{R_X}$  y  $k_{T_X-R_X}$  sobre  $P_{T_X}$  es dominante; lo que implica una respuesta de  $P_{MN}$  decreciente con  $Q_{T_X}$  y  $Q_{R_X}$ .



Fig. 2.20. Influencia de los factores de calidad de las bobinas  $Q_{T_X} y Q_{R_X}$ ; y del factor de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  sobre la potencia entregada al circuito receptor  $P_{MN}$ ; para un circuito  $T_X$  resonante serie con fuente de tensión  $V_S$ .



Fig. 2.21. Influencia de los factores de calidad de las bobinas  $Q_{T_x}$  y  $Q_{R_x}$ ; y del factor de acoplo  $k_{T_x-R_x}$  sobre la potencia entregada por la fuente  $P_{T_x}$ ; para un circuito  $T_x$  resonante serie con fuente de tensión  $V_s$ .

### 2.5 Influencia de resonancias del $T_X$ y $R_X$ en el enlace.

A lo largo de las secciones previas, se ha considerado siempre el cumplimiento de las condiciones de resonancia del circuito  $T_X$  ( $wL_{T_X} = 1/wC_{T_X}$ ) y del circuito  $R_X$ ( $wL_{R_X} = -Im\{Z_{MN}\}$ ). Sin embargo, en determinadas ocasiones, alguna de estas condiciones puede no cumplirse de la forma deseada; lo que puede afectar negativamente al rendimiento del sistema WPT. Por tanto, es esta sección, se cuantificará el efecto de las resonancias del  $T_X$  y  $R_X$  sobre los parámetros fundamentales de rendimiento del sistema, como son su eficiencia  $\eta_{link}$  de transferencia de potencia y la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito receptor.



Fig. 2.22. Circuitos WPT simplificados para las diferentes condiciones de resonancia consideradas; (a) circuito  $T_X$  no resonante y circuito  $R_X$  no resonante; (b) circuito  $T_X$  no resonante y circuito  $R_X$  resonante; (c) circuito  $T_X$  resonante y circuito  $R_X$  resonante; (d) circuito  $T_X$  resonante y circuito  $R_X$  no resonante; adaptado de [1].

#### Circuitos $T_X$ no resonante y $R_X$ no resonante.

La primera topología considerada implica la no resonancia de los circuitos  $T_x$  y  $R_x$ , obteniéndose el esquema circuital equivalente mostrado en la Fig. 2.22 (a). Bajo el no cumplimiento de la condición de resonancia del circuito  $R_x$ , como se ha demostrado en la sección 2.2, la impedancia reflejada  $Z_{R_x-T_{xref}}$  no será máxima ni puramente resistiva; y tomará un valor dado por:

$$Z_{R_X - T_{X_{ref}}} = \frac{w^2 M_{T_X - R_X}^2}{R_{R_X} + jw L_{R_X} + R_L}$$
(2.51)

$$= \frac{k_{T_X - R_X} = \frac{M_{T_X - R_X}}{L_{T_X L_{R_X}}}}{k_{T_X - R_X} = \frac{k_{T_X - R_X}}{R_{R_X} + jwL_{R_X} + R_L}}$$
$$= \frac{k_{T_X - R_X}^2 wL_{T_X} wL_{R_X}}{R_{T_X} - R_X} \frac{R_{T_X} R_{R_X}}{R_{R_X}} + \frac{R_L}{R_{R_X}}$$
$$= \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}{1 + Q_{R_X} (j + 1/Q_L)} R_{T_X}$$

La eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  depende de la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , a través de factor de eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$  de la bobina  $T_X$ ; de manera que su expresión resultante presenta una dependencia creciente con la parte real de dicha impedancia reflejada.

$$\eta_{link} = \eta_{L_{T_X}} \eta_{L_{R_X}}$$

$$= \frac{Re\{Z_{R_X - T_{Xref}}\}}{\frac{R_{T_X} + Re\{Z_{R_X - T_{Xref}}\}}{\eta_{L_{T_X}}}} \frac{Re\{Z_{MN}\}}{\frac{R_{R_X} + Re\{Z_{MN}\}}{\eta_{L_{R_X}}}}{(2.52)}$$

$$= \frac{Re\{Z_{R_X - T_{Xref}}\}}{R_{T_X} + Re\{Z_{R_X - T_{Xref}}\}} \frac{R_L}{R_{R_X} + R_L} \frac{wL_{R_X}}{wL_{R_X}}}{wL_{R_X}}$$

$$= \frac{Re\{Z_{R_X - T_{Xref}}\}}{R_{T_X} + Re\{Z_{R_X - T_{Xref}}\}} \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L}}{(2.52)}$$

Adicionalmente, la impedancia  $Z_s$  vista por la fuente de tensión  $V_s$  es también dependiente de la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{Xref}}$ ; de forma que:

$$Z_{S} = R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} + Z_{R_{X} - T_{X_{ref}}}$$

$$= R_{T_{X}} \left( 1 + jQ_{T_{X}} + \frac{Z_{R_{X} - T_{X_{ref}}}}{R_{T_{X}}} \right)$$
(2.53)

Para terminar, la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$  se ve afectada por la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{Xref}}$ ; tanto a través de la potencia  $P_{T_X}$  entregada por la fuente  $V_S$ , como por la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ .

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X} = \underbrace{\frac{V_S^2}{2|Z_S|^2} Re\{Z_S\}}_{P_{T_X}} \eta_{link}$$
(2.54)

#### Circuitos $T_X$ no resonante y $R_X$ resonante.

La segunda configuración analizada considera un circuito  $T_x$  no resonante; mientras que se garantiza la resonancia del circuito  $R_x$ ; tal como se muestra en el esquema simplificado de la Fig. 2.22 (b). Así pues, al cumplirse la condición de resonancia del  $R_x$ , la impedancia reflejada  $Z_{R_x-T_{x_{ref}}}$  será máxima y de tipo resistivo, como se ha demostrado previamente en la sección 2.2.

$$Z_{R_X - T_{X_{ref}}} = \frac{w^2 \overbrace{k_{T_X - R_X}^2 L_{T_X} L_{R_X}}^{M_{T_X - R_X}^2}}{R_{R_X} + Re\{Z_{MN}\}} = R_{R_X - T_{X_{ref}}}$$
(2.18)

Por su parte, se ha demostrado que la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  no depende, ni de la topología del circuito  $T_x$ , ni de su condición de resonancia; de forma que su valor será máximo y dado por la expresión (2.23).

$$\eta_{link} = \eta_{L_{T_X}} \eta_{L_{R_X}} = \underbrace{\frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L}}_{\eta_{L_{R_X}}} \underbrace{\frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} + 1}}_{\eta_{L_{T_X}}}$$
(2.23)

Por el contrario, la impedancia  $Z_s$  vista por la fuente  $V_s$  sí depende de la condición de resonancia del circuito  $T_x$ ; por lo que, al no presentar resonancia, su valor será idéntico al calculado para la topología anterior.

$$Z_{S} = R_{T_{X}} \left( 1 + jQ_{T_{X}} + \frac{Z_{R_{X} - T_{X_{ref}}}}{R_{T_{X}}} \right)$$
(2.53)

Por un lado, la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_x$  es proporcional a la eficiencia  $\eta_{link}$ ; la cual es óptima debido al cumplimiento de la condición de resonancia del  $R_x$ . Por el otro, la no resonancia del circuito  $T_x$  implica una impedancia  $Z_s$  compleja, lo que afecta a la potencia  $P_{T_x}$  entregada por la fuente  $V_s$  y a la potencia final  $P_{MN}$  entregada al  $R_x$ .

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X} = \underbrace{\frac{V_S^2}{2|Z_S|^2} Re\{Z_S\}}_{P_{T_X}} \eta_{link}$$
(2.54)

#### Circuitos $T_X$ resonante y $R_X$ resonante.

La tercera topología, mostrada en la Fig. 2.22 (c), garantiza las resonancias de los circuitos  $T_X$  y  $R_X$ ; por lo que los valores analíticos de  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ ,  $\eta_{link}$ ,  $Z_S$  y  $P_{MN}$  han sido previamente calculados en las secciones 2.2 y 2.3 de este trabajo. A modo de resumen, sus respectivas expresiones se incluyen a continuación.

$$Z_{R_X - T_{X_{ref}}} = \frac{w^2 \widetilde{k_{T_X - R_X}^2 L_{T_X} L_{R_X}}}{R_{R_X} + Re\{Z_{MN}\}} = R_{R_X - T_{X_{ref}}}$$
(2.18)

$$\eta_{link} = \eta_{L_{T_X}} \eta_{L_{R_X}} = \underbrace{\frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L}}_{\eta_{L_{R_X}}} \underbrace{\frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} + 1}}_{\eta_{L_{T_X}}}$$
(2.23)

$$Z_S = R_{T_X} + R_{R_X - T_{X_{ref}}}$$
(2.37)

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X} = \frac{V_S^2}{2R_{T_X}} \frac{Q_{R_X - L}}{Q_L} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}}{\left(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} + 1\right)^2}$$
(2.39)

#### Circuitos $T_X$ resonante y $R_X$ no resonante.

La última de las topologías evaluadas consiste en un circuito  $T_x$  resonante y un circuito  $R_x$  no resonante, tal y como se muestra en la Fig. 2.22 (d). La no resonancia del circuito  $R_x$  implica una impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$  no máxima y de tipo complejo, como la expresada en (2.51).

$$Z_{R_X - T_{X_{ref}}} = \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}{1 + Q_{R_X} (j + 1/Q_L)} R_{T_X}$$
(2.51)

El hecho de obtener una impedancia  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$  de tipo complejo, y alejada de su máximo, afecta negativamente a la eficiencia  $\eta_{link}$ , como se indica en (2.52).

$$\eta_{link} = \eta_{L_{T_X}} \eta_{L_{R_X}} = \frac{Re\left\{Z_{R_X - T_{Xref}}\right\}}{R_{T_X} + Re\left\{Z_{R_X - T_{Xref}}\right\}} \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L}$$
(2.52)

Por otro lado, la resonancia del circuito  $T_x$  hace que la impedancia  $Z_s$  vista por la fuente de tensión  $V_s$  dependa únicamente de la resistencia de pérdidas de la bobina  $T_x$  y de la impedancia reflejada.

$$Z_S = R_{T_X} + Z_{R_X - T_{X_{ref}}} \tag{2.55}$$

Para concluir, la potencia  $P_{MN}$  entregada a al circuito  $R_X$  seguirá la respuesta expresada en (2.54), de forma que:

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X} = \frac{V_S^2}{2|Z_S|^2} Re\{Z_S\}\eta_{link}$$
(2.54)

A modo de resumen, deben considerarse varias conclusiones relevantes extraídas del estudio realizado respecto a la influencia de las resonancias de los circuitos  $T_X$  y  $R_X$  sobre el rendimiento del sistema WPT.

## • La resonancia del circuito $R_X$ afecta a la eficiencia del enlace $\eta_{link}$ , a través de la eficiencia $\eta_{L_{T_X}}$ de la bobina $T_X$ .

La impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$  es fuertemente dependiente de la resonancia del circuito  $T_X$ ; de forma que su valor máximo  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  se alcanza cuando se cumple la citada condición de resonancia. Por tanto, dependiendo del cumplimiento de la condición de  $wL_{R_X} = -Im\{Z_{MN}\}$ , los posibles valores de  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$  quedan reflejados en (2.56).

$$Z_{R_X-T_{X_{ref}}} = \begin{cases} \frac{w^2 k_{T_x-R_X}^2 L_{T_X} L_{R_X}}{R_{R_X} + R_L}, & R_X \text{ si resonante} \\ \\ \frac{w^2 k_{T_x-R_X}^2 L_{T_X} L_{R_X}}{R_{R_X} + jw L_{R_X} + R_L}, & R_X \text{ no resonante} \end{cases}$$
(2.56)

Por otro lado, la eficiencia de la bobina  $T_x$  tiende a su valor límite superior de  $\eta_{L_{T_X}} = 1$  cuando se cumple que  $Re\left\{Z_{R_X-T_{X_{ref}}}\right\} \gg R_{T_X}$ ; por lo que valores más elevados de  $Re\left\{Z_{R_X-T_{X_{ref}}}\right\}$  supondrán un incremento en la eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$ ; según lo demostrado en la sección 2.2.

$$\eta_{L_{T_X}} = \frac{Re\left\{Z_{R_X - T_{X_{ref}}}\right\}}{R_{T_X} + Re\left\{Z_{R_X - T_{X_{ref}}}\right\}}$$
(2.11)

Estudiando la parte real de la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , cuyos valores se muestran en (2.57), es posible advertir que el circuito no resonante presenta un valor más bajo de  $Re\{Z_{R_X-T_{X_{ref}}}\}$ ; ya que este se ve afectado por el término frecuencial  $(wL_{T_X})^2$  en su denominador.

$$Re\left\{Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}}\right\} = \begin{cases} \frac{w^{2}k_{T_{x}-R_{X}}^{2}L_{T_{x}}L_{R_{x}}}{R_{R_{x}}+R_{L}}, & R_{X} \text{ si } resonante\\ \frac{w^{2}k_{T_{x}-R_{x}}^{2}L_{T_{x}}L_{R_{x}}(R_{R_{x}}+R_{L})}{(R_{R_{x}}+R_{L})^{2}+(wL_{T_{x}})^{2}}, & R_{X} \text{ no } resonante \end{cases}$$
(2.57)

Por tanto, queda demostrado como la no resonancia del circuito  $R_x$  propicia un decremento en la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ ; lo que repercute en una reducción de la eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$  respecto a su valor máximo alcanzado en condiciones de resonancia.

#### • La resonancia del circuito $T_X$ afecta a la potencia entregada por la fuente $P_{T_X}$ .

La impedancia  $Z_s$ , vista por la fuente  $V_s$ , es dependiente de la resonancia del circuito  $T_x$ ; además de ser proporcional a la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ . Los valores alcanzados por dicha impedancia  $Z_s$ , bajo las condiciones de resonancia del circuito  $T_x$ , se muestran en la expresión (2.58).

$$Z_{S} = \begin{cases} R_{T_{X}} + Z_{R_{X} - T_{X_{ref}}}, & T_{X} \text{ si resonante} \\ \\ R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} + Z_{R_{X} - T_{X_{ref}}}, & T_{X} \text{ no resonante} \end{cases}$$
(2.58)

A su vez, la potencia  $P_{T_X}$  entregada por la fuente  $V_s$ , es mayor cuanto más pequeño es el módulo de la impedancia  $Z_s$ , siguiendo el comportamiento descrito en la sección 2.3, e indicado en la ecuación (2.35).

$$P_{T_X} = \frac{V_S^2}{2|Z_S|^2} Re\{Z_S\}$$
(2.35)

El análisis del módulo de la impedancia  $Z_s$ , incluido en (2.59), prueba que la no resonancia del  $T_x$  implica la obtención de valores de  $|Z_s|^2$  más elevados, debido al efecto del término  $wL_{T_x}$  dependiente de la frecuencia.

$$|Z_{S}|^{2} = \begin{cases} \left(R_{T_{X}} + Re\left\{Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}}\right\}\right)^{2} + \left(Im\left\{Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}}\right\}\right)^{2}, & T_{X} \text{ si resonante} \\ \left(R_{T_{X}} + Re\left\{Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}}\right\}\right)^{2} + \left(wL_{T_{X}} + Im\left\{Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}}\right\}\right)^{2}, & T_{X} \text{ no resonante} \end{cases}$$
(2.59)

De esta forma, el impacto negativo de la no resonancia del circuito  $T_x$  sobre la potencia  $P_{T_x}$  entregada por la fuente de tensión  $V_s$  queda probado. Así, como se ha demostrado en la sección 2.3 de este trabajo, la máxima potencia entregada por la fuente  $V_s$  requiere del cumplimiento de la condición de resonancia del circuito  $T_x$ , de forma que  $wL_{T_x} = 1/wC_{T_x}$ .

#### • La resonancia del circuito $R_X$ afecta a la potencia entregada por la fuente $P_{T_X}$ .

La observación de la expresión (2.59) permite distinguir la influencia de la resonancia del circuito  $R_x$  sobre la impedancia  $Z_s$  vista por la fuente de tensión  $V_s$ . En un principio, el cumplimiento de la condición de resonancia del circuito  $R_x$ ; de forma que  $Im \{Z_{R_x-T_{x_{ref}}}\} = 0$ ; implicaría que el módulo de la impedancia  $Z_s$  se viese reducido. En realidad, como se ha demostrado en la sección 2.2, la resonancia del circuito  $R_x$  produce una maximización en la impedancia reflejada  $R_{R_x-T_{x_{ref}}}$ ; lo que supone un aumento de la impedancia  $Z_s$  y de un decremento en la potencia  $P_{T_x}$ .

A modo de ejemplo, se ha analizado el funcionamiento de un sistema WPT con frecuencia de resonancia inicial de  $f_0 = 13.56 \ MHz$ , una fuente de tensión alterna con valor de pico  $V_S = 1 \ V$ , un factor de calidad de la carga de  $Q_L = 50$ , unos factores de calidad de las bobinas  $T_X \ Y \ R_X$  iguales y con valores de  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = [0, 1000]$ , y un coeficiente de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = 0.01$ . Dicho sistema se ha evaluado considerando las cuatro posibles combinaciones de resonancia en sus circuitos  $T_X \ Y \ R_X$ ; y los resultados relativos a la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ , eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$  de bobina  $T_X$ , eficiencia  $\eta_{L_{R_X}}$  de bobina  $R_X$ , potencia  $P_{T_X}$  entregada por la fuente, y potencia  $P_{MN}$ entregada a la carga, se muestran en la Fig, respectivamente. Los resultados mostrados sustentan las conclusiones de resonancia; incluyendo:

- La eficiencia  $\eta_{L_{R_X}}$  de la bobina  $R_X$  es independiente de las condiciones de resonancia, según la expresión (2.7); y dicho comportamiento es distinguible en los resultados incluidos en la Fig. 2.25.
- La eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$  de la bobina  $T_X$  depende únicamente de la resonancia del circuito  $R_X$ ; tendiendo a su valor máximo de  $\eta_{L_{T_X}} = 1$  cuando se asegura la resonancia en el receptor ( $wL_{R_X} = -Im\{Z_{MN}\}$ ) y se cumple la condición de  $k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X-L} \gg 1$  indicada en (2.23); como se observa en la Fig. 2.24.
- La eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ , mostrada en la Fig. 2.23, presenta idéntica dependencia con la resonancia del  $R_X$ , debido a la relación  $\eta_{link} = \eta_{L_{T_X}} \eta_{L_{R_X}}$ ; siendo completamente independiente de la resonancia del circuito  $T_X$ .
- La potencia  $P_{T_X}$  entregada por la fuente  $V_S$  depende de las resonancias de ambos circuitos. Por un lado, la resonancia del circuito  $T_X$  implica la reducción del módulo de la impedancia  $Z_S$  vista por la fuente de tensión; lo que produce un aumento de la intensidad  $i_{T_X}$  fluyendo por el circuito y una mayor potencia suministrada  $P_{T_X}$ ; tal y como puede apreciarse en la Fig. 2.26.
- Por otro lado, la resonancia del circuito  $R_x$  implica una impedancia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  máxima y de tipo resistivo; lo que repercute en una impedancia  $Z_s$  con módulo más alto; y que limita el flujo de intensidad  $i_{T_X}$  por el circuito y la potencia  $P_{T_X}$  suministrada por la fuente; como se observa en la Fig. 2.26.
- La potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$  sigue la relación  $P_{MN} = \eta_{link}P_{T_X}$ , por lo que la mayor potencia  $P_{MN}$  se obtendrá para la condición de resonancia que presente el compromiso óptimo entre la maximización de la eficiencia  $\eta_{link}$  y de la potencia entregada  $P_{T_X}$ . Así, para el caso estudiado de una fuente de tensión  $V_S$  y circuitos resonantes serie, el cumplimiento de las condiciones de resonancia del  $T_X$  y  $R_X$  supone la solución óptima; tal y como se puede distinguir en la Fig. 2.27. En este caso, la resonancia del  $T_X$  y  $R_X$  produce los mejores resultados de eficiencia  $\eta_{link}$ , y de potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$ ; sin llegar a ser la opción que presenta la mayor potencia  $P_{T_X}$  suministrada por la fuente.



Fig. 2.23. Influencia de resonancias del  $T_X$  y  $R_X$  sobre la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ .



Fig. 2.24. Influencia de resonancias del  $T_X$  y  $R_X$  sobre la eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$  de la bobina  $T_X$ .



Fig. 2.25. Influencia de resonancias del  $T_X$  y  $R_X$  sobre la eficiencia  $\eta_{L_{R_X}}$  de la bobina  $R_X$ .



Fig. 2.26. Influencia de resonancias del  $T_X$  y  $R_X$  sobre la potencia  $P_{T_X}$  entregada por la fuente de tensión  $V_S$ .



Fig. 2.27. Influencia de resonancias del  $T_X$  y  $R_X$  sobre la potencia entregada al circuito receptor  $P_{MN}$ .

Como resumen, la Tabla 2-1 contiene los datos de  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ ,  $Z_S$ ,  $P_{T_X}$ ,  $\eta_{link}$  y  $P_{MN}$ , para el sistema WPT del ejemplo; de forma que puedan apreciarse las magnitudes de cada uno de los parámetros para el caso particular de  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = 200$  y  $k_{T_X-R_X} = 0.01$ .

T <sub>X</sub>	R <sub>X</sub>	$Z_{R_X-T_{Xref}}$	$Z_S$	$P_{T_X}$	$\eta_{link}$	P <sub>MN</sub>
No res.	No res.	(2.5 – j100) mΩ	(5 + j1000) Ω	2.5 μW	0.04 %	l nW
No res.	Sí res.	4 Ω	(9 + j1000) Ω	4.5 μW	35.5 %	1.6 µW
Sí res.	Sí res.	4 Ω	9 Ω	55.5 mW	35.5 %	20 mW
Sí res.	No res.	(2.5 – j100) mΩ	$(5000 - j100) \mathrm{m}\Omega$	100 mW	0.04 %	40 μW

Tabla 2-1. Parámetros de sistema WPT bajo distintas condiciones de resonancia de  $T_X$  y  $R_X$ .

Para concluir el estudio del impacto de la resonancia de los circuitos  $T_X$  y  $R_X$  sobre el rendimiento del sistema WPT, se incluye un análisis de las topologías del circuito  $R_X$  y su influencia sobre la eficiencia  $\eta_{link}$  y potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$ . El sistema utilizado como ejemplo es idéntico al descrito previamente; con  $f_0 = 13.56$  MHz,  $V_S = 1$  V,  $R_{T_X} = R_{R_X} = 50$ ,  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = 200$ , y  $k_{T_X-R_X} = 0.01$ .

Así pues, se han cuantificado la eficiencia  $\eta_{link}$  y potencia  $P_{MN}$  de un sistema WPT como el mostrado en la Fig. 2.7 y en la Fig. 2.9, donde el circuito  $T_x$  presenta resonancia serie; mientras que se han evaluado dos circuitos  $R_x$ , con topologías de resonancia serie y paralelo. Los resultados incluidos en la Fig. 2.28 y la Fig. 2.29, como se ha demostrado en la sección 2.2, prueban que la topología de circuito  $R_x$  resonante serie es más adecuada para sistemas con cargas del orden de magnitud de las pérdidas de la bobina  $R_L \cong R_{T_X} = R_{R_X}$ . Por el contrario, la topología resonante paralelo es recomendable para aquellos casos en los que el sistema deba operar con resistencias de carga  $R_L$  de magnitudes mucho mayores que  $R_{T_X}$  y  $R_{R_X}$  [1].



Fig. 2.28. Eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  frente al valor de la carga  $R_L$ , para topologías de circuito  $R_X$  resonantes serie y paralelo; adaptado de [1].



Fig. 2.29. Potencia entregada al circuito receptor  $P_{MN}$  frente al valor de la carga  $R_L$ , para topologías de circuito  $R_X$  resonantes serie y paralelo; adaptado de [1].

### 2.6 Efecto de división de frecuencia.

Atendiendo a la expresión general de la potencia entregada al circuito receptor,  $P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X}$ , y a la definición de la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  (2.23), un incremento en el coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  debería suponer siempre un aumento en la eficiencia  $\eta_{link}$  y de la potencia  $P_{MN}$ . Sin embargo, la Fig. 2.20 muestra un comportamiento opuesto, para el que valores de  $k_{T_X-R_X}$  y  $Q_{T_X} = Q_{R_X}$  elevados fuerzan una reducción de la potencia entregada  $P_{MN}$ . Este comportamiento se debe a que, para casos de coeficientes de acoplo altos o sobre acoplo, la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$  es significativamente grande; lo que implica una elevada impedancia  $Z_S$  vista por la fuente  $V_S$ . El uso de una fuente de tensión  $V_S$  en el sistema supone que los aumentos en  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$  y  $Z_S$  reduzcan la intensidad  $i_{T_X}$ fluyendo por el circuito; razón por la cual la potencia  $P_{MN}$  [1].

Sin embargo, en estos casos, una ligera variación de la frecuencia de resonancia resulta en una reducción de la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , según (2.15); incrementando la potencia  $P_{T_X}$  y, en consecuencia, la potencia  $P_{MN}$ . Este efecto, a partir del que la operación a frecuencias diferentes de la resonancia individual de cada bobina ( $w_{res} = 1/\sqrt{L_{T_X}C_{T_X}} = 1/\sqrt{L_{R_X}C_{R_X}}$ ) implica la obtención de mayor potencia  $P_{MN}$  entregada al  $R_X$ , se denomina efecto de división de frecuencias (*Frequency Splitting Effect*) [1].

Una primera explicación de este fenómeno se basa en considerar las dos bobinas resonantes como dos resonadores acoplados L-C; de forma que presentan dos frecuencias naturales de resonancia [1] [8]. Así pues, asumiendo dos resonadores L-C idénticos, y con una inductancia mutua de valor *M*, las frecuencias naturales de resonancia del sistema se pueden definir con las expresiones  $w^+ = 1/\sqrt{(L+M)C}$  y  $w^- = 1/\sqrt{(L-M)C}$ . En el caso de una inductancia mutua *M* mucho menor que las autoinductancias *L*, ambas frecuencias naturales serán idénticas a la frecuencia de resonancia individual de cada oscilador, de forma que  $w^+ = w^- = 1/\sqrt{LC}$  [1] [8]. Por el contrario, para aquellos casos en los que el valor de *M* no es despreciable respecto al de las autoinductancias *L*, se observarán dos frecuencias naturales diferenciadas. Así pues, bajo esta última condición de *M* « *L*, el sistema presentará la máxima entrega de potencia cuando la frecuencia de la fuente *V<sub>s</sub>* sea igual a alguna de las frecuencias naturales de sistema w<sup>+</sup> y/o w<sup>-</sup> [1] [8].

Con la finalidad de estudiar este comportamiento, se ha utilizado el sistema WPT resonante serie - serie mostrado en la Fig. 2.30. En este sistema, las capacidades  $C_{T_X}$  y  $C_{R_X}$  han sido seleccionadas para resonar a  $f_0 = 13.56$  MHZ con las autoinductancias  $L_{T_X}$  y  $L_{R_X}$ , respectivamente. Además, los factores de calidad de la carga  $R_L$ , bobina  $T_X$  y bobina  $R_X$  toman los valores  $Q_L = 50$  y  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = 200$ . Para terminar, la resistencia parásita de la bobina transmisora es igual a  $R_{T_X} = 5 \Omega$ ; mientras que el sistema se excita con una fuente de tensión alterna, con valor de pico igual a  $V_S = 5$  V.

El efecto de división de frecuencias se observa en el sistema utilizado de ejemplo mediante un doble barrido de parámetros. Por un lado, el coeficiente de acoplo se ha variado en el rango de  $k_{T_X-R_X} = [0 \ 0.05]$ , alcanzando valores próximos al sobre acoplo. Por otro lado, la frecuencia de operación del sistema se ha evaluado dentro de la banda  $f_0 = [12.5, 14.5]$  MHz, con una frecuencia central próxima a  $f_0 = 13.56$  MHz.



Fig. 2.30. Ejemplo de sistema WPT resonante serie – serie, utilizado para el estudio del fenómeno de división de frecuencias; adaptado de [1].

El efecto del coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  sobre la frecuencia f a la que se obtiene la máxima eficiencia  $\eta_{link}$  de transferencia de potencia del enlace puede observarse en la Fig. 2.31. En los resultados mostrados puede apreciarse como la máxima eficiencia  $\eta_{link}$  siempre ocurre para la frecuencia de resonancia de los pares L-C de los circuitos  $T_X$  y  $R_X$ , de forma que  $w_{res} = 1/\sqrt{L_{T_X}C_{T_X}} = 1/\sqrt{L_{R_X}C_{R_X}}$ . Esta respuesta confirma el comportamiento esperado para la eficiencia  $\eta_{link}$ , cuya dependencia analítica con la frecuencia, considerando el circuito de la Fig. 2.30 como no resonante, puede expresarse como:

$$\eta_{link} = \eta_{L_{T_X}} \eta_{L_{R_X}} = \frac{Re\left\{Z_{R_X - T_{Xref}}\right\}}{\underbrace{R_{T_X} + Re\left\{Z_{R_X - T_{Xref}}\right\}}_{\eta_{T_{R_X}}}} \underbrace{\frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L}}_{\eta_{L_{R_X}}}$$
(2.52)

Donde la dependencia con la frecuencia afecta directamente a la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ ; siendo  $\eta_{L_{R_X}}$  independiente de la frecuencia, como se observa en la ecuación (2.7). Atendiendo a la indicado en (2.52), la eficiencia  $\eta_{link}$  será mayor cuanto más elevado sea el valor de  $Re\{Z_{R_X-T_{X_{ref}}}\}$ . El estudio del circuito eléctrico de la Fig. 2.30 permite obtener la expresión del valor de la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$  en función de la variación de la frecuencia de operación respecto a la frecuencia de resonancia; indicado como  $(w/w_{res})$ .

$$\begin{split} Z_{R_{X}-T_{Xref}} &= \frac{w^{2}k_{T_{X}-R_{X}}^{2}L_{T_{X}}L_{R_{X}}}{R_{R_{X}} + jwL_{R_{X}} + Z_{MN}} \\ &= \frac{w^{2}k_{T_{X}-R_{X}}^{2}L_{T_{X}}L_{R_{X}}}{R_{R_{X}} + jwL_{R_{X}} + \left(\frac{1}{jwC_{R_{X}}} + R_{L}\right)}{Z_{MN}} \\ &= \frac{w^{2}k_{T_{X}-R_{X}}^{2}L_{T_{X}}L_{R_{X}}}{R_{R_{X}} + R_{L} + jwL_{R_{X}}\left(1 - \frac{1}{w^{2}C_{R_{X}}L_{R_{X}}}\right)}{\frac{w_{res}=1/\sqrt{L_{R_{X}}C_{R_{X}}}}{W_{res}=1/\sqrt{L_{R_{X}}C_{R_{X}}}} \end{split}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{w^{2}k_{T_{X}-R_{X}}^{2}L_{T_{X}}L_{R_{X}}}{R_{R_{X}} + R_{L} + jwL_{R_{X}}\left(1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2}\right)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}wL_{T_{X}}WL_{T_{X}}}}{wL_{R_{X}}\left(\frac{R_{R_{X}}}{WL_{R_{X}}} + \frac{R_{L}}{WL_{R_{X}}} + j\left(1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2}\right)\right)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}wL_{T_{X}}}}{\frac{1}{Q_{L}} + Q_{R_{X}}} + jQ_{L}Q_{R_{X}}\left(1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2}\right)} R_{T_{X}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{L}Q_{R_{X}}Q_{T_{X}}}}{Q_{L} + Q_{R_{X}}} + jQ_{L}Q_{R_{X}}\left(1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2}\right)} R_{T_{X}}} \end{aligned}$$

Una vez conocida la expresión de la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , es posible obtener el valor de su parte real, de forma que:

$$Re\left\{Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}}\right\} = \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{L}Q_{R_{X}}Q_{T_{X}}}{\left(Q_{L}+Q_{R_{X}}\right)^{2} + \left[Q_{L}Q_{R_{X}}\left(1-\left(\frac{W_{res}}{W}\right)^{2}\right)\right]^{2}}R_{T_{X}}\left(Q_{L}+Q_{R_{X}}\right)$$
(2.61)

Como puede apreciarse en la ecuación (2.61), el valor máximo de  $Re\left\{Z_{R_X-T_{X_{ref}}}\right\}$  se obtiene para  $w = w_{res}$ ; por lo que el funcionamiento del sistema WPT de la Fig. 2.30 a la frecuencia de resonancia  $w_{res} = 1/\sqrt{L_{R_X}C_{R_X}} = 1/\sqrt{L_{T_X}C_{T_X}}$  garantiza la maximización de la eficiencia  $\eta_{link}$  respecto a la frecuencia; tal y como se puede observar en los resultados presentados en la Fig. 2.31.



Fig. 2.31. Efecto del fenómeno de división de frecuencias sobre la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ , para el caso de sistemas WPT sobre acoplados.

A su vez, el efecto del coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  sobre la frecuencia a la que se obtiene la máxima potencia  $P_{MN}$  entregada al  $R_X$  se muestra en la Fig. 2.32. Es fácilmente apreciable en la Fig. 2.32 como la máxima potencia  $P_{MN}$ , para casos de sobre acoplo, se produce a frecuencias distintas de  $w_{res} = 1/\sqrt{L_{R_X}C_{R_X}} = 1/\sqrt{L_{T_X}C_{T_X}}$ . Un análisis del circuito de la Fig. 2.30 permite obtener la expresión analítica de  $P_{MN}$  en función de la desviación de la frecuencia de operación respecto a la frecuencia de resonancia,  $(w/w_{res})$ , obteniéndose:

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X} \tag{2.6}$$

Donde se ha demostrado en (2.61) que la máxima eficiencia  $\eta_{link}$  se obtiene para una frecuencia de operación  $w = w_{res}$ . Por el contrario, la máxima potencia  $P_{T_X}$ suministrada por la fuente de tensión  $V_s$  se dará para valores mínimos de impedancia reflejada  $Z_{T_X-R_{X_{ref}}}$ , según (2.35); lo que implica que la resonancia del  $R_X$ impide la maximización de la potencia  $P_{T_X}$ . En este sentido, la expresión de la impedancia vista por la fuente,  $Z_s$ , proporciona la justificación de este comportamiento.

$$Z_{S} = R_{T_{X}} + \frac{1}{jwC_{T_{X}}} + jwL_{T_{X}} + Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}}$$

$$= R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} \left( \frac{-1}{w^{2} \underbrace{C_{T_{X}}L_{T_{X}}}{1/w_{res}^{2}}} + 1 \right) + Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}}$$

$$= R_{T_{X}} + jwL_{T_{X}} \left( 1 - \left( \frac{w_{res}}{w} \right)^{2} \right) + Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}}$$
(2.62)

$$= R_{T_{X}} + jR_{T_{X}}Q_{T_{X}}\left(1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2}\right) + Z_{R_{X} - T_{Xref}}$$

$$= R_{T_{X}} + jR_{T_{X}}Q_{T_{X}}\left(1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2}\right) + \underbrace{\frac{k_{T_{X} - R_{X}}^{2}Q_{L}Q_{R_{X}}Q_{T_{X}}}{Q_{L} + Q_{R_{X}} + jQ_{L}Q_{R_{X}}\left(1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2}\right)}_{Z_{R_{X} - T_{Xref}}}R_{T_{X}}$$

Si se procede al estudio del valor absoluto  $|Z_S|$ , es factible conocer el impacto de la frecuencia de operación sobre la potencia entregada por la fuente de tensión  $P_{T_X}$ ; ya que según (2.35),  $P_{T_X} = \frac{V_S^2}{2|Z_S|^2} Re\{Z_S\}$ .

$$\begin{aligned} |Z_{S}|^{2} &= \left| R_{T_{X}} + jR_{T_{X}}Q_{T_{X}} \left( 1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2} \right) \right. \\ &+ \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{L}Q_{R_{X}}Q_{T_{X}}R_{T_{X}} \left[ Q_{L} + Q_{R_{X}} - jQ_{L}Q_{R_{X}} \left( 1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2} \right) \right]}{\left( Q_{L} + Q_{R_{X}} \right)^{2} + \left[ Q_{L}Q_{R_{X}} \left( 1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2} \right) \right]^{2}} \right]^{2}} \\ &= \left( R_{T_{X}} + \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{L}Q_{R_{X}}Q_{T_{X}}R_{T_{X}}(Q_{L} + Q_{R_{X}})}{\left( Q_{L} + Q_{R_{X}} \right)^{2} + \left[ Q_{L}Q_{R_{X}} \left( 1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2} \right) \right]^{2}} \right)^{2} \\ &+ \left( R_{T_{X}}Q_{T_{X}} \left( 1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2} \right) - \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{L}^{2}Q_{R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}R_{T_{X}} \left( 1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2} \right) }{\left( Q_{L} + Q_{R_{X}} \right)^{2} + \left[ Q_{L}Q_{R_{X}} \left( 1 - \left(\frac{w_{res}}{w}\right)^{2} \right) \right]^{2}} \right)^{2} \end{aligned}$$

Así pues, según lo demostrado en (2.63), y los resultados presentados en la Fig. 2.32, puede afirmarse que la operación a frecuencias distintas de  $w_{res}$  permite reducir, tanto la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , como el módulo de la impedancia  $Z_S$  vista por la fuente; lo que hace que la fuente de tensión  $V_S$  suministre una potencia  $P_{T_X}$  máxima para frecuencias de excitación desplazadas respecto a la resonancia original  $w_{res}$ .

En conclusión, para casos de coeficientes de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  elevados o sobre acoplo, y bobinas con altos factores de calidad, la máxima transferencia de potencia  $P_{MN}$  al circuito  $R_X$  se conseguirá operando a una de las dos frecuencias naturales del sistema, para las que se maximizará la potencia  $P_{T_X}$  entregada por la fuente de tensión  $V_S$ ; mientras que la máxima eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  seguirá obteniéndose para la frecuencia de resonancia original de  $w_{res} = 1/\sqrt{L_{R_X}C_{R_X}} =$  $1/\sqrt{L_{T_X}C_{T_X}}$ .



Fig. 2.32. Efecto del fenómeno de división de frecuencias sobre la potencia *P<sub>MN</sub>* entregada al *R<sub>x</sub>*, para el caso de sistemas WPT sobre acoplados.

A pesar de que el fenómeno de división de frecuencias ocurre para circuitos excitados con una fuente de tensión  $V_s$ , es necesario indicar que este efecto no tiene lugar para aquellos circuitos con fuente de intensidad  $I_s$ . En estos últimos, el aumento de la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_X}ref}$  y de la impedancia  $Z_s$  vista por la fuente no repercute negativamente en la potencia suministrada  $P_{T_X}$ , sino que es el efecto contrario el que tiene lugar; produciéndose la máxima potencia  $P_{T_X}$  suministrada y transferida  $P_{MN}$  al circuito receptor para una frecuencia de operación igual a la frecuencia de resonancia  $w_{res}$  [1].

Las principales formas de afrontar un descenso de la potencia  $P_{MN}$ , debido al efecto de división de frecuencias, pueden simplificarse en tres alternativas. En primer lugar, en caso de que la amplitud de la fuente de tensión  $V_S$  no esté limitada por las especificaciones del sistema, un aumento de dicha amplitud puede permitir alcanzar el nivel de potencia  $P_{MN}$  deseado sin necesidad de operar a una frecuencia distinta de  $w_{res}$ . En segundo lugar, si la tensión de pico  $V_S$  de la fuente de tensión está limitada, la operación a una de las frecuencias naturales del sistema ( $w^+$ ,  $w^-$ ) permitirá aumentar la potencia  $P_{MN}$  sin modificar la amplitud de la excitación del sistema. Finalmente, un diseño apropiado de la geometría de las bobinas  $L_{T_X}$  y  $L_{R_X}$  puede ser suficiente para evitar el efecto de división de frecuencias. En este caso, ambas bobinas deben diseñarse para no alcanzar un coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  excesivamente alto para la distancia mínima de separación  $D_{T_X-R_X}$  entre ellas [1].

## Análisis del fenómeno de división de frecuencias haciendo uso del modelo de tipo "T" del transformador

De forma alternativa, la interacción entre dos bobinas acopladas puede ser modelada haciendo uso del equivalente circuital en tipo "T", mostrado en la Fig. 2.33.



Fig. 2.33. Transformación para modelo equivalente de tipo "T"; (a) modelo de dos puertos para dos bobinas acopladas; (b) equivalencia utilizando el modelo de tipo "T"; adaptado de [1].

Este modelo es de utilidad a la hora de analizar el fenómeno de división de frecuencias para circuitos con sobre acoplo [1]. Por esta razón, se ha estudiado el sistema WPT utilizado de ejemplo, e incluido en la Fig. 2.30; aunque sustituyendo el modelo de bobinas acopladas por su equivalente de tipo "T"; tal y como se muestra en la Fig. 2.34.



Fig. 2.34. Ejemplo de sistema WPT resonante serie – serie, utilizado para el estudio del fenómeno de división de frecuencias, con modelo de tipo "T"; adaptado de [1].

Haciendo uso del circuito equivalente de la Fig. 2.34, es posible deducir el valor de la impedancia  $Z_s$  vista por la fuente de tensión  $V_s$ ; de forma que:

$$Z_{S} = R_{T_{X}} + \frac{1}{jwC_{T_{X}}} + jw(L_{T_{X}} - M_{T_{X} - R_{X}}) + \left[jwM_{T_{X} - R_{X}}\right] \left(R_{R_{X}} + jw(L_{R_{X}} - M_{T_{X} - R_{X}}) + \frac{1}{jwC_{R_{X}}} + R_{L}\right) \right]$$
(2.64)

Como se puede apreciar, la expresión de  $Z_s$  obtenida es idéntica a la calculada en (2.62) para el circuito de la Fig. 2.30, basado en el modelo de 2 puertos de las bobinas acopladas.

Así pues, en caso de que la inductancia mutua  $M_{T_X-R_X}$  tome un valor mucho menor que las autoinductancias  $L_{T_X}$  y  $L_{R_X}$ , es fácilmente distinguible como la impedancia  $Z_s$  será puramente real siempre que la frecuencia de operación sea igual a la frecuencia de resonancia  $w_{res} = 1/\sqrt{L_{R_X}C_{R_X}} = 1/\sqrt{L_{T_X}C_{T_X}}$ . Sin embargo, para situaciones en las que la magnitud de  $M_{T_X-R_X}$  sea comparable a  $L_{T_X}$  y  $L_{R_X}$ , el sistema presentará dos frecuencias naturales diferentes  $w^+$  y  $w^-$ ; mientras que la impedancia  $Z_s$  seguirá siendo real para la condición de  $w = w_{res}$ , como se aprecia en la expresión (2.64). Por tanto, en caso de forzar la operación del sistema a una de las frecuencias naturales  $w \neq w_{res} = 1/\sqrt{L_{R_X}C_{R_X}} = 1/\sqrt{L_{T_X}C_{T_X}}$ , la impedancia  $Z_s$ obtenida será de tipo complejo. En conclusión, debe tenerse presente que, para sistemas sobre acoplados, las frecuencias naturales que maximizan la potencia  $P_{MN}$ entregada al  $R_X$  son diferentes de la frecuencia  $w_{res} = 1/\sqrt{L_{R_X}C_{R_X}} = 1/\sqrt{L_{T_X}C_{T_X}}$  que cancela la parte imaginaria de la impedancia de entrada del sistema,  $Z_s$  [1] [8] [9].

## 3 Punto óptimo de operación

A lo largo del capítulo 2 se ha demostrado como, para conseguir una elevada eficiencia de transferencia de potencia (*Power Transfer Efficiency*, PTE) del enlace  $\eta_{link}$ , junto con una alta potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$ , es importante adaptar la impedancia de entrada  $Z_{MN}$  del circuito  $R_X$  al resto del enlace inductivo; como se aprecia en la Fig. 3.1 [1]. Por tanto, cuanto mayor sea la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ , mayor será la eficiencia de transferencia de potencia total  $\eta_{TOT} = \eta_{T_X} \eta_{link} \eta_{R_X}$ ; mientras que una mayor potencia  $P_{MN}$  implicará más potencia  $P_L$  entregada a la carga (*Power Delivered to the Load*, PDL), según  $P_L = P_{MN} \eta_{R_X}$  [1].



Fig. 3.1. Esquema simplificado de sistema WPT con dos bobinas; utilizado para definir las eficiencias η<sub>link</sub>, η<sub>Tx</sub> y η<sub>Rx</sub>; y adaptado de [1].

En principio, como se ha discutido en la sección 2.5, el cumplimiento de la condición de resonancia del  $R_x$ , implica el aumento de la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  y de la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_x$ . Adicionalmente, la parte real de la impedancia  $Z_{MN}$  también puede optimizarse, de forma que se consiga la maximización de  $\eta_{link}$  o  $P_{MN}$ ; repercutiendo en la maximización de la eficiencia PTE o la potencia PDL del sistema [1]. En este sentido, el presente capítulo se centra en el estudio de la influencia de la impedancia  $Z_{MN}$  de entrada del circuito  $R_x$  sobre los parámetros de eficiencia  $\eta_{TOT}$  y de potencia  $P_L$  del sistema WPT.

A modo de ejemplo, la influencia de la impedancia  $Z_{MN}$  sobre la eficiencia  $\eta_{link}$  y la potencia  $P_{MN}$  se ha analizado en el modelo del sistema WPT de la Fig. 3.2. Este sistema presenta una frecuencia de resonancia de  $f_0 = 13.56$  MHz, una fuente de tensión alterna con valor de pico  $V_S = 1$  V, unas bobinas con factores de calidad de valor  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = 200$  y resistencias de pérdidas de  $R_{T_X} = R_{R_X} = 5 \Omega$ , y un coeficiente de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = 0.01$ . La impedancia  $Z_{MN}$  se ha evaluado mediante la variación de sus partes real e imaginaria, dentro de los rangos de  $Re\{Z_{MN}\} = [0.5, 60] \Omega$  e  $Im\{Z_{MN}\} = [-1050, -950] \Omega$ , respectivamente.



Fig. 3.2. Modelo eléctrico de sistema WPT utilizado para introducir los conceptos de MEP y MPP; adaptado de [1].

Los resultados obtenidos de eficiencia  $\eta_{link}$  y potencia  $P_{MN}$  se muestran en las Fig. 3.3 y la Fig. 3.4. Como puede observarse, el cumplimiento de la condición de resonancia del  $R_x$ , según la expresión  $Im\{Z_{MN}\} = -wL_{R_x} = -1000 \Omega$ , implica la maximización de la eficiencia  $\eta_{link}$  y la potencia  $P_{MN}$ . Este comportamiento coincide con la dependencia esperada de  $\eta_{link}$  y  $P_{MN}$  respecto a la resonancia del circuito  $R_x$ ; tal y como se ha demostrado en el capítulo 2.

Por el contrario, la parte real  $Re\{Z_{MN}\}$  presenta dos valores diferentes para la maximización de la eficiencia  $\eta_{link}$  y la potencia  $P_{MN}$ , visibles en la Fig. 3.3 y la Fig. 3.4, respectivamente. En primer lugar, un valor de  $Re\{Z_{MN}\} = 11.32 \Omega$  supone la maximización de la eficiencia a  $\eta_{link} = 38.2 \%$ , dando lugar al denominado Punto de Máxima Eficiencia (*Maximum Efficiency Point*, MEP). Por otro lado, el valor de  $Re\{Z_{MN}\} = 25.14 \Omega$  implica la optimización de la potencia al valor de  $P_{MN} = 20 \text{ mW}$ ; alcanzándose el Punto de Máxima Potencia (*Maximum Power Point*, MPP). Adicionalmente, el Punto Óptimo de Operación del sistema (*Optimum Operation Point*, OOP) puede utilizarse indistintamente para referenciar al MEP o MPP; en función de cuál de los dos parámetros del enlace,  $\eta_{link}$  o  $P_{MN}$ , se desee optimizar [1].

En este sentido, la impedancia  $Z_{MN}$  puede ajustarse haciendo uso de una red de adaptación de impedancias, de forma que se pueda alcanzar alguno de los valores óptimos de  $Re\{Z_{MN}\}$  que den lugar a los puntos de MEP y/o MPP; mientras que se sigue asegurando el cumplimiento de la condición de resonancia del  $R_X$ . Sin embargo, como se aprecia en Fig. 3.3 y Fig. 3.4, la operación del sistema en puntos alejados de MEP y MPP puede dar lugar a importantes pérdidas en la eficiencia  $\eta_{link}$  y la potencia  $P_{MN}$ ; afectando directamente a los valores resultantes de PTE y PDL, respectivamente. Ese efecto puede apreciarse en la Tabla 3-1, donde se distingue que la operación en el punto de MEP implica la maximización de  $\eta_{link}$ , aunque la potencia entregada al circuito  $R_X$  se ve reducida en más de 5 mW respecto a su valor óptimo. De forma similar, la operación en el punto de MPP maximiza la potencia  $P_{MN}$ ; mientras que la eficiencia se ve reducida en más del 8 % respecto a su valor máximo alcanzable.

00P	$Re\{Z_{MN}\}(\Omega)$	$Im\{Z_{MN}\}(\Omega)$	η <sub>link</sub> (%)	$P_{MN}$ (mW)
MEP	11.32	-1000	38.18	14.85
MPP	25.14	-1000	30.04	20

Tabla 3-1. Resumen de datos para los puntos de MEP y MPP, calculados para el sistema WPT ejemplo.



Fig. 3.3. Eficiencia del enlace,  $\eta_{link}$ , en función de las partes real e imaginaria de la impedancia  $Z_{MN}$  de entrada del circuito  $R_X$ .



Fig. 3.4. Potencia entregada al circuito  $R_X$ ,  $P_{MN}$ , en función de las partes real e imaginaria de la impedancia  $Z_{MN}$  de entrada del circuito  $R_X$ .

# 3.1 Punto de máxima eficiencia (MEP) en sistema de dos bobinas

La eficiencia de transferencia de potencia,  $\eta_{link}$ , del enlace inductivo entre dos bobinas ha sido deducida en la sección 2.2; tomando la expresión analítica:

$$\eta_{link} = \eta_{L_{T_X}} \eta_{L_{R_X}} = \frac{Q_{R_X}}{\underbrace{Q_{R_X} + Q_L}_{\eta_{L_{R_X}}}} \underbrace{\frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} + 1}}_{\eta_{L_{T_X}}}$$
(2.23)

Como se verá en esta sección, la optimización de la eficiencia  $\eta_{link}$  según el factor de calidad de la carga,  $Q_L$ , permitirá obtener el MEP para el sistema. Así pues, es necesario calcular la derivada parcial de  $\eta_{link}$  respecto a  $Q_L$ ; atendiendo al siguiente desarrollo matemático:

$$\frac{\partial \eta_{link}}{\partial Q_L} = \frac{\partial}{\partial Q_L} \left\{ \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L} + 1} \right\}$$

$$= \frac{\partial}{\partial Q_L} \left\{ \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L} \right\}$$

$$= \frac{A(Q_L)}{B(Q_L)} = 0$$
(3.1)

Donde el numerador  $A(Q_L)$  y el denominador  $B(Q_L)$  de la derivada presentan las siguientes expresiones:

$$A(Q_L) = k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 (Q_{R_X} + Q_L) (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L) - k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_L [(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L) + (Q_{R_X} + Q_L) (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1)]$$
(3.2)

$$B(Q_L) = \left(Q_{R_X} + Q_L\right)^2 \left(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L\right)^2$$
(3.3)

Para obtener  $\frac{\partial \eta_{link}}{\partial Q_L} = 0$  es necesario encontrar el valor de  $Q_L$  que asegure que el numerador de la expresión (3.1) sea igual a cero; de forma que:

$$A(Q_L) = k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 (Q_{R_X} + Q_L) (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L) - k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_L [(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L) + (Q_{R_X} + Q_L) (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1)]$$
(3.4)

$$= k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} (Q_{R_{X}} + Q_{L}) (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} Q_{L} + Q_{R_{X}} + Q_{L}) - k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} Q_{L} (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} Q_{L} + Q_{R_{X}} + Q_{L}) - k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} Q_{L} (Q_{R_{X}} + Q_{L}) (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} + 1) = k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} \{ (Q_{R_{X}} + Q_{L}) (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} Q_{L} + Q_{R_{X}} + Q_{L}) - Q_{L} (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} Q_{L} + Q_{R_{X}} + Q_{L}) - Q_{L} (Q_{R_{X}} + Q_{L}) (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} + 1) \} = k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} \{ Q_{R_{X}} (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} Q_{L} + Q_{R_{X}} + Q_{L}) + Q_{L} (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} Q_{L} + Q_{R_{X}} + Q_{L}) - Q_{L} (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} Q_{L} + Q_{R_{X}} + Q_{L}) - Q_{L} (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} Q_{L} + Q_{R_{X}} + Q_{L}) - Q_{L} (Q_{R_{X}} + Q_{L}) (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} + 1) \} = k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} \{ k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} Q_{L} + Q_{R_{X}}^{2} + Q_{R_{X}} Q_{L} - Q_{L} Q_{R_{X}} - Q_{L}^{2} \} = k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} \{ Q_{R_{X}}^{2} - k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} Q_{L}^{2} - Q_{L}^{2} \} = 0$$

Por tanto, la solución de  $Q_L$  que anula el numerador de la derivada  $\frac{\partial \eta_{link}}{\partial Q_L}$  puede expresarse como:

$$Q_{R_X}^2 - k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L^2 - Q_L^2 = 0 \Rightarrow Q_L = \frac{Q_{R_X}}{\sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}}$$
(3.5)

Finalmente, el valor óptimo de  $Q_{L_{opt-\eta}}$  para optimizar la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  queda determinado en la expresión (3.6).

$$Q_{L_{opt-\eta}} = \frac{Q_{R_X}}{\sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}}$$
(3.6)

Conocidas las definiciones del factor de calidad de la carga  $Q_L$  y de la bobina receptora  $Q_{R_X}$ , indicadas en (2.10) y (2.9), es posible reescribir la expresión del factor de calidad óptimo para el MEP en función de la parte real de la impedancia  $Z_{MN}$ , de la forma:

$$Re\left\{Z_{MN_{opt-\eta}}\right\} = \frac{wL_{R_{X}}}{Q_{L_{opt-\eta}}}$$
$$= \frac{wL_{R_{X}}}{\underbrace{Q_{R_{X}}}_{R_{R_{X}}}} \sqrt{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}}$$
$$= R_{R_{X}} \sqrt{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}}$$
(3.7)

Por tanto, adaptando la impedancia  $Z_{MN}$ , de forma que su parte real  $Re\{Z_{MN}\}$  sea igual al valor dado por la ecuación (3.7), se obtendrá la máxima eficiencia  $\eta_{link_{MAX}}$  de transferencia de potencia.

$$\begin{aligned} \eta_{link_{MAX}} &= \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_{L_{opt-\eta}} k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_{L_{opt-\eta}} + Q_{R_X} + Q_{L_{opt-\eta}}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}} \\ &= \frac{Q_{R_X} \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}}{Q_{R_X} \left(1 + \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}\right)} \\ &\cdot \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}{Q_{R_X} (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1) + Q_{R_X} \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}} \\ &= \frac{\sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}}{\left(1 + \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}\right)} \\ &\cdot \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}} \end{aligned}$$
(3.8)
$$&= \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}\right)} \\ &\cdot \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1 + \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}}{\sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}} \\ &= \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}\right)} \\ &\cdot \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1 + \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}}{\sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}} \\ &= \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}\right)} \cdot \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}{\sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}} \\ &= \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}\right)} \cdot \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}{\sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}} + 1} \\ &= \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1 + 1}{\left(\sqrt{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}} + 1 + 1\right)^2}} \end{aligned}$$

Por lo tanto, atendiendo a lo indicado en (2.17) y (3.7), la máxima eficiencia de transferencia de potencia del enlace,  $\eta_{link_{MAX}}$ , se producirá cuando la impedancia  $Z_{MN}$  cumpla dos condiciones: (1) la parte imaginaria garantice la resonancia del circuito  $R_X$ , de forma que su  $Im\{Z_{MN}\} = -wL_{R_X}$ ; (2) la parte real tome el valor óptimo dado por  $Re\{Z_{MN_{opt-\eta}}\} = R_{R_X}\sqrt{1 + k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}$ .

$$\frac{MEP}{\eta_{link_{MAX}}} \Longrightarrow \begin{cases} Re\left\{Z_{MN_{opt-\eta}}\right\} = R_{R_X}\sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}} \\ Im\left\{Z_{MN_{opt-\eta}}\right\} = -wL_{R_X} \end{cases}$$
(3.9)

Una primera interpretación de la existencia del valor óptimo de impedancia  $Z_{MN}$ , que maximiza la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ , surge de la definición de la eficiencia como  $\eta_{link} = \eta_{L_{R_X}} \eta_{L_{T_X}}$ ; donde las eficiencias individuales de las bobinas  $\eta_{L_{R_X}} y \eta_{L_{T_X}}$  se indican en (2.8) y (2.22), respectivamente. De esta forma, es posible expresar la eficiencia  $\eta_{link}$  de la forma:

$$\eta_{link} = \frac{\frac{R_{R_X - T_{Xref}}}{R_{T_X} + R_{R_X - T_{Xref}}}}{\frac{Re\{Z_{MN}\}}{\eta_{L_{R_X}}}} \frac{\frac{Re\{Z_{MN}\}}{R_{R_X} + Re\{Z_{MN}\}}}{\eta_{L_{R_X}}}$$
(3.10)

Adicionalmente, la eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$  depende de la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ ; la cual es máxima y de tipo resistivo siempre que se cumpla la condición de resonancia del circuito  $R_X$  ( $Im\{Z_{MN}\} = -wL_{R_X}$ ); de forma que:

$$R_{R_X - T_{X_{ref}}} = \frac{w^2 k_{T_X - R_X}^2 L_{T_X} L_{R_X}}{R_{R_X} + Re\{Z_{MN}\}}$$
(2.20)

Así pues, se puede apreciar que la eficiencia  $\eta_{L_{R_X}}$  es monótonamente creciente con la parte real  $Re\{Z_{ZM}\}$ . Este comportamiento se debe a que el aumento de  $Re\{Z_{ZM}\}$ implica que la potencia disipada en la resistencia  $R_{R_X}$  será menor; mientras que la potencia entregada al circuito  $R_X$  será mayor; resultando en un incremento de la eficiencia  $\eta_{L_{R_X}}$ . Por otro lado, la dependencia de la eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$  es de tipo monótono decreciente con  $Re\{Z_{ZM}\}$ . Así, un aumento de  $Re\{Z_{ZM}\}$  supone una menor resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$ ; lo que implica que la potencia disipada en  $R_{T_X}$  sea más significativa respecto a la potencia transferida a la bobina  $R_X$ , repercutiendo en una reducción de la eficiencia  $\eta_{L_{T_Y}}$ .

Por tanto, los cambios en  $Re\{Z_{ZM}\}$  producen variaciones opuestas en las eficiencias individuales de cada bobina,  $\eta_{L_{T_X}}$  y  $\eta_{L_{R_X}}$ ; por lo que existirá un valor óptimo de  $Re\{Z_{ZM}\}$  que suponga el mejor compromiso entre el crecimiento de  $\eta_{L_{R_X}}$  y el decrecimiento de  $\eta_{L_{T_X}}$ , y que maximice el producto  $\eta_{L_{T_X}}\eta_{L_{R_X}}$  y la eficiencia total del enlace  $\eta_{link}$  [1].
A modo de ejemplo de esta respuesta, se ha analizado el sistema de la Fig. 3.5; el cual cuenta con una frecuencia de resonancia de  $f_0 = 13.56$  MHz, unas bobinas con factores de calidad  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = 200$  y resistencias de pérdidas  $R_{T_X} = R_{R_X} = 5 \Omega$ , y un coeficiente de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = 0.01$ . En este caso, la Fig. 3.6 muestra los resultados de eficiencias  $\eta_{L_{T_X}}$ ,  $\eta_{L_{R_X}}$  y  $\eta_{link}$  en función del barrido de la parte real de la impedancia  $Z_{MN}$  en el rango  $Re\{Z_{ZM}\} = [0, 100] \Omega$ . Como es posible distinguir en la Fig. 3.6, y se ha anticipado en la expresión (3.10), la eficiencia  $\eta_{L_{R_X}}$  es monótona creciente con  $Re\{Z_{ZM}\}$ ; mientras que la eficiencia  $\eta_{L_{T_X}}$  es monótona decreciente con  $Re\{Z_{ZM}\}$ . Por tanto, el valor óptimo de  $Re\{Z_{ZM_{opt-\eta}}\} \cong 11.18 \Omega$  supone la solución de compromiso que maximiza el resultado del producto  $\eta_{L_{T_X}}\eta_{L_{R_X}}$  y la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  resultante.



Fig. 3.5. Sistema ejemplo para el estudio del valor óptimo de la impedancia  $Z_{MN}$  que implique la obtención del Punto de Máxima Eficiencia o MEP; adaptado de [1].



Fig. 3.6. Eficiencias  $\eta_{L_{T_X}}$ ,  $\eta_{L_{R_X}}$  y  $\eta_{link}$  en función de la parte real de la impedancia  $Z_{MN}$  de entrada del circuito  $R_X$ .

# **3.2** Punto de máxima transferencia de potencia (MPP) en sistema de dos bobinas

En la sección anterior, se ha demostrado la existencia de un valor de  $Re\{Z_{ZM}\}$  que produce la maximización de la eficiencia del enlace,  $\eta_{link}$ ; siempre que se asegure la condición de resonancia del circuito  $R_X$ . En este caso, se va a deducir y analizar la existencia de un valor alternativo de  $Re\{Z_{ZM}\}$  que implique la maximización de la potencia entregada al circuito  $R_X$ ,  $P_{MN}$ ; identificándose como el Punto de Máxima Potencia o MPP.

En este caso, la expresión de la potencia  $P_{MN}$ , como se demuestra en la sección 2.3, depende de la topología de circuito  $T_x$  utilizada. Por tanto, el valor óptimo de  $Re\{Z_{ZM}\}$  que maximice la potencia  $P_{MN}$  dependerá también de dicha topología del  $T_x$ . Así pues, en los apartados siguientes se evaluarán dos de los tipos de circuitos  $T_x$ más comunes: circuito con fuente de tensión  $V_s$  y capacidad resonante serie  $C_{T_x}$ , y circuito con fuente de intensidad  $I_s$  y capacidad resonante serie  $C_{T_x}$ .



Fig. 3.7. Modelo simplificado de sistema WPT con circuito  $T_x$  basado en una fuente de tensión y resonancia de tipo serie; adaptado de [1].



Fig. 3.8. Modelo simplificado de sistema WPT con circuito  $T_x$  basado en una fuente de intensidad y resonancia de tipo serie; adaptado de [1].

## **3.2.1 MPP para circuito TX con fuente de tensión y capacidad resonante serie.**

Para el caso de un circuito  $T_x$  como el mostrado en la Fig. 3.7; constituido por una fuente de tensión alterna con valor de pico  $V_s$ , junto con una resonancia serie formada por la capacidad  $C_{T_x}$  y la bobina  $L_{T_x}$ , la expresión de la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_x$  ha sido presentada en la sección 2.3.

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X}$$

$$= \frac{V_S^2}{2R_{T_X}} \frac{Q_{R_X-L}}{Q_L} \frac{k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X-L}}{\left(k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X-L} + 1\right)^2}$$

$$= \frac{V_S^2}{2R_{T_X}} \frac{Q_{R_X}}{Q_{R_X} + Q_L} \frac{k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} \frac{Q_{R_X} Q_L}{Q_{R_X} + Q_L}}{\left(k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} \frac{Q_{R_X} Q_L}{Q_{R_X} + Q_L} + 1\right)^2}$$

$$= \frac{V_S^2}{2R_{T_X}} \frac{k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_L}{\left(k_{T_X-R_X}^2 Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L\right)^2}$$
(2.39)

De forma análoga al caso de la eficiencia  $\eta_{link}$ , el valor óptimo de  $Re\{Z_{ZM}\}$  para maximizar la potencia  $P_{MN}$  se obtendrá a partir del estudio de la derivada parcial de la expresión de  $P_{MN}$  respecto al factor de calidad de la carga  $Q_L$ ; de forma que:

$$\frac{\partial P_{MN}}{\partial Q_L} = \frac{\partial}{\partial Q_L} \left\{ \frac{V_S^2}{2R_{T_X}} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_L}{\left(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L\right)^2} \right\} 
= \frac{V_S^2}{2R_{T_X}} \frac{\partial}{\partial Q_L} \left\{ \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_L}{\left(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L\right)^2} \right\}$$

$$= \frac{V_S^2}{2R_{T_X}} \frac{A(Q_L)}{B(Q_L)} = 0$$
(3.11)

Siendo  $A(Q_L)$  y  $B(Q_L)$  partes del numerador y del denominador de la derivada  $\frac{\partial P_{MN}}{\partial Q_L}$ , respectivamente; y estando representados por las siguientes expresiones:

$$A(Q_L) = k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L)^2 - k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_L [2(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1) \cdot (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L)]$$
(3.12)

$$B(Q_L) = \left(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L\right)^4$$
(3.13)

Para conseguir que  $\frac{\partial P_{MN}}{\partial Q_L} = 0$ , es necesario identificar el valor de  $Q_L$  que asegure que el numerador de la expresión (3.11) sea idéntico a cero; de la forma:

$$\begin{aligned} A(Q_L) &= k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L)^2 \\ &- k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_L [2(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1) \\ &\cdot (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L)] \\ &= k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 \left[ (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L)^2 \\ &- 2Q_L (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1) (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L) \right] \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$(3.14)$$

A partir de (3.14), la igualdad de  $A(Q_L) = 0$  puede reducirse a:

$$(k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L) - 2Q_L (k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} + 1) = k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L + Q_{R_X} + Q_L - 2k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L - 2Q_L = Q_{R_X} - k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L - Q_L = 0$$

$$(3.15)$$

Por lo tanto, el valor resultante de  $Q_L$  que anula el numerador de la derivada puede expresarse como:

$$Q_{R_X} - k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} Q_L - Q_L = 0 \Rightarrow Q_L = \frac{Q_{R_X}}{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}$$
(3.16)

En conclusión, el valor óptimo de  $Q_{L_{opt}-P_{MN}}$  necesario para maximizar la potencia  $P_{MN}$  queda determinado en la expresión (3.17).

$$Q_{L_{opt-P_{MN}}} = \frac{Q_{R_X}}{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}}$$
(3.17)

Haciendo uso de las definiciones del factor de calidad de la carga  $Q_L$  y de la bobina receptora  $Q_{R_X}$ , contenidas en (2.10) y (2.9), es factible presentar la expresión del factor de calidad óptimo para el MPP en función de la parte real de la impedancia  $Z_{MN}$ ; obteniéndose que:

$$Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\} = \frac{wL_{R_X}}{Q_{L_{opt-P_{MN}}}}$$
(3.18)

$$= \frac{wL_{R_X}}{Q_{R_X}} \left(1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}\right)$$
$$= R_{R_X} \left(1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}\right)$$

Así pues, el valor máximo de la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$  se obtendrá aplicado el valor de  $Re\left\{Z_{MN_{opt}-P_{MN}}\right\}$  a la expresión de la potencia  $P_{MN}$  incluida en (2.39); de forma que:

$$\begin{split} P_{MN_{MAX}} &= \frac{V_{S}^{2}}{2R_{T_{X}}} \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}^{2}Q_{L_{opt}-P_{MN}}}{\left(k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}Q_{L_{opt}-P_{MN}} + Q_{R_{X}} + Q_{L_{opt}-P_{MN}}\right)^{2}} \\ &= \frac{V_{S}^{2}}{2R_{T_{X}}} k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}^{2} \frac{Q_{R_{X}}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}}} \\ &= \frac{V_{S}^{2}}{\left(k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}} \frac{Q_{R_{X}}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}} + Q_{R_{X}} + \frac{Q_{R_{X}}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}}\right)^{2}} \\ &= \frac{V_{S}^{2}}{2R_{T_{X}}} \frac{\frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}^{2} + Q_{R_{X}} + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}}} \\ &= \frac{V_{S}^{2}}{2R_{T_{X}}} \frac{\frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}^{2}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}}} \\ &= \frac{V_{S}^{2}}{2R_{T_{X}}} \frac{\frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}^{2}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}}Q_{R_{X}}}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}}} \\ &= \frac{V_{S}^{2}}{2R_{T_{X}}} \frac{\frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}^{2}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}}Q_{R_{X}}}}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}}Q_{R_{X}}}} \\ &= \frac{V_{S}^{2}}{2R_{T_{X}}} \frac{\frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}Q_{R_{X}}}{4Q_{R_{X}}^{2}}}}{1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2}Q_{T_{X}}}Q_{R_{X}}}} \end{split}$$

Así pues, siguiendo lo indicado en (2.17) y (3.18), la máxima potencia entregada al circuito  $R_x$ ,  $P_{MN_{MAX}}$ , se producirá cuando el valor de la impedancia  $Z_{MN}$  asegure el cumplimiento dos condiciones: (1) la parte imaginaria garantice la resonancia del circuito  $R_x$ , a partir de  $Im\{Z_{MN}\} = -wL_{R_x}$ ; (2) la parte real tenga el valor óptimo dado por  $Re\left\{Z_{MN_{opt}-P_{MN}}\right\} = R_{R_x}(1 + k_{T_x-R_x}^2Q_{T_x}Q_{R_x})$ .

$$\frac{\boldsymbol{MPP}}{P_{MN_{MAX}}} \Longrightarrow \begin{cases} Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\} = R_{R_X}\left(1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}\right) \\ Im\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\} = -wL_{R_X} \end{cases}$$
(3.20)

Alternativamente, el valor de  $Re\{Z_{MN}\}$  que asegure la operación del sistema en el punto de MPP puede calcularse haciendo uso del equivalente Thévenin del circuito; tal y como se observa en la Fig. 3.9; junto con el teorema de máxima transferencia de potencia [10].



Fig. 3.9. Modelo simplificado de sistema WPT con circuito  $T_x$  basado en una fuente de tensión y resonancia de tipo serie; y su equivalente Thévenin; adaptado de [1].



Fig. 3.10. Metodología del cálculo de la tensión  $V_{TH}$  y la impedancia  $Z_{TH}$  del circuito equivalente Thévenin para un sistema WPT con circuito  $T_X$  basado en fuente de tensión y resonancia tipo serie; adaptado de [1].

En primer lugar, la tensión equivalente de Thévenin,  $V_{TH}$ , representa a la tensión vista desde los terminales de salida del enlace en circuito abierto; tal y como se aprecia en la Fig. 3.10. Además, puede asumirse que el circuito  $T_X$  cumple la condición de resonancia, por lo que es factible considerar que  $wL_{T_X} = 1/wC_{T_X}$ . Así pues, el análisis del circuito da lugar a las siguientes expresiones para el cálculo de la tensión equivalente de Thévenin:

(1) 
$$V_{TH} = jwM_{T_X - R_X}i_{T_X}$$
  
(2)  $Z_{R_X - T_{X_{ref}}} = \frac{jwM_{T_X - R_X}i_{R_X}}{i_{T_X}} = 0$   
(3)  $i_{T_X} = \frac{V_S}{\frac{1}{jwC_{T_X}} + R_{T_X} + jwL_{T_X} + \underbrace{Z_{R_X} - T_{X_{ref}}}_{(2)}} = \frac{V_S}{R_{T_X}} \right\} \Rightarrow V_{TH} = \frac{jwM_{T_X - R_X}}{R_{T_X}}V_S$  (3.21)

En segundo lugar, como se indica en la Fig. 3.10, la impedancia equivalente de Thévenin,  $Z_{TH}$ , es la observada desde los terminales de salida del modelo del enlace inductivo, y debe calcularse tras anular las fuentes del circuito. Por lo tanto, para el caso de la presente topología, es necesario forzar a que  $V_S = 0$ . Así, la relación de expresiones para la obtención de la impedancia  $Z_{TH}$  se muestra a continuación.

(1) 
$$jwM_{T_X-R_X}i_{R_X} = i_{T_X}\left(\frac{1}{jwC_{T_X}} + R_{T_X} + jwL_{T_X}\right) = i_{T_X}R_{T_X}$$
  
(2)  $Z_{T_X-R_{X_{ref}}} = \frac{jwM_{T_X-R_X}i_{T_X}}{i_{R_X}} = \frac{w^2M_{T_X-R_X}^2}{R_{T_X}} = \frac{w^2k_{T_X-R_X}L_{T_X}L_{R_X}}{R_{T_X}}$  (3.22)

$$(3) \ Z_{TH} = R_{R_X} + jwL_{R_X} + Z_{T_X - R_{X_{ref}}}$$

Utilizando las definiciones de los factores de calidad  $Q_{R_X}$  y  $Q_{T_X}$ ; incluidas en (2.9) y (2,19), respectivamente; es posible conseguir la expresión final de la impedancia  $Z_{TH}$  equivalente de Thévenin.

$$Z_{TH} = R_{R_X} + jwL_{R_X} + Z_{T_X - R_{X_{ref}}}$$

$$= R_{R_X} + jwL_{R_X} + \frac{w^2 k_{T_X - R_X}^2 L_{T_X} L_{R_X}}{R_{T_X}}$$

$$= R_{R_X} + jwL_{R_X} + k_{T_X - R_X}^2 \frac{wL_{T_X}}{R_{T_X}} \frac{wL_{R_X}}{Q_{R_X}} R_{R_X}$$

$$= R_{R_X} (1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}) + jwL_{R_X}$$
(3.23)

Adicionalmente, el teorema de máxima transferencia de potencia indica que la máxima  $P_{MN}$  se obtiene cuando la impedancia  $Z_{MN}$  es igual al conjugado de  $Z_{TH}$ ; de forma que:

$$Z_{MN_{opt}-P_{MN}} = \overline{Z_{TH}}$$

$$= Re \{ Z_{MN_{opt}-P_{MN}} \} + jIm \{ Z_{MN_{opt}-P_{MN}} \}$$

$$= \overline{R_{R_X} (1 + k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}) + jw L_{R_X}}$$

$$= R_{R_X} (1 + k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}) - jw L_{R_X}$$
(3.24)

Asumiendo que se cumple la condición de resonancia en el circuito  $R_X$ ; de forma que  $Im\{Z_{MN_{opt}-P_{MN}}\} = wL_{R_X}$ ; el valor óptimo de  $Re\{Z_{MN_{opt}-P_{MN}}\}$  es idéntico al calculado previamente, e incluido en la expresión (3.20).

$$\frac{MPP}{P_{MN_{MAX}}} \Longrightarrow \begin{cases} Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\} = R_{R_X}\left(1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}\right) \\ Im\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\} = -wL_{R_X} \end{cases}$$
(3.20)

Para terminar, la potencia máxima  $P_{MN_{MAX}}$  entregada al circuito  $R_X$ ; haciendo uso del circuito equivalente de Thévenin de la Fig. 3.9; puede calcularse de la forma siguiente:

$$P_{MN_{MAX}} = \frac{1}{2} Re\{V_{MN}I_{MN}^*\}$$
(3.25)

Donde la tensión  $V_{MN}$  representa a la tensión entre los terminales de la impedancia  $Z_{MN}$ , y puede definirse en función de la tensión equivalente de Thévenin como:

$$V_{MN} = V_{TH} \frac{Z_{MN_{opt} - P_{MN}}}{Z_{TH} + Z_{MN_{opt} - P_{MN}}}$$

$$= \frac{V_{TH} \left[ R_{R_{X}} \left( 1 + k_{T_{X} - R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} \right) - jwL_{R_{X}} \right]}{\frac{R_{R_{X}} \left( 1 + k_{T_{X} - R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} \right) + jwL_{R_{X}}}{Z_{TH}}} + \frac{R_{R_{X}} \left( 1 + k_{T_{X} - R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} \right) - jwL_{R_{X}}}{Z_{MN_{opt} - P_{MN}}}$$

$$= V_{TH} \frac{R_{R_{X}} \left( 1 + k_{T_{X} - R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} \right) - jwL_{R_{X}}}{2R_{R_{X}} \left( 1 + k_{T_{X} - R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}} \right) - jwL_{R_{X}}}$$

$$(3.26)$$

De la misma manera, la intensidad  $I_{MN}$  que circula por el circuito  $R_x$  puede escribirse en función de la tensión equivalente de Thévenin.

$$I_{MN} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_{MN_{opt} - P_{MN}}}$$

$$= \frac{V_{TH}}{2R_{R_X} (1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X})}$$
(3.27)

Una vez conocidos los valores de  $V_{MN}$  e  $I_{MN}$ , es posible desarrollar la expresión de la potencia  $P_{MN_{MAX}}$  indicada en (3.25).

$$P_{MN_{MAX}} = \frac{1}{2} Re\{V_{MN}I_{MN}^*\}$$

$$= \frac{1}{2} Re\left\{\frac{V_{TH}[R_{R_X}(1+k_{T_X-R_X}^2Q_{T_X}Q_{R_X}) - jwL_{R_X}]}{2R_{R_X}(1+k_{T_X-R_X}^2Q_{T_X}Q_{R_X})}\underbrace{\frac{V_{TH}}{2R_{R_X}(1+k_{T_X-R_X}^2Q_{T_X}Q_{R_X})}}_{I_{MN}^*}\right\}$$
(3.28)

$$= \frac{|V_{TH}|^{2}}{2} Re \left\{ \frac{R_{R_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right) - jwL_{R_{X}}}{4R_{R_{X}}^{2} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)^{2}} \right.$$

$$= \frac{|V_{TH}|^{2}}{8} \frac{R_{R_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)}{R_{R_{X}}^{2} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)^{2}} \right.$$

$$= \frac{|V_{TH}|^{2}}{8} \frac{1}{R_{R_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)}{R_{R_{X}}^{2} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)} \right.$$

$$= \frac{|V_{TH}|^{2}}{8} \frac{1}{R_{R_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)}{R_{R_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)} \frac{|V_{TH}|^{2}}{R_{R_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)} \right.$$

$$= \frac{V_{S}^{2}}{8} \frac{k_{T_{X}}^{2} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)}{R_{T_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)} \frac{|V_{R_{X}}}{Q_{T_{X}}} \frac{|V_{R_{X}}}{Q_{R_{X}}} \left. \frac{|V_{R_{X}}|^{2}}{R_{R_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)} \right.}{\left. \frac{|V_{S}|^{2}}{8R_{T_{X}}} \frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}}{R_{R_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)} \frac{|V_{R_{X}}|^{2}}{R_{R_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)} \frac{|V_{R_{X}}|^{2}}{R_{R_{X}} \left(1 + k_{T_{X}-R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}\right)} \right.}$$

El resultado de  $P_{MN_{MAX}}$  es idéntico al desarrollado en (3.19); lo que demuestra la existencia de un valor de  $Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\}$  que permite alcanzar el punto de MPP; a través de dos métodos analíticos diferentes.

Finalmente, la topología de circuito  $T_X$  basado en una fuente de intensidad  $I_S$ , junto con una capacidad  $C_{T_X}$  resonante en paralelo puede ser analizada del mismo modo que el presente caso. Esto es debido a que la expresión de  $P_{MN}$  obtenida; tal y como se ha demostrado en la sección 2.3; presenta las mismas dependencias con los factores  $Q_{R_X-L}$  y  $Q_L$ ; siendo estos los únicos parámetros relacionados con el término real de la impedancia  $Re\{Z_{MN}\}$  [1].

## **3.2.2 MPP para circuito TX con fuente de intensidad y capacidad resonante serie.**

Para el caso del circuito  $T_x$  incluido en la Fig. 3.8; basado en una fuente de intensidad alterna con valor de pico  $I_s$ , junto con una resonancia serie creada por la capacidad  $C_{T_x}$  y la bobina  $L_{T_x}$ ; la expresión analítica de la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_x$  ha sido calculada en la sección 2.3.

$$P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X}$$

$$= \frac{I_S^2}{2} R_{T_X} \frac{Q_{R_X - L}}{Q_L} k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X - L}$$
(2.48)

$$= \frac{I_{S}^{2}}{2} R_{T_{X}} \frac{Q_{R_{X}}}{Q_{R_{X}} + Q_{L}} k_{T_{X} - R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} \frac{Q_{R_{X}} Q_{L}}{Q_{R_{X}} + Q_{L}}$$
$$= \frac{I_{S}^{2}}{2} R_{T_{X}} \frac{k_{T_{X} - R_{X}}^{2} Q_{T_{X}} Q_{R_{X}}^{2} Q_{L}}{\left(Q_{R_{X}} + Q_{L}\right)^{2}}$$

El valor óptimo de  $Re\{Z_{ZM}\}$  para maximizar la potencia  $P_{MN}$  se calculará a partir de la derivada parcial de la ecuación de  $P_{MN}$  en función del factor de calidad de la carga  $Q_L$ ; de la forma:

$$\frac{\partial P_{MN}}{\partial Q_L} = \frac{\partial}{\partial Q_L} \left\{ \frac{I_S^2}{2} R_{T_X} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_L}{\left(Q_{R_X} + Q_L\right)^2} \right\}$$
$$= \frac{I_S^2}{2} R_{T_X} \frac{\partial}{\partial Q_L} \left\{ \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_L}{\left(Q_{R_X} + Q_L\right)^2} \right\}$$
$$= \frac{I_S^2}{2} R_{T_X} \frac{A(Q_L)}{B(Q_L)} = 0$$
(3.29)

Siendo  $A(Q_L)$  y  $B(Q_L)$  productos del numerador y del denominador de la derivada  $\frac{\partial P_{MN}}{\partial Q_L}$  dependientes del factor de calidad  $Q_L$ ; y que pueden ser representados a través de las expresiones siguientes.

$$A(Q_L) = k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 (Q_{R_X} + Q_L)^2 - k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_L [2(Q_{R_X} + Q_L)]$$
  

$$= k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 [(Q_{R_X} + Q_L)^2 - 2Q_L (Q_{R_X} + Q_L)]$$
  

$$= k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 (Q_{R_X} + Q_L) [(Q_{R_X} + Q_L) - 2Q_L]$$
  

$$= k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 (Q_{R_X} + Q_L) (Q_{R_X} - Q_L)$$
  
(3.30)

$$B(Q_L) = (Q_{R_X} + Q_L)^4$$
(3.31)

Para forzar a que  $\frac{\partial P_{MN}}{\partial Q_L} = 0$ , es preciso encontrar el valor de  $Q_L$  que obligue a que el numerador de la expresión (3.29) sea igual a cero.

$$A(Q_L) = k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 (Q_{R_X} + Q_L) (Q_{R_X} - Q_L) = 0$$
(3.32)

Por lo tanto, el valor del factor de calidad  $Q_L$  que anula el numerador de la derivada  $\frac{\partial P_{MN}}{\partial Q_L}$  puede expresarse de la forma:

$$Q_{R_X} - Q_L = 0 \Rightarrow Q_L = Q_{R_X} \tag{3.33}$$

En resumen, el valor óptimo de  $Q_{L_{opt-P_{MN}}}$  requerido para la maximización de la potencia  $P_{MN}$  está determinado a partir de la expresión (3.34).

$$Q_{L_{opt-P_{MN}}} = Q_{R_X} \tag{3.34}$$

Utilizando las definiciones de los factores de calidad de la carga  $Q_L$  y de la bobina receptora  $Q_{R_X}$ , mostradas respectivamente en (2.10) y (2.9), es sencillo representar la expresión del factor de calidad óptimo para el MPP como función de la parte real de la impedancia  $Z_{MN}$ .

$$Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\} = \frac{wL_{R_X}}{Q_{L_{opt-P_{MN}}}} = \frac{wL_{R_X}}{\underbrace{Q_{R_X}}_{R_{R_X}}} = R_{R_X}$$
(3.35)

Por tanto, el valor máximo de la potencia  $P_{MN_{MAX}}$  puede obtenerse tras la aplicación del valor de  $Re\left\{Z_{MN_{opt}-P_{MN}}\right\}$  a la expresión original de la potencia  $P_{MN}$ , mostrada en (2.48); de forma que:

$$P_{MN_{MAX}} = \frac{I_S^2}{2} R_{T_X} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^2 Q_{L_{opt - P_{MN}}}}{\left(Q_{R_X} + Q_{L_{opt - P_{MN}}}\right)^2}$$
  
=  $\frac{I_S^2}{2} R_{T_X} \frac{k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}^3}{\left(2Q_{R_X}\right)^2}$  (3.36)  
=  $\frac{I_S^2}{8} R_{T_X} k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}$ 

Para terminar, y atendiendo a lo indicado en (2.17) y (3.35), la máxima potencia  $P_{MN_{MAX}}$  entregada al circuito  $R_X$ , se dará únicamente cuando el valor de la impedancia  $Z_{MN}$  cumpla dos condiciones: (1) la parte imaginaria asegure la resonancia del circuito  $R_X$ , a partir de  $Im\{Z_{MN}\} = -wL_{R_X}$ ; (2) la parte real tome el valor óptimo dado por  $Re\{Z_{MN_{opt}-P_{MN}}\} = R_{R_X}$ .

$$\frac{MPP}{P_{MN_{MAX}}} \Longrightarrow \begin{cases} Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\} = R_{R_X} \\ Im\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\} = -wL_{R_X} \end{cases} (3.37)$$

De forma alternativa, el valor óptimo de  $Re\{Z_{MN}\}$ , necesario para conseguir la operación del sistema WPT en el punto de MPP, puede calcularse mediante el equivalente Thévenin del circuito; mostrado en la Fig. 3.11; y la aplicación del teorema de máxima transferencia de potencia [10].



Fig. 3.11. Modelo simplificado de sistema WPT con circuito  $T_x$  basado en una fuente de intensidad y resonancia de tipo serie; y su equivalente Thévenin; adaptado de [1].



Fig. 3.12. Metodología del cálculo de la tensión  $V_{TH}$  y la impedancia  $Z_{TH}$  del circuito equivalente Thévenin para un sistema WPT con circuito  $T_X$  basado en fuente de intensidad y resonancia tipo serie; adaptado de [1].

La tensión equivalente de Thévenin,  $V_{TH}$ , es aquella vista desde los terminales de salida del modelo del enlace en circuito abierto; como es apreciable en la Fig. 3.12. Adicionalmente, es asumible el considerar que el circuito  $T_X$  cumple la condición de resonancia, dada por  $wL_{T_X} = 1/wC_{T_X}$ . Así, el análisis del circuito resulta en las siguientes expresiones para el cálculo de la tensión  $V_{TH}$  equivalente:

$$\begin{array}{ll} (1) & i_{R_{X}} = 0 \implies jwM_{T_{X}-R_{X}}i_{R_{X}} = 0 \\ (2) & Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}} = \frac{jwM_{T_{X}-R_{X}}i_{R_{X}}}{i_{T_{X}}} = 0 \\ (3) & i_{T_{X}} = I_{S} \\ (4) & V_{TH} = jwM_{T_{X}-R_{X}}i_{T_{X}} \end{array} \right\} \implies V_{TH} = jwM_{T_{X}-R_{X}}I_{S}$$

$$(3.38)$$

Además de esto, la impedancia  $Z_{TH}$  equivalente de Thévenin, como se observa en la Fig. 3.12, representa a la impedancia entre los terminales de salida del modelo del enlace; considerando las fuentes del circuito anuladas. Así, el conjunto de expresiones para el cálculo de la impedancia  $Z_{TH}$  se enumera a continuación.

$$\begin{array}{l} (1) \ I_{S} = 0 \implies i_{T_{X}} = 0 \implies jwM_{T_{X} - R_{X}}i_{T_{X}} = 0 \\ (2) \ Z_{T_{X} - R_{X_{ref}}} = \frac{jwM_{T_{X} - R_{X}}i_{T_{X}}}{i_{R_{X}}} = 0 \\ (3) \ Z_{TH} = R_{R_{X}} + jwL_{R_{X}} + Z_{T_{X} - R_{X_{ref}}} \end{array} \right\} \implies Z_{TH} = R_{R_{X}} + jwL_{R_{X}} \qquad (3.39)$$

Por otra parte, el teorema de máxima transferencia de potencia determina que la máxima potencia  $P_{MN}$  se consigue para una impedancia  $Z_{MN}$  igual al conjugado de  $Z_{TH}$ ; de tal forma que:

$$Z_{MN_{opt}-P_{MN}} = \overline{Z_{TH}}$$

$$= Re \left\{ Z_{MN_{opt}-P_{MN}} \right\} + jIm \left\{ Z_{MN_{opt}-P_{MN}} \right\}$$

$$= \overline{R_{R_X} + jwL_{R_X}}$$

$$= R_{R_X} - jwL_{R_X}$$
(3.40)

Considerando que se cumple la condición de resonancia en el circuito  $R_x$ ; de forma que  $Im\{Z_{MN_{opt}-P_{MN}}\} = wL_{R_x}$ ; el valor óptimo de  $Re\{Z_{MN_{opt}-P_{MN}}\}$  será igual al previamente calculado, e incluido en la expresión (3.37).

$$\frac{MPP}{P_{MN_{MAX}}} \Longrightarrow \begin{cases} Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\} = R_{R_X} \\ Im\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\} = -wL_{R_X} \end{cases}$$
(3.37)

Para finalizar, la potencia máxima  $P_{MN_{MAX}}$  entregada al circuito  $R_X$ ; estudiando el circuito equivalente de Thévenin de la Fig. 3.11; puede calcularse como:

$$P_{MN_{MAX}} = \frac{1}{2} Re\{V_{MN}I_{MN}^*\}$$
(3.25)

De forma similar al caso previo, la tensión  $V_{MN}$  identifica a la tensión entre los terminales de la impedancia  $Z_{MN}$ , y puede ser definida en función de la tensión equivalente de Thévenin.

$$V_{MN} = V_{TH} \frac{Z_{MN_{opt} - P_{MN}}}{Z_{TH} + Z_{MN_{opt} - P_{MN}}} = \frac{V_{TH} \left[ R_{R_X} - jwL_{R_X} \right]}{\frac{R_{R_X} + jwL_{R_X}}{Z_{TH}} + \frac{R_{R_X} - jwL_{R_X}}{Z_{MN_{opt} - P_{MN}}}$$
(3.41)  
$$= V_{TH} \frac{R_{R_X} - jwL_{R_X}}{2R_{R_X}}$$

De forma análoga, la intensidad  $I_{MN}$  que circula por la impedancia  $Z_{MN}$  puede expresarse en función de la tensión equivalente de Thévenin.

$$I_{MN} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_{MN_{opt} - P_{MN}}} = \frac{V_{TH}}{2R_{R_X}}$$
(3.42)

Así pues, una vez conocidos ambos valores de  $V_{MN}$  e  $I_{MN}$ , es sencillo obtener la expresión de la potencia  $P_{MN_{MAX}}$  entregada al circuito  $R_X$ .

$$P_{MN_{MAX}} = \frac{1}{2} Re\{V_{MN}I_{MN}^*\}$$

$$= \frac{1}{2} Re\left\{ \underbrace{V_{TH} \frac{R_{R_X} - jwL_{R_X}}{2R_{R_X}} \frac{V_{TH}}{2R_{R_X}}}{\sum_{V_{MN}} \frac{2R_{R_X}}{2R_{R_X}}} \right\}$$

$$= \frac{|V_{TH}|^2}{2} Re\left\{ \frac{R_{R_X} - jwL_{R_X}}{4R_{R_X}^2} \right\}$$

$$= \frac{|V_{TH}|^2}{8} \frac{R_{R_X}}{R_{R_X}^2}$$

$$= \frac{|V_{TH}|^2}{8} \frac{1}{R_{R_X}}$$

$$= \frac{\frac{|V_{TH}|^2}{8} \frac{1}{R_{R_X}}}{8} \frac{1}{R_{R_X}}$$

$$= \frac{I_S^2}{8} k_{T_X - R_X}^2 R_{T_X} \frac{wL_{T_X}}{Q_{T_X}} \frac{wL_{R_X}}{Q_{R_X}}}{Q_{R_X}}$$
(3.43)

El resultado obtenido de  $P_{MN_{MAX}}$  es igual al desarrollado en (3.36); lo que permite demostrar, a través de dos métodos analíticos alternativos, la existencia del valor de  $Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\}$  requerido para alcanzar el punto de MPP del sistema WPT.

Finalmente, la topología de circuito  $T_x$  con una fuente de tensión  $V_s$ , junto con una capacidad  $C_{T_x}$  resonante en paralelo, presentará el mismo tipo de análisis. Esto es así ya que la expresión de  $P_{MN}$  obtenida par ambas topologías; como se ha demostrado en la sección 2.3; presenta las mismas dependencias con los factores  $Q_{R_X-L}$  y  $Q_L$ , y, por consiguiente, con la parte real de la impedancia  $Re\{Z_{MN}\}$  [1].

#### 3.3 Selección entre puntos de MEP y MPP

En la sección anterior, se ha probado la existencia de dos valores de  $Re\{Z_{MN}\}$  que maximizan la eficiencia  $\eta_{link}$  del enlace y la potencia  $P_{MN}$  entregada al  $R_X$ . En este apartado, se compararán los puntos obtenidos para el MEP y MPP, con la finalidad de justificar razonadamente un método de selección entre ambos.

Para empezar, se va a hacer uso del circuito de la Fig. 3.13 a modo de ejemplo ilustrativo. Este circuito cuenta con un transmisor formado por una fuente de tensión alterna, con valor de pico de  $V_s$ , junto con una capacidad  $C_{T_X}$  resonante serie. El resto de sus parámetros iniciales incluyen una frecuencia de resonancia de  $f_0 = 13.56$  MHz, unas bobinas con factores de calidad  $Q_{T_X} = Q_{R_X} = 200$  y resistencias de pérdidas de  $R_{T_X} = R_{R_X} = 5 \Omega$ , y un factor de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = 0.05$ . Además, se ha supuesto el cumplimiento de las condiciones de resonancias de ambos circuitos  $T_X$  y  $R_X$ , de forma que  $wL_{R_X} = -Im\{Z_{MN}\}$  y  $wL_{T_X} = 1/(wC_{T_X})$ . Finalmente, el objetivo de diseño del sistema reside en la obtención de una potencia entregada al receptor de valor mínimo  $P_{MN} = 500$  mW.



Fig. 3.13. Sistema para la comparación de MEP y MPP, basado en circuito  $T_x$  con fuente de tensión y capacidad resonante serie; adaptado de [1].

Los resultados obtenidos para el circuito del ejemplo de la Fig. 3.13 se muestran en la Tabla 3-2, así como en la Fig. 3.14. Como se puede observar, en el caso de seleccionar una  $Re\{Z_{MN}\}$  para operar en el punto de MEP, el sistema requiere de una tensión de pico  $V_S = 7.8$  V para alcanzar la potencia de  $P_{MN} = 500$  mW requerida. Así pues, el sistema opera en un punto de máxima eficiencia, alcanzando el valor de  $\eta_{link} = 81.9$ %; pero requiere de una fuente de tensión de mayor amplitud *c* para cumplir los requerimientos de diseño. Sin embargo, la opción de aumentar  $V_S$  puede ser impracticable para ciertas aplicaciones en las que la tensión de salida máxima está fijada a un valor previamente determinado. Es en estos casos en los que es necesario que al sistema opere en el punto de MPP; de forma que pueda alcanzar el valor requerido de  $P_{MN}$ ; a costa de sacrificar parte de la eficiencia  $\eta_{link}$  en transferencia de potencia. Así, cuando la impedancia  $Re\{Z_{MN}\}$  es ajustada para alcanzar el punto de MPP, el sistema consigue la potencia  $P_{MN} = 500$  mW para una

tensión de  $V_S$  = 4.5 V, inferior a la tensión nominal de la fuente. Por tanto, en el punto de MPP es posible asegurar el valor objetivo de  $P_{MN}$ , pero reduciendo la eficiencia del enlace a cerca del  $\eta_{link}$  = 49 %.

Tabla 3-2. Resultados de la comparación entre MEP y MPP, para circuito  $T_x$  con fuente de tensión y capacidad resonante serie.

00P	$\begin{array}{c} \pmb{Re}\{\pmb{Z_{MN}}\}\\ (\Omega) \end{array}$	$Q_L$	η <sub>link</sub> (%)	$V_{S}$ (V) (@ $P_{MN} = 500$ mW)	$P_{MN}$ (mW) (@ $V_{S} = 5$ V)	$\begin{array}{c} R_{T_X-R_{X_{ref}}}\\ (\Omega) \end{array}$	$\begin{array}{c} P_{T_X} \\ (\mathbf{mW}) \end{array}$
MEP	50.25	20	81.9	7.8	203.7	45.25	248.76
MPP	505	2	49.02	4.5	618.8	4.92	1262.4



Fig. 3.14. Resultados de comparativa entre MEP y MPP para un circuito  $T_X$  con fuente de tensión y capacidad resonante serie; eficiencia  $\eta_{link}$  y potencia  $P_{MN}$  frente a  $Re\{Z_{MN}\}$ .

Para explicar este comportamiento, deben considerarse los valores de resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  para los puntos de MEP y MPP; los cuales se muestran en la Tabla 3-2. Como es posible distinguir en la Tabla 3-2, la operación en el punto de MEP presenta una resistencia  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  mayor que para el caso de operar en MPP. Además, en el caso analizado del MEP, la resistencia reflejada es elevada respecto a las pérdidas  $R_{T_X}$ , de forma que  $R_{R_X-T_{X_{ref}}} = 45.25 \Omega \gg R_{T_X} = 5\Omega$ ; lo que minimiza la potencia disipada en la resistencia parásita de la bobina  $T_X$ , pero hace necesario el uso de una fuente  $V_S$  mayor para entregar la potencia deseada de  $P_{MN} = 500 \text{ mW}$  [1]. Por el contrario, en el caso del MPP, la resistencia reflejada en significativamente menor, con un valor cercano a  $R_{R_X-T_{X_{ref}}} = 4.9 \Omega \cong R_{T_X} = 5\Omega$ ; lo que maximiza la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$  para una tensión  $V_S$  menor. No obstante, la operación en el MPP provoca una reducción en la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ , ya que la potencia disipada en la resistencia  $R_{T_X}$  de pérdidas es similar a la entregada a la bobina receptora; esta última modelada como la potencia disipada en  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$ .

Es posible apoyar analíticamente esta argumentación, haciendo uso de la relación de expresiones obtenidas a lo largo del capítulo 2. En primer lugar, la impedancia reflejada  $Z_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , para el circuito de la Fig. 3.13, puede calcularse a partir de las siguientes relaciones:

$$(1) \ Z_{R_{X}-T_{X_{ref}}} = \frac{\overbrace{jwM_{T_{X}-R_{X}}}^{V_{T_{X}-R_{X}}}}{i_{T_{X}}} = \frac{V_{T_{X}-R_{X}}}{i_{T_{X}}}$$

$$(2) \ V_{T_{X}-R_{X}} = -i_{R_{X}} \left( R_{R_{X}} + jwL_{R_{X}} + Re\{Z_{MN}\} + jlm\{Z_{MN}\} \right)$$

$$(3.44)$$

Por tanto, la impedancia reflejada será puramente resistiva  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , siempre que se cumpla la condición de resonancia del circuito  $R_X$ ; tal y como se demostró en la sección 2.2 de este trabajo.

$$Z_{R_X - T_{X_{ref}}} = jwM_{T_X - R_X} \frac{i_{R_X}}{i_{T_X}} = \frac{w^2 M_{T_X - R_X}^2}{R_{R_X} + Re\{Z_{MN}\}} = R_{R_X - T_{X_{ref}}}$$
(3.45)

Como se aprecia en la expresión (3.45), la resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  es decreciente con la parte real de la impedancia  $Z_{MN}$ ; por lo que mayores valores de  $Re\{Z_{MN}\}$  supondrán resistencias  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  más bajas. Así pues, es necesario proceder a la observación de los valores óptimos de  $Re\{Z_{MN}\}$  para los puntos de MEP y MPP, desarrollados en la sección 3.2.1 y resumidos en (3.46).

$$Re\{Z_{MN}\} \Longrightarrow \begin{cases} Re\{Z_{MN_{opt-\eta}}\} = R_{R_X} \sqrt{1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}} \\ Re\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\} = R_{R_X} (1 + k_{T_X - R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X}) \end{cases}$$
(3.46)

Tal como se aprecia en (3.46), el valor óptimo de  $Re\{Z_{MN}\}$  para alcanzar el MEP es menor que el necesario para conseguir operar en el MPP (3.47); de forma que la relación entre las resistencias reflejadas  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  seguirá la tendencia opuesta, como se expone en (3.48)

$$Re\left\{Z_{MN_{opt-\eta}}\right\} < Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\}$$
(3.47)

$$R_{R_X - T_{X_{refopt-\eta}}} > R_{R_X - T_{X_{refopt-P_{MN}}}}$$

$$(3.48)$$

Para cuantificar el impacto de la resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  sobre la eficiencia  $\eta_{link}$  y la potencia  $P_{MN}$  es necesario cuantificar la intensidad  $i_{T_X}$  suministrada por la fuente de tensión  $V_S$  al circuito  $T_X$ .

Mediate el análisis del circuito de la Fig. 3.13, y suponiendo la resonancia del circuito  $T_X$ , de forma que  $wL_{T_X} = 1/(wC_{T_X})$ , es posible afirmar que la intensidad  $i_{T_X}$  es de la forma:

$$i_{T_X} = \frac{V_S}{\frac{1}{jwC_{T_X}} + R_{T_X} + jwL_{T_X} + R_{R_X - T_{X_{ref}}}} = \frac{V_S}{R_{T_X} + R_{R_X - T_{X_{ref}}}}$$
(3.49)

La ecuación (3.49) explica como el aumento de la resistencia  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  reduce la intensidad entregada por la fuente de tensión  $V_S$ ; lo que implica una menor potencia  $P_{T_X}$  suministrada por dicha fuente (2.35) y una reducción de la potencia total  $P_{MN}$  entregada al circuito receptor, según la fórmula  $P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X}$  (2.6).

De forma similar, la influencia de la resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  sobre la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  es explicable a través en las expresiones de la potencia disipada por la resistencia de pérdidas de la bobina transmisora,  $P_{L_{T_X}}$ , y la potencia disipada por la resistencia reflejada,  $P_{L_{R_X}}$ . Dado que este último parámetro modela la cantidad de potencia entregada por el circuito  $T_X$  a la bobina  $R_X$ , es posible afirmar que, según las definiciones incluidas en (3.50) y (3.51), una mayor resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  supone mayor potencia transferida a la bobina  $R_X$  respecto a la disipada en la bobina  $T_X$ . De esta forma, y como se ha comprobado en el sistema utilizado como ejemplo, para el caso de  $R_{R_X-T_{X_{ref}}} \cong R_{T_X}$ , la potencia disipada en la bobina  $T_X$  será similar a la entregada a la bobina  $R_X$ , lo que redundará en una eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  de valor reducido.

$$P_{L_{T_X}} = \frac{1}{2} Re\left\{ V_{L_{T_X}} i_{T_X}^* \right\} = \frac{1}{2} Re\left\{ i_{T_X} R_{T_X} i_{T_X}^* \right\} = \frac{\left| i_{T_X} \right|^2}{2} R_{T_X}$$
(3.50)

$$P_{L_{R_X}} = \frac{1}{2} Re \left\{ V_{R_{R_X} - T_{X_{ref}}} i_{T_X}^* \right\} = \frac{1}{2} Re \left\{ i_{T_X} R_{R_X} - T_{X_{ref}} i_{T_X}^* \right\} = \frac{\left| i_{T_X} \right|^2}{2} R_{R_X} - T_{X_{ref}}$$
(3.51)

Por lo tanto, a modo de resumen, y mediante el estudio analítico del sistema de la Fig. 3.13, puede concluirse que.

• La resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  es monótona decreciente con  $Re\{Z_{MN}\}$ ; por lo que el punto MEP presentará un valor de  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  mayor que el del MPP; como se indica en (3.46). Esta característica influirá sobre la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  y en la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito receptor; de forma que la operación en MEP presentará una mayor eficiencia  $\eta_{link}$  con una potencia entregada  $P_{MN}$  limitada, mientras que la selección del MPP repercutirá en una mayor potencia  $P_{MN}$  con menor eficiencia  $\eta_{link}$  en la transmisión de potencia.

- Una mayor resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  supone un decremento en la intensidad  $i_{T_X}$  suministrada por la fuente de tensión  $V_S$  al circuito; lo que provoca una reducción de la potencia  $P_{T_X}$  entregada por la fuente al circuito; y, por consiguiente, una reducción en la potencia total  $P_{MN}$ ; según las expresiones (2.35) y (2.6). Esta es la razón por la que, en el circuito de la Fig. 3.13, el MEP, con mayor resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$ , ofrece menores valores de potencia  $P_{MN}$  que el caso del MPP.
- Una mayor resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  implica que la disipación de potencia  $P_{L_{T_X}}$  en las pérdidas de la bobina  $T_X$  sean relativamente bajas respecto a la potencia  $P_{L_{R_X}}$  entregada a la bobina  $R_X$  o disipada en la resistencia  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$ ; tal y como se indica en (3.50) y (3.51). Este efecto es el responsable de que el MEP, con mayor resistencia reflejada  $R_{R_X-T_{X_{ref}}}$  en el circuito de la Fig. 3.13, ofrezca una mayor eficiencia del enlace  $\eta_{link}$ ; debido a que la potencia disipada en las pérdidas de la bobina  $T_X$  es prácticamente despreciable respecto a la entregada a la bobina  $R_X$ . Para el caso particular del MPP, la resistencia reflejada y las pérdidas de la bobina  $T_X$  son similares,  $R_{R_X-T_{X_{ref}}} \cong R_{T_X}$ ; por lo que ambas disiparán aproximadamente la misma potencia, limitando la eficiencia del enlace a un valor inferior a  $\eta_{link} = 50$  %.

A pesar de la existencia demostrada de un compromiso entre eficiencia  $\eta_{link}$  y potencia  $P_{MN}$ , a la hora de seleccionar la operación del circuito en los puntos de MEP y MPP; este compromiso desaparece cuando la distancia  $D_{T_x-R_x}$  entre las bobinas es elevada y el coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  es reducido [1]. Como es distinguible en la expresión (3.46), factores de acoplo pequeños, tales que  $k_{T_X-R_X}^2 Q_{T_X} Q_{R_X} \ll 1$ , producen resistencias reflejadas de valores  $R_{R_X-T_{X_{ref}}} \cong R_{T_X}$ . Estas resistencias reflejadas son, por tanto, independientes del factor de calidad Q<sub>L</sub> y de la impedancia real  $Re\{Z_{MN}\}$ . Así pues, en estos casos, cualquier variación en  $Re\{Z_{MN}\}$ será imperceptible en la carga vista por la fuente  $V_S$ ; dada por  $R_{T_X} + R_{R_X - T_{X_{ref}}} \cong 2R_{T_X}$ . Por tanto, para enlaces en los que el coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  es reducido, la potencia  $P_{T_X}$  entregada por la fuente  $V_S$  es prácticamente independiente de  $Re\{Z_{MN}\}$ . Bajo estas condiciones, la maximización de la eficiencia  $\eta_{link}$  supondrá también la maximización de la potencia  $P_{MN}$ , según la expresión  $P_{MN} = \eta_{link} P_{T_X}$ ; en la que el factor de potencia  $P_{T_x}$  presenta un valor fijo. Este comportamiento queda resumido en la expresión (3.52), y es apreciable en los resultados de la Fig. 3.15, Fig. 3.16 y Fig. 3.17; donde se ha analizado el circuito de la Fig. 3.13 bajo condiciones de factores de acoplo variantes en el rango de  $k_{T_X-R_X} = [0.00001, 0.1]$ . Concretamente, en el caso de coeficientes de acoplo  $k_{T_X-R_X} < 10^{-3}$ , la optimización de  $Re\{Z_{MN}\}$  para el MEP y MPP toma idénticos valores; como se ha enunciado en (3.52).

$$\lim_{k_{T_X}-R_X\to 0} \operatorname{Re}\left\{Z_{MN_{opt}-\eta}\right\} = \lim_{k_{T_X}-R_X\to 0} \operatorname{Re}\left\{Z_{MN_{opt}-P_{MN}}\right\} = R_{R_X} \Longrightarrow \boldsymbol{MEP} \equiv \boldsymbol{MPP} \quad (3.52)$$



Fig. 3.15. Resultados de comparativa entre MEP y MPP para un circuito  $T_X$  con fuente de tensión y capacidad resonante serie;  $Re\{Z_{MN}\}$  frente al factor de acoplo  $k_{T_X-R_X}$ .



Fig. 3.16. Resultados de comparativa entre MEP y MPP para un circuito  $T_x$  con fuente de tensión y capacidad resonante serie; eficiencia  $\eta_{link}$  frente al factor de acoplo  $k_{T_x-R_x}$ .



Fig. 3.17. Resultados de comparativa entre MEP y MPP para un circuito  $T_X$  con fuente de tensión y capacidad resonante serie; potencia  $P_{MN}$  frente al factor de acoplo  $k_{T_X-R_X}$ .

### 4 Diseño y caracterización experimental

El presente capítulo está centrado en el diseño, fabricación y caracterización experimental de un enlace WPT por acoplo inductivo demostrador; utilizado para comprobar la precisión de los modelos analíticos desarrollados en el capítulo 2 y el capítulo 3. Como se ha comentado en el capítulo 1, correspondiente a la introducción de este trabajo, y con la finalidad de simplificar el proceso de diseño y la interpretación de los resultados experimentales obtenidos, los bloques del sistema se han limitado a una etapa de adaptación de impedancias en el transmisor, el modelo eléctrico del propio enlace con dos bobinas acopladas, y una etapa adicional de adaptación de impedancias en el receptor; tal y como se aprecia en la Fig. 4.1. Además, el sistema está alimentado por una fuente de tensión alterna con valor de pico  $V_S$ ; mientras que, al no existir requerimientos particulares para el circuito de carga, este se limitará a una resistencia  $R_L$ , que se optimizará para alcanzar los puntos de MEP o MPP; siguiendo la metodología expuesta en el capítulo 3.



Fig. 4.1. Diagrama de bloques simplificado para un sistema WPT por acoplo inductivo; reproducción de la Fig. 2.1.

El hecho de contar con una carga  $R_L$  dada por la optimización de  $Re\{Z_{MN}\}$  para la obtención del MEP o MPP; y cuyo valor será inferior a la centena de ohmios, como se describe en las secciones 4.2 y 4.3, ha motivado la selección de una topología de tipo resonante serie para el circuito receptor. Esta topología, como se ha demostrado en la parte final de la sección 2.5, es la más recomendable para optimizar la eficiencia  $\eta_{link}$  del enlace y la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_X$ ; en el caso de que la resistencia de carga sea de un orden de magnitud cercano al de las resistencias de pérdidas de la bobina  $L_{R_X}$ , de forma que  $R_L \cong R_{R_X}$ . Para el caso de la topología del circuito  $T_X$ , debido al equipamiento disponible en el laboratorio y a la simplicidad del diseño, se ha optado por utilizar una fuente de tensión alterna y circuito resonante serie.

Los requerimientos iniciales de diseño del sistema WPT incluyen su operación a una frecuencia portadora de  $f_0 = 13.56$  MHz, así como el uso de capacidades del tipo Y5V [11] en la red de adaptación de impedancias del circuito receptor. El uso de este tipo de capacidades; tal y como se comentará en la sección 4.1.2, responde al interés por analizar el impacto de un condensador variable con la temperatura sobre la frecuencia de resonancia del sistema. De esta forma, sería posible implementar un circuito llevable o implantable, con la capacidad de sensado de la temperatura; de forma que las variaciones de temperatura se viesen reflejadas sobre cambios en la frecuencia de resonancia del sistema; obteniéndose idealmente el rango resonancias indicado en la expresión (4.1).

$$[f_{0_{min}}, f_{0_{max}}] = \left[\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{R_X}(C_{T_X} + \Delta C_{T_X})}}, \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{R_X}(C_{T_X} - \Delta C_{T_X})}}\right]$$
(4.1)

A modo de resumen, la Tabla 4-1 muestra la relación de especificaciones de diseño del sistema WPT; para cada uno de los condensadores Y5V utilizados [11]. Como se puede observar, y con la finalidad de reducir la complejidad del sistema, los condensadores de los circuitos transmisor y receptor se han seleccionado para presentar el mismo valor nominal, de forma que  $C_{R_X} = C_{T_X}$ . Por tanto, y considerando idéntica frecuencia de resonancia para ambos circuitos  $T_X$  y  $R_X$ , las bobinas de cada uno de ellos cumplirán la misma condición, por lo que  $L_{R_X} = L_{T_X}$ .

$f_0$ (MHz)	$C_{T_X}$ (pF)	$C_{R_X}$ (pF)	$L_{T_X}$ (µH)	$L_{R_X}$ (µH)
19 56	470	470	0.33	0.33
10.50	10	10	13.77	13.77

Tabla 4-1. Relación de especificaciones de diseño de los sistemas WPT demostradores.

#### 4.1 Diseño y fabricación de las bobinas

En esta sección se describe en detalle el proceso de diseño y fabricación de las bobinas de los circuitos transmisor y receptor,  $L_{T_X}$  y  $L_{R_X}$ , respectivamente. Como se ha comentado previamente, y se muestra en la Tabla 4-1, teóricamente ambas bobinas deben presentar el mismo valor nominal  $L_{T_X} = L_{R_X}$ , debido a que las capacidades resonantes serie de ambos circuitos,  $C_{T_X}$  y  $C_{R_X}$ , han sido seleccionadas para presentar también idénticos valores nominales. Por esta razón, únicamente se realizará el diseño de dos bobinas, correspondientes al par  $L_{T_X} - L_{R_X}$  para cada uno de los dos sistemas demostradores diseñados y fabricados. En la sección 4.1.1 se incluye una breve introducción teórica sobre el concepto de inductancia y su funcionamiento; mientras que la sección 4.1.2 contiene la descripción del proceso de diseño, fabricación y caracterización experimental de las bobinas implementadas en el laboratorio. Además, esta sección presenta una comparativa entre las topologías de bobinas circulares y cuadradas; mostrando el mejor rendimiento de las primeras para la presente aplicación.

#### 4.1.1 Introducción teórica

Se conoce como inductancia de una bobina a su capacidad de almacenar energía en presencia de un campo magnético; y ésta se define como la relación entre el campo magnético ( $\Phi$ ) que circula por cada vuelta de la bobina (N) y la intensidad de corriente que circula por ella (I); de la forma [12]:

$$L = \frac{\Phi N}{I} \tag{4.1}$$

La unidad de medida de la inductancia es el Henrio (H); así denominada en honor al físico estadounidense Joseph Henry [12]; y se define como un voltio partido de un amperio por segundo. En otras palabras, la inductancia equivalente de un circuito eléctrico será de un henrio (L = 1 H) cuando por él fluya una corriente eléctrica con una tasa de cambio de un amperio por segundo ( $\Delta I / \Delta t = 1$  A/s), y que induzca una diferencia de potencial de un voltio a lo largo del inductor ( $V_L = 1$  V); tal como se indica en (4.2) [12].

$$V_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \tag{4.2}$$

El valor resultante de inductancia depende de las características físicas del conductor, de forma que este valor aumenta con el tamaño; especificado en superficie (S) y longitud (L); así como con la cantidad de bucles (N) que se realizan con el material conductor. Adicionalmente, la inductancia L también depende de la permeabilidad  $\mu$  del material en el interior del bobinado. De esta forma, el resultando de inductancia para un solenoide queda reflejado en la definición siguiente [12].

$$L = \frac{N^2 \mu S}{l} \tag{4.3}$$

Para el caso particular de bobinas con aire como dieléctrico interior o "núcleo de aire", la expresión (4.3) puede simplificarse haciendo uso de la fórmula empírica de Wheeler para un solenoide [13].

$$L = 0.394 \frac{r^2 N^2}{9r + 10l} = 0.394 \frac{r^2 N^2}{9r + 10(Nd_{cable})}$$
(4.4)

Donde *r* es el radio de la bobina, *N* el número de vueltas del bobinado, y *l* la extensión longitudinal de la bobina. Este último parámetro *l* puede definirse como el producto del diámetro  $d_{cable}$  del cable conductor por el número de vueltas *N* del bobinado; siempre que se desprecie el grosor del encapsulado ( $h_{coat}$ ) frente al radio del cable ( $r_{cable}$ ) y se asuma una separación infinitesimalmente pequeña entre las distintas vueltas ( $r_{cable} \ll h_{coat}$ ); tal y como se puede apreciar en la Fig. 4.2.



Fig. 4.2. Representación simplificada de solenoide; adaptado de [13].

Finalmente, debe tenerse presente que, debido a su naturaleza empírica, la fórmula de Wheeler para el solenoide (4.4) produce errores del orden del 1 % para inductancias con relaciones de tamaño 2l/r < 3. Concretamente, para el caso de 2l/r = 5 el error en el valor estimado de la inductancia alcanza el 4 % [13].

#### **4.1.2 Especificaciones técnicas**

La especificación de la frecuencia de operación de  $f_0 = 13.56$  MHz, indicada en la Tabla 4-1, surge de la necesidad de utilizar una banda del espectro de uso libre y con buenas propiedades de penetración en el tejido; de forma que esta pudiese ser apta para la alimentación de sistemas AIMDs implantados de bajo consumo. En este sentido, la regulación nacional y europea propone determinadas bandas del espectro electromagnético para su uso libre en aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (*Industrial, Scientific and Medical*, ISM); las cuales se definen en la Tabla 4-2 [14] [15] [16].

Tabla 4-2. Bandas habilitadas para	su uso libre en aplicaciones	Industriales, Científicas y
Médicas (ISM).		

Bandas	Bajas frecuencias	Altas frecuencias	Ultra Altas frecuencias
	(Low Frequencies, LF)	(High Frequencies, HF)	(Ultra-High Frequencies, UHF)
Valores	6.765 kHz a 6.795 kHz 135.53 kHz a 135.67 kHz	13.553 MHz a 13.567 MHz 26.957 MHz a 27.283 MHz 40.66 MHz a 40.70 MHz	433.050 MHz a 434,790 MHz 862 MHz a 890 MHz 2.4 GHz a 2.4835 GHz 5.725 GHz a 5.875 GHz

Según el estándar publicado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (*International Telecommunication Union*, ITU), las intensidades de campo magnético radiado permitidas, a una distancia de 10 m, para las bandas de 135 kHz y 13.56 MHz son de 66 dB $\mu$ A/m y 42 dB $\mu$ A/m, respectivamente [14] [17]. Por tanto, la intensidad de campo permitida a LF es mayor que la correspondiente para la banda de HF; lo que, idealmente, permitiría una mayor distancia de comunicación.

Adicionalmente, el efecto de calentamiento del tejido en la banda de 10-135 kHz es despreciable o incluso inexistente [17]. Sin embargo, el factor de calidad de las inductancias ha demostrado ser más elevado para la banda de 13.56 MHz [3]; lo que supone un fuerte impacto sobre la eficiencia del enlace  $\eta_{link}$  y la potencia  $P_{MN}$  entregada al circuito  $R_x$ ; como se comprobó en el capítulo 2. Por tanto, la banda de 13.56 MHz es considerada la opción más adecuada para la implementación de enlaces WPT con AIMDs de bajo consumo; como se ha comprobado mediante su uso en multitud de trabajos de investigación. Además, esta frecuencia ha demostrado ofrecer el mejor compromiso entre la intensidad de campo magnético radiado permitida, la distancia de transmisión y la biocompatibilidad [17].

Una vez seleccionada la frecuencia de operación del sistema, es necesario definir la carga del mismo. En este caso, y como se ha comentado con anterioridad, el sistema hará uso de condensadores con dieléctrico tipo Y5V, con una alta dependencia con la temperatura apreciable en la Fig. 4.3. Concretamente, se han utilizado dos condensadores Y5V de valores  $C_{T_X} = C_{R_X} = 10 \text{ pF y } C_{T_X} = C_{R_X} = 470 \text{ pF; lo}$ que dará como resultados dos sistemas WPT demostradores diferentes. Para cada uno de esos sistemas, el valor de las bobinas correspondientes  $L_{T_X}$  y  $L_{R_X}$  se calcula haciendo uso de la expresión de resonancia de un tanque L-C serie; de la forma:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{R_X} C_{R_X}}} \Longrightarrow L_{R_X} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_{R_X}}$$
(4.5)

Nótese que únicamente se ha calculado el valor de la bobina receptora  $L_{R_X}$ . Como se observa en la Tabla 4-1, para simplificar el proceso de diseño y la interpretación de los resultados experimentales, se ha decido utilizar en el circuito transmisor capacidades del mismo valor que los condensadores Y5V del circuito  $R_X$ , de forma que  $C_{T_X} = C_{R_X}$ . Por tanto, las inductancias calculadas para el receptor serán idénticas de las necesarias en el transmisor ( $L_{T_X} = L_{R_X}$ ); lo que facilita su fabricación.



Fig. 4.3. Respuesta de variación de capacidad con la temperatura para un condensador con dieléctrico Y5V; extraído de [11].

Respecto a la fabricación de las bobinas, el material utilizado ha sido hilo de cobre de 0.06 cm de diámetro. La selección del material conductor con el que fabricar la bobina tiene una gran importancia sobre su factor de calidad; introducido en la sección 2.1 como Q = wL/R. La resistencia R de pérdidas de la bobina está determinada por la resistividad del material utilizado en el cable; y se expresa como:

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{4.6}$$

Donde *l* es la longitud del cable conductor en metros *A*, es el área de la sección transversal del conductor en metros cuadrados, y  $\rho$  es la resistividad eléctrica del material medida en ohmios por metro [18]. La Tabla 4-3 incluye el listado de los materiales más comunes para la fabricación de hilos conductores, indicando su resistividad eléctrica a una temperatura de 20°C [3]. Como se puede observar, la plata muestra la menor resistividad de entre los materiales considerados; por lo que una bobina fabricada con este conductor presentaría una menor resistencia de pérdidas *R* y un mayor factor de calidad *Q*. Sin embargo, comparada con el cobre, la plata únicamente ofrece una resistividad un 5 % menor; mientras que su precio de mercado es significativamente más elevado [3]. Por esta razón, junto a su amplia disponibilidad en los laboratorios de electrónica, el conductor seleccionado para la fabricación de las bobinas  $L_{T_X}$  y  $L_{R_X}$  ha sido el cobre.

Material	Resistividad, $ ho$ ( $\Omega/m$ )
Plata	1.59.10-8
Cobre	1.68.10-8
Oro	1.72.10-8
Aluminio	2.44.10-8

Tabla 4-3. Relación de conductores metálicos comunes y su resistividad eléctrica, medida a una temperatura de 20°C [3].

La geometría utilizada para la implementación de las bobinas ha debido ser seleccionada de entre dos opciones principales: cuadrada y circular. El motivo de esta preselección reside en la facilidad de fabricación de solenoides con dichas geometrías en el laboratorio sin necesidad de equipamiento especializado. Diversos estudios analíticos y experimentales han demostrado que las bobinas circulares, en mismas condiciones de campo magnético producido en su centro, requieren de menor longitud de cable; lo que repercute en una menor resistencia de pérdidas y en un mayor factor de calidad [19]. Este comportamiento ha sido comprobado de forma experimental, mediante la realización de distintas bobinas cuadradas y circulares, con números de vueltas entre 2.5 y 10. Los resultados de auto inductancia para cada bobina fabricada se han medido con un analizador de redes NanoVNA [20]; y los datos obtenidos se muestran en la Tabla 4-4 y la Fig. 4.4.

N (maltas)	Inductancia, <i>L</i> (μH)		
N (Vuenas)	Cuadrada	Circular	
2.5	1.02	1.15	
5	2.71	2.86	
7.5	5.5	5.74	
10	8.14	8.86	

Tabla 4-4. Relación de medidas experimentales de la inductancia, para bobinas circular	es
y cuadradas, en función del número de vueltas del bobinado.	

\* Todas las bobinas se han diseñado para presentar un mismo perímetro por vuelta de 16 cm; siendo las bobinas cuadradas de 4 cm de lado; y las bobinas circulares de 5.1 cm de diámetro.



Fig. 4.4. Inductancia medida experimentalmente para bobinas circulares y cuadradas, en función del número de vueltas del bobinado.

Para finalizar la selección de la geometría de las bobinas, la capacidad de acoplo entre ellas se ha caracterizado experimentalmente analizando el voltaje recibido en la bobina receptora  $L_{T_X}$ ; cuando la bobina transmisora es excitada con un tren de pulsos cuadrados de frecuencia 5 MHz y amplitud de 2 V. En este caso, las bobinas utilizadas son de geometría cuadrada y circular, presentan un idéntico perímetro de 16 cm en cada vuelta, y el número de vueltas del bobinado es de N = 10 para ambas topologías. Los resultados obtenidos del experimento se han incluido en la Tabla 4-5 y la Fig. 4.5; donde puede apreciarse una mayor capacidad de acoplo entre bobinas circulares, para todo el rango de separación considerado. Esta respuesta sirve de apoyo en la selección de la topología circular como la más adecuada para la implementación del sistema WPT diseñado.

Distancia d (am)	Voltaje recibido, V <sub>pp</sub> (mV)			
Distancia, <i>u</i> (cm)	Cuadrada	Circular		
0	230	338		
1	122	145		
2	72	94		
3	43	79		
4	35	64		
5	31	61		
6	28	58		
7	25	56		
8	22	53		

Tabla 4-5. Relación de medidas del voltaje recibido, para bobinas circulares y cuadradas, en función de la distancia entre las bobinas.

\* Las bobinas se han diseñado para presentar un mismo perímetro por vuelta de 16 cm; siendo las bobinas cuadradas de 4 cm de lado; y las bobinas circulares de 5.1 cm de diámetro. En este caso, todas las bobinas cuentan con un número de vueltas de *N* = 10.



Fig. 4.5. Voltaje recibido, medido experimentalmente para bobinas circulares y cuadradas, en función de la distancia entre las bobinas.

#### 4.2 Sistema WPT con capacidad de $C_{RX} = 10$ pF.

Después del estudio incluido en los capítulos 2 y 3, la topología de los circuitos demostradores se detalla en la Fig. 4.6; a falta de calcular los valores de los dispositivos incluidos en él.



Fig. 4.6. Modelo eléctrico del sistema WPT demostrador; con dispositivos genéricos.

En este circuito se debe tener en cuenta que las resistencias  $R_{TX}$  y  $R_{RX}$  no representan a dispositivos reales, sino que son las resistencias parásitas del conjunto condensador y bobina de cada circuito. Dichos valores se han extraído empleando un analizador de redes NanoVNA; para la frecuencia de interés de  $f_0 = 13.56$  MHz.

#### 4.2.1 Fabricación y caracterización de inductancias

Como se ha comentado, el objetivo de esta investigación es analizar el enlace WPT por acoplo inductivo con unas bobinas de tamaño inferior a 5 centímetros; que idealmente permitan su uso llevable o, incluso, implantable.

Por ello, se comienza empleando dos condensadores de  $C_{T_X} = C_{R_X} = 10 \text{ pF}$ . Para estos condensadores se requiere de una bobina con una inductancia objetivo de  $L_{T_X} = L_{R_X} = 13.77 \text{ }\mu\text{H}$ , para alcanzar la frecuencia deseada de  $f_0 = 13.56 \text{ MHz}$ ; tal y como se deduce de la fórmula (4.5).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{R_X} C_{R_X}}} \Longrightarrow L_{R_X} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_{R_X}} = \frac{1}{(2\pi 13.56 \text{ MHz})^2 10 \text{ pF}}$$

$$= 13.77 \ \mu H$$
(4.5)

Sin embargo, al medir el valor nominal de los condensadores  $C_{T_X}$  y  $C_{R_X}$  con el analizador de redes, se observa un descenso en sus valores respecto al deseado de 10 PF, hasta 9.4 pF y 9.2 pF, respectivamente. Por esta razón, para asegurar la resonancia a  $f_0 = 13.56$  MHz, se requiere del redimensionamiento de las bobinas  $L_{T_X}$  y  $L_{R_X}$  a valores de 14.5 µH y 14.8 µH, respectivamente. Para ello, ha sido necesario implementar las bobinas con un total de 13.5 vueltas, con un diámetro de

5 centímetros cada una. En los siguientes cálculos, se explica detalladamente la obtención de los valores de las inductancias respecto al nuevo número de vueltas del bobinado.

$$L_{R_X} = L_{T_X} = 0.394 \frac{r^2 N^2}{9r + 10(N \, d_{cable})}$$
  
=  $0.394 \frac{(2.5 \, cm)^2 (\mathbf{13.5 \, vueltas})^2}{9(2.5 \, cm) + 10(\mathbf{13.5 \, vueltas \, 0.06 \, cm})}$  (4.4)  
=  $\mathbf{14.66 \, uH}$ 

Una vez más, se comprobó el valor de las inductancias y condensadores haciendo uso del analizador NanoVNA. Además, se identificó experimentalmente la ubicación de la frecuencia de resonancia  $f_0$ , mediante la metodología descrita en la sección 4.2.2. Para ajustar dicha frecuencia al valor de  $f_0 = 13.56$  MHz fue necesaria una nueva modificación de la topología de las bobinas, resultando en unos valores finales de inductancias de  $L_{T_X} = 14.2 \,\mu\text{H y} L_{R_X} = 13.9 \,\mu\text{H}$ . Estas bobinas presentan una resistencia parásita medida experimentalmente de  $R_{T_X} = 24.4 \,\Omega$  y  $R_{R_X} = 23.2$ . Finalmente, el modelo eléctrico del sistema WPT resultante se muestra, a continuación, en la Fig. 4.7.



Fig. 4.7. Modelo eléctrico del sistema WPT demostrador para  $C_{T_X} = 10 \text{ pF}$ ; previo a la optimización de la carga  $R_L$ .

#### 4.2.2 Identificación de la frecuencia de resonancia

Para identificar la frecuencia de resonancia del circuito transmisor, formado por el condensador  $C_{T_X}$  y la bobina  $L_{T_X}$ , se ha conectado directamente a la salida del generador de funciones la sonda de medida del osciloscopio. Esta sonda se puede modelar, en su posición x 1, mediante una capacidad  $C_{SOND} = 78 \text{ pF}$  en paralelo con una resistencia de  $R_{SOND} = 1 \text{ M}\Omega$ ; tal y como indica el fabricante [21] [22]; y dando como resultado el circuito indicado en la Fig. 4.8.



Fig. 4.8. Circuito eléctrico utilizado para identificar la frecuencia resonancia del condensador  $C_{T_x}$  con la bobina  $L_{T_x}$ .

De esta forma, el circuito de la Fig. 4.8, se ha implementado para su simulación en la herramienta de ayuda al diseño electrónico (*Computer Aided Design*, CAD) PSPICE. Los resultados de simulación, incluidos en la Fig. 4.9, se han obtenido a partir de un barrido de la frecuencia de operación entre f = [10, 20] MHz; representándose la tensión obtenida en el punto denominado como  $V_{in}$  en el esquema de la Fig. 4.8.



Fig. 4.9. Resultado de simulación en PSPICE de la tensión de entrada  $V_{in}$  del circuito transmisor, con la frecuencia de resonancia identificada en 13.774 MHz.

Como se observa en la Fig. 4.9, a una frecuencia aproximada de 13.5 MHz, la tensión  $V_{IN}$  presenta un fuerte decrecimiento, bajando de los 10 V hasta los 3.2 V. Esto se debe a que el circuito ha sido diseñado para que el condensador resuene a esa frecuencia junto con la bobina, por lo que sus admitancias tienen idéntico valor a esta frecuencia, pero de signo opuesto; lo que hace que el conjunto de sus

impedancias sea idealmente nulo. En realidad, la suma de las admitancias de  $C_{T_X}$  y  $L_{T_X}$  es no nula, pero sí muy pequeña en comparación con la resistencia del generador de funciones. Por ello, el circuito resultante a la frecuencia de resonancia estaría compuesto únicamente por la resistencia del generador de funciones  $R_{SIG}$  y las pérdidas del condensador y la bobina, denominadas como  $R_{T_X}$ .

Para justificar el valor despreciable de la suma de las admitancias de  $C_{T_X}$  y  $L_{T_X}$ , se ha calculado su magnitud a la frecuencia de resonancia obtenida de  $f_0 = 13.77$  MHz; dando como resultados dos valores prácticamente idénticos y de signo contrario.

$$Imag(Z_{C_{T_X}}) = \frac{1}{jwC_{T_X}} = \frac{1}{j2\pi \underbrace{(13.77MHz)}_{f_0} \underbrace{(9.4pF)}_{C_{T_X}}} = -1229.2j$$
(4.7)

$$Imag(Z_{L_{T_X}}) = jwL_{T_X} = j2\pi \underbrace{(13.77MHz)}_{f_0} \underbrace{(14.2\mu H)}_{L_{T_X}} = 1228.9j$$
(4.8)

Como se observa, a la frecuencia de 13.77 MHz las admitancias de la bobina y el condensador son prácticamente iguales, aunque de signo opuesto. Así, al anularse entre ellas queda únicamente la resistencia parásita que presentan ambos componentes, la cual tiene un valor de 24.4  $\Omega$ . Con esos valores, la tensión en  $V_{in}$  a esta frecuencia será de 3.28V, similar al mínimo de la gráfica.

$$V_{in} = V_S \cdot \frac{R_{R_X}}{R_{SIG} + R_{R_X}} = 10 \cdot \frac{24.4}{50} = 3.28 V$$
(4.9)

Durante este procedimiento se debe comprender que esta es una aproximación sin considerar la impedancia que ejerce la sonda. Sin embargo, para el cálculo real se debe realizar considerando la influencia de ésta. Así, la impedancia total del bloque  $Z_{in}$  se puede calcular mediante la fórmula (4.10) y la  $V_{in}$  real usando (4.9).

Aun así, la resistencia que presenta la sonda del osciloscopio, a la frecuencia de trabajo, es muy alta en comparación con la resistencia parásita; y, por este motivo, la mayor parte de la corriente circula por esta última, permitiendo que esta aproximación sea más adecuada.

$$Z_{in} = \left(R_{SOND} || \frac{1}{j w C_{SOND}}\right) || \left(R_{Tx} - \frac{j}{w C_{Tx}} + j w L_{Tx}\right)$$
(4.10)

$$V_{in} = V_S \cdot \frac{Z_{in}}{Z_{in} + R_{SIG}} \tag{4.9}$$

Respecto al comportamiento general en la frecuencia de la tensión  $V_{in}$ , analizando los límites de la respuesta del circuito para los casos de  $f \rightarrow 0$  Hz y  $f \rightarrow \infty$  Hz, se

pueden observar dos efectos diferentes; y coincidentes con los resultados de simulación representados en la Fig. 4.9.

Como es sabido, a partir de la expresión de la impedancia de las capacidades e inductancias; a frecuencias bajas ( $f \rightarrow 0$  Hz) los condensadores pueden aproximarse por circuitos abiertos ( $Z_c = 1/jwC \cong \infty \Omega$ ); mientras que las bobinas pueden considerarse cortocircuitos ( $Z_L = jwL \cong 0 \Omega$ ); de forma que el circuito equivalente resultante presenta la siguiente forma.



Fig. 4.10. Circuito equivalente del transmisor considerando la influencia de la sonda del osciloscopio; (a) bajas frecuencias; (b) altas frecuencias.

Haciendo uso de la aproximación de la Fig. 4.10 (a), la impedancia  $Z_{in}$  tomaría un valor aproximado de 1 MΩ; por lo que la tensión en  $V_{in}$ , podría calcularse de la siguiente forma:

$$\lim_{f \to 0 Hz} V_{in} = V_S \cdot \frac{\overbrace{1 \ M\Omega}^{R_{SOND}}}{\underbrace{1 \ M\Omega}_{R_{SOND}} + \underbrace{50 \ \Omega}_{R_{SIG}}} \cong V_S$$
(4.11)

Por otro lado, a altas frecuencias ( $f \rightarrow \infty$  Hz) se produce el efecto contrario; ya que los condensadores presentan un comportamiento similar al de un cortocircuito ( $Z_c = 1/jwC \cong 0 \Omega$ ); mientras que las bobinas pueden considerarse circuitos abiertos ( $Z_L = jwL \cong \infty \Omega$ ); quedando el circuito del  $T_X$  resultante mostrado en la Fig. 4.10 (b).

Por tanto, la resistencia de la sonda  $R_{SOND} = 50 \Omega$  queda cancelada por el cortocircuito equivalente debido al efecto del condensador a altas frecuencias; por lo que la tensión  $V_{in}$  tomaría el valor aproximado indicado en (4.12).

$$\lim_{f \to \infty} V_{in} = V_S \cdot \frac{0 \ \Omega}{0 \ \Omega + \underbrace{50 \ \Omega}_{R_{SIG}}} = 0 \ \Omega$$
(4.12)

Adicionalmente, para comprobar que el circuito demostrador presenta la frecuencia de oscilación deseada de  $f_0 = 13.56$  MHz, se realiza el mismo análisis de forma experimental en el laboratorio. En este caso, se ha medido la tensión  $V_{in}$  para distintas frecuencias del generador de funciones; en el rango f = [10, 20] MHz

De esta forma, se pretende identificar el valor frecuencial para el que la tensión  $V_{in}$  es mínima; lo que, como se ha demostrado previamente, implica una impedancia equivalente  $Z_{in}$  también mínima debida a la resonancia del circuito. A modo de resumen, la Tabla 4-6 y la Fig. 4.11 contienen los valores de  $V_{in}$  medidos experimentalmente para cada una de las frecuencias del generador consideradas.

f(MHz)	$V_{in}(\mathbf{V})$	f(MHz)	$V_{in}(\mathbf{V})$	f(MHz)	$V_{in}(\mathbf{V})$
10	10,3	13,5	1,62	16	9,6
11	10	13,56	1,5	16,5	9,6
11,5	9,8	13,6	3	17	9,5
12	9,5	13,8	7,3	17,5	9,5
12,5	9,2	14	8	18	9,4
13	8,3	14.5	9.4	18.5	9.3
13.2	7.4	15	9.6	19	9.2
13.4	4.2	15.5	9.6	20	9.1

Tabla 4-6. Medidas experimentales para la identificación de la frecuencia de resonancia del circuito transmisor.



Fig. 4.11. Representación gráfica de las medidas experimentales para la identificación de la frecuencia de resonancia del circuito transmisor.

Como se observa en la Tabla 4-6 y la Fig. 4.11, la tensión  $V_{in}$  presenta una reducción significativa de su valor en la frecuencia de 13.56 MHz, aproximadamente. Por tanto, es posible considerar que este es el punto en el que se produce la resonancia entre el condensador  $C_{T_X}$  y la bobina  $L_{T_X}$ ; demostrando el correcto funcionamiento del sistema transmisor diseñado e implementado.

Además, este análisis demuestra la baja influencia de la sonda del osciloscopio sobre la frecuencia de resonancia del circuito, tal y como se esperaba tras el análisis incluido en esta sección.

Adicionalmente, para asegurar el correcto funcionamiento del circuito receptor, se procede a la realización del mismo estudio; en este caso para el circuito equivalente incluido en la Fig. 4.12.



Fig. 4.12. Circuito eléctrico utilizado para identificar la frecuencia resonancia del condensador  $C_{R_X}$  con la bobina  $L_{R_X}$ .

Al igual que con el circuito transmisor, se introduce el circuito de la Fig. 4.12 en la herramienta de ayuda al diseño electrónico PSPICE. Los resultados de simulación, incluidos en la Fig. 4.13, se han obtenido a partir de un barrido de la frecuencia de operación entre f = [10, 20] MHz; representándose la tensión obtenida en el punto denominado como  $V_{in}$  en el esquema de la Fig. 4.12.



Fig. 4.13. Resultado de simulación en PSPICE de la tensión de entrada V<sub>in</sub> del circuito receptor, con la frecuencia de resonancia identificada en 13.90 MHz.

De la misma forma que en caso anterior, se realiza el estudio en el laboratorio del circuito implementado; para facilitar su comparación con los resultados incluidos en la Fig. 4.13. La relación de resultados experimentales obtenidos se incluye en la Tabla 4-7, además de en la Fig. 4.14 para facilitar su visualización.

f (MHz)	$V_{in}(V)$	f (MHz)	$V_{in}(V)$	f (MHz)	$V_{in}(V)$
10	10.3	13.4	1.3	16.5	9.3
10.5	10.3	13.5	3.5	17	9.3
11	10.2	13.56	4.8	17.5	9.3
11.5	10.1	13.6	5.4	18	9.3
12	10	14	6	18.5	9.2
12.5	9.8	14.5	7.6	19	9.1
12.75	8.7	15	8.8	19.5	9.1
13	6.2	15.5	9.1	20	9
13.2	4.7	16	9.2		

Tabla 4-7. Medidas experimentales para la identificación de la frecuencia de resonancia del circuito receptor.





Como se observa, de nuevo, este circuito tiene su frecuencia de resonancia cercana a  $f_0 = 13.56$  MHz, pudiendo también confirmarse el correcto diseño e implementación del circuito receptor. De nuevo, los resultados presentados en la Tabla 4-7 y la Fig. 4.14 prueban la baja influencia de la sonda del osciloscopio sobre
la frecuencia de resonancia del circuito; de forma similar a lo ocurrido para el circuito transmisor.

### 4.2.3 Medida indirecta del coeficiente de acoplo

En este momento, sólo falta conocer del circuito la carga  $R_L$  óptima para alcanzar los puntos de MEP o MPP del sistema WPT. Para ello, se necesita conocer previamente el coeficiente de acoplo  $(k_{T_X-R_X})$  que ejercen ambas bobinas entre sí; ya que la  $R_L$  óptima se puede calcular, una vez identificado el coeficiente de acoplo, haciendo uso de las expresiones (3.3) y (3.11), desarrolladas en el capítulo 3.

$$Re\left\{Z_{MN_{opt}-\eta}\right\}_{MEP} = R_{Rx} \sqrt{k_{Tx-Rx}^2 Q_{Tx} Q_{Rx} + 1}$$
(3.3)

$$Re\left\{Z_{MN_{opt}-P_{MN}}\right\}_{MPP} = R_{Rx}(1 + k_{Tx-Rx}^2 Q_{Tx} Q_{Rx})$$
(3.11)

Para calcular el factor de acoplo de las bobinas, se realiza un experimento en el que se colocan ambas bobinas enfrentadas, conectando  $L_{T_X}$  únicamente al generador de funciones y  $L_{R_X}$  en abierto; tal y como se muestra en la Fig. 4.15.



Fig. 4.15. Circuito utilizado para la medida indirecta del factor de acoplo entre bobinas.

Según el voltaje que se transmite a la bobina receptora y su desfase respecto al voltaje de la bobina transmisora, el coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X}$  se puede obtener a partir de la medida de la inductancia mutua  $M_{T_X-R_X}$ ; de la forma indicada a continuación [23].

$$M = G_V \cos(\theta_V) L_{T_X} + \frac{G_V \sin(\theta_V) R_{T_X}}{2\pi f}$$
(4.14)

Donde la variable  $G_V$  representa la relación de los módulos de las tensiones en la bobina  $T_X$  y en la bobina  $R_X$ , de forma que  $G_V = V_2/V_1$ ; mientras que  $\theta_V$  indica el desfase existente entre dichas señales de tensión.

Este experimento se realizó alejando las bobinas entre sí para conocer la influencia de dicha distancia sobre el coeficiente de acoplo. Los datos obtenidos se

incluyen en la Tabla 4-8, además de estar representados gráficamente en la Fig. 4.16.

Distancia (cm)	Fase (º)	V1	V2	M (nH)	k (-)
0.5	22	10	1.3	1615.904	1.21E-01
1	20	10	1	1225.84	8.26E-02
1.5	20	10	0.7	881.148	6.58E-02
2	21	10	0.46	575.498	4.29E-02
3	21	10	0.29	362.814	2.71E-02
4	21	10	0.2	250.216	1.87E-02
5	22	10	0.13	161.590	1.21E-02
6	23	10	0.1	123.454	9.21E-03
7	22	10	0.08	99.440	7.42E-03
8	14	10	0.017	35.015	2.61E-03

Tabla 4-8. Medidas experimentales para el cálculo del coeficiente de acoplo entre bobinas.



# Fig. 4.16. Representación gráfica de las medidas experimentales para el cálculo del coeficiente de acoplo entre bobinas.

Para escoger la distancia adecuada, como nuestro prototipo pretende demostrar el funcionamiento de un sistema de alimentación con un enlace inductivo con un dispositivo AIMD, se escoge como distancia estándar 0.5 cm, debido a que la piel tiene un grosor máximo de 0.4 cm, con un pequeño margen [24]. Por ello, se escoge como valor nominal del coeficiente de acoplo  $k_{T_X-R_X} = 0.12$ .

#### 4.2.4 Medida de la tensión entregada al circuito RX

Una vez conocidos los valores de las bobinas y su factor de acoplo, se procede a calcular el  $R_L$  óptimo para lograr el MEP y el MPP.

Como se ha explicado previamente en el capítulo 3, el sistema se puede optimizar para dos puntos diferentes. El MEP con mayor eficiencia  $\eta_{link}$  de transmisión de potencia, ideal cuando no se pueden permitir altas pérdidas por una limitación en la potencia entregada por la fuente  $V_S$ ; y el MPP con mayor potencia  $P_{MN}$  de transmisión al circuito receptor, ideal si en el punto de mayor eficiencia no se entrega la suficiente potencia para alimentar el circuito de carga.

Tabla 4-9. Relación de parámetros medidos experimentalmente y utilizados para el cálculo de los puntos de MEP y MPP

Frecuencia	$L_{TX}$	L <sub>RX</sub>	R <sub>TX</sub>	R <sub>RX</sub>	$k_{T_X-R_X}$	<b>R</b> <sub>fuente</sub>
13.56 MHz	14.2 μH	13.9 µH	24.4 Ω	23.2 Ω	0.121	50

Así pues, una vez conocidos los valores de los factores de calidad de las bobinas y el coeficiente de acoplo; incluidos en la Tabla 4-9, es posible calcular el valor óptimo de la parte real de la impedancia de entrada  $Z_{MN}$  del circuito receptor, de forma que se consigan los valores de  $Re \left\{ Z_{MN_{opt-\eta}} \right\}_{MEP}$  y  $Re \left\{ Z_{MN_{opt-P_{MN}}} \right\}_{MPP}$ .

$$Re\left\{Z_{MN_{opt}-\eta}\right\}_{MEP} = R_{Rx}\sqrt{k_{Tx-Rx}^{2}Q_{Tx}Q_{Rx}+1}$$

$$= 23.2\sqrt{0.12^{2}\frac{13.56\cdot10^{6}\cdot2\pi\cdot14.2\cdot10^{-6}}{24.4}\frac{13.56\cdot10^{6}\cdot2\pi\cdot13.9\cdot10^{-6}}{23.2}+1}$$

$$= 142 \ \Omega$$
(3.3)

Para lograr el MEP, hace falta una resistencia de 142  $\Omega$ . Por limitación en las resistencias existentes, se empleó una resistencia de 150  $\Omega$ ; la cual al medirla empleando el analizador de redes, resulto presentar un valor de 150.2  $\Omega$ .

Respecto al MPP, el valor óptimo de la parte real de la impedancia  $Z_{MN}$  se puede calcular empleando la expresión (3.11).

$$Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\}_{MPP} =$$

$$= R_{Rx}(1 + k_{Tx-Rx}^2 Q_{Tx} Q_{Rx})$$
(3.11)

$$= 23.2 \left( 0.12^2 \frac{13.56 \cdot 10^6 \cdot 2\pi \cdot 14.2 \cdot 10^{-6}}{24.4} \frac{13.56 \cdot 10^6 \cdot 2\pi \cdot 13.9 \cdot 10^{-6}}{23.2} + 1 \right)$$
$$= 300 \ \Omega$$

Respecto a esta última fórmula, cabe destacar que la impedancia de 50  $\Omega$  que presenta el generador de funciones siempre debe considerarse, y se debe sumar a  $R_{TX}$  para calcular el MPP. Sin embargo, para el cálculo del MEP no es requerida, ya que no influye ésta en su cálculo.

Como se observa en la ecuación (3.11) para lograr el MPP, hace falta una resistencia  $R_L$  de 300  $\Omega$ . Por limitaciones en las resistencias existentes, se ha empleado una de 330  $\Omega$ ; que una vez medida empleando el analizador de redes a la frecuencia de trabajo, como se ha hecho previamente, resulta en un valor de 330.5  $\Omega$ .

Una vez se tienen todos los datos para implementar el sistema WPT correctamente, se procede a realizar un montaje demostrador que permita conectar y desconectar los componentes mediante pines de conexión; permitiendo así el cambio fácil del circuito entre sus versiones para el MEP y el MPP. El circuito se debe conectar tal y como se observa en la siguiente imagen.



Fig. 4.17. Modelo del circuito eléctrico con  $R_L$  óptima para alcanzar los puntos de MEP y MPP

Respecto del circuito, para el análisis de las tensiones, se ha empleado únicamente la  $R_L$  propia del punto MEP, ya que éste presenta mejores prestaciones en situaciones como la deseada de baja potencia; quedando el circuito resultante de la siguiente forma:



Fig. 4.18. Modelo del circuito eléctrico con R<sub>L</sub> óptima para alcanzar el punto de MEP.

Al igual que en veces anteriores, se recurre al CAD Pspice introduciendo el circuito de la Fig. 4.18para su estudio de las tensiones  $V_{R_X}$  a los diferentes factores de acoplo propios de las distancia  $dd_{T_X-R_X}$ =[0.5, 1.5, 3] cm, los cuales se observan en la Tabla 4-8. Representándose la tensión obtenida en el punto denominado como  $V_{R_X}$ 



Fig. 4.19. Gráfica  $V_{R_x}$  ideal frente a Frecuencia (azul, k=0.12; rojo, k=0.0658; verde, k=0.0429).

Como se observa en la gráfica, las tensiones llegan a valores de 50 V en la frecuencia de resonancia, mientras que al realizar el estudio en el punto de mayor factor de acoplo de los tres,  $k_{T_X-R_X} = 0.12$  el cual ocurre para  $d_{T_X-R_X} = 0.5cm$ . En nuestro circuito físico resultan algo inferiores como se observa en la tabla que aparece a continuación:

f (MHz)	$V_{in}(V)$	$V_{RX}(V)$	f (MHz)	$V_{in}(V)$	$V_{RX}(V)$
10	10	0.51	15	9.2	2.2
10.5	10	0.57	15.25	9.4	1.78
11	10	0.66	15.5	9.5	1.5
11.5	10	0.8	15.75	9.5	1.3
11.75	9.8	0.87	16	9.5	1.15
12	10	0.98	16.5	9.5	0.93
12.25	9.7	1.11	17	9.5	0.78
12.5	9.7	1.28	17.5	9.4	0.67
13	9.4	1.85	18	9.3	0.6
13.5	8.4	3.14	18.5	9.1	0.55
13.56	7.9	3.56	19	9.1	0.5
14	2.61	5.9	19.5	9	0.47
14.5	8	3.9	20	9	0.44

Tabla 4-10 Tensión  $V_{R_x}$  frente a Frecuencia en el laboratorio

Como se puede ver, el valor más alto recibido en el laboratorio es de 5.9 V. Esta diferencia de valores entre la simulación con CAD y el laboratorio se debe a la impedancia que ejercen las sondas en el circuito. Por este motivo, se modificó el circuito a analizar en PSPICE por el circuito que se ve a continuación, añadiendo las sondas en su posición correcta, ya que son un inconveniente que no se puede evitar.



Fig. 4.20. Circuito real con sondas en  $V_{R_X}$ .

Con la simulación ajustada de nuevo considerando las sondas de medida para ser similar al estudio del laboratorio, se vuelve a analizar el circuito en el punto  $V_{R_X}$ , empleando de nuevo la herramienta CAD PSPICE.

Los resultados de simulación se observan en la Fig. 4.21, la cual se ha obtenido a partir de un barrido de la frecuencia de operación en f = [10, 20] MHz, además en la Fig. 4.21 se observa la variación con los factores de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = [0.028, 0.068 y 0.12]$ , que son los factores de acoplo propios de la distancia  $d_{T_X-R_X} = 0.5 1.5 3 cm$  como se observa en la tabla de factores de acoplo Véase Tabla 4-8



Fig. 4.21. Gráfica real de Voltaje frente a Frecuencia variando el factor de acoplo

Como se observa al añadir las sondas al circuito, los valores alcanzan el rango de valores de la investigación del laboratorio mostrados previamente.

A continuación, se muestran los resultados propios del laboratorio, variando la distancia entre las bobinas para que sea similar al factor de acoplo que se ha empleado en el CAD PSPICE, por ello los valores tanto prácticos como de simulación deben ser similares.

f(MHz)	$V_{in}(0.5cm)(V)$	$V_{RX}(0.5cm)(V)$	f(MHz)	$V_{in}(0.5cm)(V)$	$V_{RX}(0.5cm)(V)$
10	10	0.51	15	9.2	2.2
10.5	10	0.57	15.25	9.4	1.78
11	10	0.66	15.5	9.5	1.5
11.5	10	0.8	15.75	9.5	1.3
11.75	9.8	0.87	16	9.5	1.15
12	10	0.98	16.5	9.5	0.93
12.25	9.7	1.11	17	9.5	0.78
12.5	9.7	1.28	17.5	9.4	0.67

Tabla 4-11 Tensión V<sub>RX</sub> a 0.5cm de distancia entre bobinas

13	9.4	1.85	18	9.3	0.6
13.5	8.4	3.14	18.5	9.1	0.55
13.56	7.9	3.56	19	9.1	0.5
14	2.61	5.9	19.5	9	0.47
14.5	8	3.9	20	9	0.44

Tabla 4-12 Tensión  $V_{RX}$ a 0.5<br/>cm de distancia entre bobinas

f (MHz)	$V_{in}\left(1.5cm\right)\left(V ight)$	$V_{RX}(1.5cm)(V)$	$V_{in}\left(3cm\right)\left(V ight)$	$V_{RX}(3cm)(V)$
10	10	0.27	10	0.1
10.5	10	0.31	10	0.13
11	10	0.36	10	0.16
11.5	9.8	0.45	9.8	0.21
12	9.6	0.58	9.6	0.3
12.5	9.5	0.83	9	0.51
12.75	9.3	1		
13	8.8	1.4	4.6	1.2
13.25	7.7	2		
13.5	4	3	8.3	1.1
13.56	2.8	3.3	8.8	0.93
14	8	2.2	9.7	0.54
14.5	9.4	1.15	9.9	0.35
15	9.6	0.75	9.8	0.27
15.5	9.6	0.57	9.9	0.21
16	9.6	0.46	9.8	0.18
16.5	9.5	0.4	9.8	0.16
17	9.5	0.33	9.6	0.14
17.5	9.4	0.3	9.6	0.12
18	9.3	0.25	9.5	0.11
18.5	9.3	0.22	9.4	0.1

19	9.2	0.21	9.2	0.1
19.5	9.2	0.2	9.2	0.1
20	9.1	0.18	9.1	0.1

A continuación, aparecen las gráficas correspondientes a estas tablas. En ellas se aprecian los valores de tensión en función de la frecuencia, con diferentes distancias entre bobinas (Azul->0.5cm, Naranja->1.5cm y gris->3cm), lo que afecta inversamente proporcional al factor de acoplo entre ellas:



Fig. 4.22. Frecuencia frente a tensión suministrada al circuito receptor en el laboratorio (Azul->0.5cm, Naranja->1.5cm y gris->3cm)

Como se observa en las gráficas, para  $k_{T_X-R_X} = 0.12$  (0.5cm, azul) la frecuencia de resonancia se desplaza un poco hacia 14 MHz. Aunque sigue siendo parte del umbral permitido, esto es debido al efecto del sobre acoplo, que se observa en el siguiente apartado con más detalle. Sin embargo, en las gráficas para k=0.065 (1cm, naranja) y  $k_{T_X-R_X} = 0.027$  (3cm, gris) la frecuencia de resonancia se encuentra correctamente en torno a 13.56 MHz.

#### 4.2.5 Medida de la tensión entregada a la carga RL.

Respecto a la tensión transmitida a la resistencia de carga, el circuito con las sondas correctamente colocadas es el siguiente:



Fig. 4.23. Circuito con sondas en Vout

Al igual que en anteriores veces, el circuito previamente mostrado, se implementa para su simulación en la herramienta de diseño electrónica PSPICE. Los resultados de simulación se observan en Fig. 4.24, la cual se ha obtenido a partir de un barrido de la frecuencia de operación en f = [10, 20] MHz, además en Fig. 4.24 se observa la variación con los factores de acoplo de  $k_{T_X-R_X} = [0.028, 0.0658 y 0.12]$ , los cuales son los factores de acoplo propios de la distancia  $d_{T_X-R_X} = 0.5, 1.5, 3cm$  como se observa en la tabla de factor de acoplo vs distancia. Véase Tabla 4-8



Fig. 4.24. Tensión del circuito de carga  $V_{OUT}$  frente a frecuencia con los valores(k=0.12, azul; k=0.0658, rojo y k=0.028, verde).

Como se observa para k=0.12 (azul), en lugar de formarse un único pico se obtienen dos puntos de máximo voltaje, centrados en la frecuencia de resonancia. Esto se conoce como el efecto de sobre acoplo, este efecto ocurre cuando el factor de acoplo es demasiado elevado y hace que el valor de la tensión no sea el más

elevado a la frecuencia de trabajo, sino que aparece una función convexa con dos picos más elevados que el valor de tensión a la frecuencia de trabajo.

Al construir el circuito previamente mencionado en el laboratorio, los datos recibidos son los siguientes:

f (MHz)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	f (MHz)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$
10	10	0.222	15	7	4.2
10.5	10	0.37	15.25	4.2	5.2
11	10	0.67	15.5	5.4	4.75
11.5	9.5	1.6	15.75	7.8	3.35
11.75	8.9	3	16	8.7	2.4
12	6.6	5.6	16.5	9.2	1.44
12.25	8.7	4.1	17	9.3	1
12.5	9.5	2.72	17.5	9.3	0.76
13	9.7	1.9	18	9.3	0.61
13.5	9.6	1.75	18.5	9.2	0.51
13.56	9.6	1.78	19	9.1	0.44
14	9.4	1.93	19.5	9	0.39
14.5	9	2.55	20	9	0.34

Tabla 4-13 Tabla con los datos de V<sub>RX</sub> frente a Frecuencia

Una vez se dispone de los datos para el caso estándar en el que se centra este proyecto, se realiza el mismo estudio con las bobinas a diferentes distancias  $d_{T_X-R_X} = [1.5, 3]cm$ , para visualizar de esta forma la variación en el factor de acoplo con la distancia, los datos recibidos de este estudio son los siguientes:

Tabla 4-14 Tensiones del circuito de carga a diferentes distancias vs Frecuencias

f (MHz)	$V_{IN}(V)(1.5 cm)$	$V_{OUT}(V)(1.5cm)$	V <sub>IN</sub> (3cm)	$V_{OUT}(V)(3cm)$
10	10	0.11	10	0.04
10.5	10	0.17	10	0.06
11	9.9	0.28	10	0.1
11.5	9.8	0.52	10	0.17
12	9.5	1.15	9.7	0.33
12.5	7.8	3.8	9.3	0.82

12.75	6.3	5.7		
13	8.6	4.2	7.2	3.2
13.25	9.1	3.4		
13.5	9.1	3.1	6.8	5.6
13.56	9	3.2	6.6	5.6
14	8.3	4	6.2	4.6
14.5	4.8	5.5	9.2	1.5
15	8.8	2.4	9.6	0.71
15.5	9.4	1.3	9.6	0.43
16	9.5	0.8	9.6	0.3
16.5	9.5	0.57	9.6	0.22
17	9.4	0.43	9.5	0.18
17.5	9.4	0.35	9.4	0.15
18	9.3	0.3	9.3	0.125
18.5	9.2	0.25	9.2	0.11
19	9.1	0.22	9.1	0.1
19.5	9	0.2	9	0.095
20	9	0.16	9	0.09





Los datos de esta gráfica han sido tomados a diferentes distancias de bobinas, siendo 0.5cm (estándar, azul), 1.5cm (naranja) y 3cm (gris).

Como se puede observar en la gráfica, con las bobinas situadas a 0.5cm la tensión muestra un efecto de sobre acoplo. Esto ocurre porque al ser el factor de acoplo demasiado grande aparece una desviación en la frecuencia óptima que maximiza la potencia  $P_{MN}$ ; principalmente debido al efecto de la resistencia reflejada por el circuito receptor en el circuito transmisor; tal y como se ha descrito en el [apartado 2]. Así pues, este efecto es responsable de que la frecuencia óptima para conseguir el máximo  $V_{OUT}$  se ubique en dos valores centrados a ambos lados de la frecuencia de resonancia original del sistema.

Como se observa en la Fig. 4.24, con el factor de acoplo calculado para 0.5cm de distancia ocurría el mismo caso. Sin embargo, para el factor de acoplo calculado para 1.5cm de distancia este efecto es casi indistinguible, ya que únicamente logra deformar el pico del valor más alto de  $V_{OUT}$ . Lo que hace pensar que, o bien nuestro factor de acoplo es en realidad superior al calculado, o bien las resistencias parásitas que producen elementos como la placa permiten que haya sobre acoplo a menor factor de acoplo.

# 4.2.6 Medida de eficiencia del enlace y potencia entregada al circuito RX.

La potencia del circuito transmisor en corriente alterna se puede calcular mediante la ecuación (4.15), mientras que la eficiencia, se puede calcular con la fórmula (4.16):

$$P_{T_{X}} = 0.5 \, real \{ V_{T_{X}} I_{T_{X}}^{*} \} = 0.5 \, real \left\{ V_{T_{X}} \, \frac{V_{T_{X}}}{R_{T_{X}}^{*}} \right\}$$
$$= 0.5 \, V_{T_{X}}^{2} \, real \left\{ \frac{1}{R_{T_{X}}^{*}} \, \frac{R_{T_{X}}}{R_{T_{X}}} \right\}$$
$$= 0.5 \, \frac{V^{2}}{R^{2}} \, real \{ R \}$$
(4.15)

$$\eta_{LINK} = \frac{P_{MN}}{P_{tx}} \tag{4.16}$$

De esta forma, las funciones para introducir en la simulación del circuito con el CAD PSPICE, para calcular dichos valores serían las siguientes:

*P<sub>MN</sub>*=0.5\* (ABS (PWR (V (VRX),2)) / ABS (PWR (V (VRX)/I (RRX),2))) \*R (V (VRX)/I (RRX))

*P<sub>TX</sub>*=0.5\* (ABS (PWR (V (VTX),2)) / ABS (PWR (V (VTX)/I (RTX),2))) \*R (V

#### (VTX)/I (RTX))

EFF= (0.5\* (ABS (PWR (V (VRX),2)) / ABS (PWR (V (VRX)/I (RRX),2)) )\*R (V (VRX)/I (RRX)) )/ (0.5\* ( ABS (PWR (V (VTX),2)) / ABS (PWR (V (VTX)/I (RTX),2)) )\*R (V (VTX)/I (RTX)))

Basándose en los cálculos del apartado 4.3.4, el valor en el que alcanza el MPP (Punto de máxima Potencia) aparece cuando la  $R_{OUT}$  es de 300  $\Omega$  y el valor al que alcanza el MEP (Punto de máxima Eficiencia) con una  $R_{OUT}$  de 142  $\Omega$ .

Así, como con los valores previos, se implementa el circuito de la Fig. 4.26. Los resultados de la simulación aparecen a continuación del circuito en Fig. 4.27, a partir de un barrido en f = [10, 20] MHz, representándose los resultados de las fórmulas previas. Siendo el resultado de las gráficas, la potencia y la eficiencia que hay en dicha banda de frecuencia.



Fig. 4.26. Circuito ideal con resistencia de carga en puntos MEP y MPP



Fig. 4.27. Frecuencia frente a potencia sin sondas en el circuito receptor a diferentes impedancias de carga

Respecto a la  $P_{MN}$ , como se ve en la Fig. 4.27 anterior, alcanza su valor máximo con  $R_L = 300 \Omega$  a la frecuencia de resonancia, tal y como constata la teoría, siendo este valor de  $R_L$  el calculado para el MPP.



Fig. 4.28. Frecuencia frente a eficiencia ideal del circuito a diferentes impedancias de carga

Al analizar la eficiencia en la Fig. 4.28 anterior, se observa también que el dispositivo alcanza la máxima eficiencia para una  $R_L = 142 \Omega$  a la frecuencia de resonancia, constatando lo demostrado en la teoría por ser este el punto de MEP calculado.

Una vez demostrados ambos conceptos en la simulación con el CAD empleando la simulación del circuito sin sondas de medida, se procede a realizar la comparación con el resultado obtenido en el laboratorio, donde los datos resultantes son los siguientes siendo la primera gráfica la equivalente al MEP y la segunda gráfica al MPP:

#### <u>ΜΕΡ (*R*<sub>out</sub>=150 Ω)</u>

f (MHz)	$V_{IN}(V)$	$V_{RX}(V)$	$P_{TX}(W)$	<b>P</b> <sub>MN</sub> (μ <b>W</b> )	<i>Eff</i> (-)
10	10	0.51	0.00182929	4.652171	0.002543
10.5	10	0.57	0.00254044	6.3898	0.002515
11	10	0.66	0.00366902	9.369545	0.002554
11.5	10	0.8	0.00560183	15.007173	0.002679
11.75	9.8	0.87	0.0068414	18.511026	0.002706

Tabla 4-15 Tabla con los valores de potencias y eficiencia del laboratorio del MEP

12	10	0.98	0.00929299	24.476716	0.002634
12.25	9.7	1.11	0.01178709	32.693821	0.002774
12.5	9.7	1.28	0.01659535	45.226713	0.002725
13	9.4	1.85	0.03803706	102.002415	0.002682
13.5	8.4	3.14	0.13774501	316.341408	0.002297
13.56	7.9	3.56	0.16015794	410.205768	0.002561
14	2.61	5.9	0.1041289	1198.840942	0.011513
14.5	8	3.9	0.07622322	561.405186	0.007365
15	9.2	2.2	0.03116977	190.994251	0.006128
15.25	9.4	1.78	0.02190161	129.113436	0.005895
15.5	9.5	1.5	0.01613812	94.63513	0.005864
15.75	9.5	1.3	0.01223049	73.326717	0.005995
16	9.5	1.15	0.00961612	59.160126	0.006152
16.5	9.5	0.93	0.00643637	41.108906	0.006387
17	9.5	0.78	0.00464243	30.663096	0.006605
17.5	9.4	0.67	0.00345328	23.951398	0.006936
18	9.3	0.6	0.00266804	20.301873	0.007609
18.5	9.1	0.55	0.00207597	17.988402	0.008665
19	9.1	0.5	0.00172626	15.678115	0.009082
19.5	9	0.47	0.00143034	14.563907	0.010182
20	9	0.44	0.00123024	13.41447	0.010904
MAX			0.16015794	1198.840942	0.011513

#### $\underline{\text{MPP}} (R_{out}=330 \Omega)$

f (MHz)	$V_{IN}(V)$	$V_{RX}(V)$	$P_{TX}(W)$	$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{M}\boldsymbol{N}}\left(\boldsymbol{\mu}\boldsymbol{W}\right)$	<i>Eff</i> (-)
10	10	0.51	0.001829	12.258469	0.006702
10.5	10	0.57	0.00254	27.228686	0.01072
11	10	0.66	0.003669	39.741009	0.010832
11.5	10	0.8	0.005602	63.287354	0.011297

11.75	9.8	0.87	0.006841	77.809899	0.011374
12	9.8	0.98	0.008925	102.531602	0.011488
12.25	9.7	1.11	0.011787	136.477085	0.011579
12.5	9.7	1.28	0.0165195	188.131592	0.011337
13	9.4	1.85	0.038037	421.236147	0.011074
13.5	8.2	3.3	0.131264	1432.040459	0.01091
13.56	7.6	3.7	0.148225	1814.247243	0.01224
14	2	5.9	0.061143	4876.062388	0.039874
14.5	8.2	3.5	0.080082	1823.289194	0.011384
15	9.2	2	0.03117	630.873424	0.01012
15.25	9.5	1.7	0.02237	468.648657	0.010475
15.5	9.5	1.45	0.016138	350.439491	0.010858
15.75	9.6	1.25	0.012489	267.530098	0.010711
16	9.6	1.1	0.00982	212.697116	0.01083
16.5	9.5	0.9	0.006436	149.809728	0.011638
17	9.5	0.76	0.004642	112.186317	0.012084
17.5	9.4	0.67	0.003453	91.40606	0.013236
18	9.3	0.6	0.002668	76.699591	0.014374
18.5	9.1	0.55	0.002076	67.314146	0.016212
19	9.1	0.5	0.001726	58.006693	0.016804
19.5	9	0.47	0.00143	53.3619	0.018658
20	9	0.44	0.00123	48.615522	0.019762
MAX			0.148225	4876.062388	0.039874

A su vez, como se ha hecho previamente, los valores recibidos en el laboratorio se muestran además en Fig. 4.29, Fig. 4.30, Fig. 4.31con gráficas de las potencias transmisora y receptora y la eficiencia, que es el cociente entre estas dos.



Fig. 4.29. Frecuencia frente a potencia en el circuito transmisor en MEP y MPP del laboratorio







Fig. 4.31. Frecuencia frente a eficiencia en el circuito receptor en MEP y MPP del laboratorio

Como se observa en las gráficas, al contrario de la teoría, en el punto de MPP se obtienen los mejores resultados, tanto para la eficiencia, como para la potencia de transmisión. Mediante un análisis más exhaustivo de la situación se descubre que el motivo de este error es debido a las sondas empleadas en la medida.

Por ello, se ha implementado el mismo circuito, pero considerando las sondas de medida, como se muestra en la Fig. 4.32. Los resultados de esta simulación aparecen en la Fig. 4.33, donde se ha obtenido mediante un barrido de la frecuencia de operación en el rango entre f = [3, 20] MHz con ambas configuraciones, tanto el MEP (verde) y el MPP (rojo).



Fig. 4.32. Circuito real con sondas en  $V_{R_X}$  para medir  $P_{MN}$  con diferentes resistencias de carga.



Fig. 4.33. Gráfica de Frecuencia vs Potencia del circuito transmisor en circuito real con sondas en MEP y MPP

Respecto a la  $P_{TX}$ , se puede observar que esta no se ve apenas afectada por el valor de  $R_L$  sino que ambos valores son muy similares, tal y como se observó previamente en el trabajo del laboratorio.

Sin embargo, al simular el circuito y realizar un estudio de la  $P_{MN}$  con las fórmulas previamente explicadas, el programa devuelve la gráfica de la Fig. 4.34. En esta gráfica se puede observar como el MPP (rojo) permite una mayor potencia suministrada, tal y como se esperaba del estudio teórico, al ser este el punto de mayor potencia suministrada al receptor.

Además, en esta gráfica se observa que, a 4.83 MHz, existe un pico algo despreciable, en el cual existe un crecimiento inesperado de la  $P_{MN}$ . Este pico se puede explicar debido a la resonancia de la sonda con la bobina receptora, el cual ocurre a 4.83 MHz como se ve calculada en la ecuación que viene a continuación. Empleando la fórmula (4.5).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{13.9\mu H}{L_{Rx}} \cdot \frac{78pF}{C_{SOND}}}}$$

$$= 4.83 MHz$$
(4.5)



Fig. 4.34. Gráfica de frecuencia frente a Potencia en el circuito receptor (P<sub>MN</sub>)

En la gráfica de la eficiencia, se observa también un crecimiento inesperado a la frecuencia de 4.83 MHz, de la misma forma que se comentaba con la  $P_{MN}$  en el párrafo previo. Sin embargo, en este caso, este crecimiento no es nada despreciable, sino que tiene un valor tan alto, que no se observa ningún ancho de banda a la frecuencia de trabajo de f = 13.56 MHz.



Fig. 4.35. Gráfica de la frecuencia vs eficiencia en circuito real con sondas en el MEP y el MPP

Además, en la Fig. 4.35, se observa también como en el punto del MPP, el circuito permite una mayor eficiencia que en el MEP, lo cual es completamente contrario al análisis teórico, pero demuestra la correcta construcción del circuito en el laboratorio, puesto que el estudio práctico y este análisis parecen coincidir.

Debido a este resultado en que el MPP permite mayor eficiencia en el dispositivo que el MEP, los estudios con este dispositivo quedan completamente imposibles de demostrar, debido a que las sondas de medida son un mal que no se puede evitar y es necesario para conseguir resultados del laboratorio.

#### 4.2.7 Conclusiones

Como se ha podido observar durante el apartado, las bobinas de 5 cm de diámetro proporcionan una gran resistencia parásita, y disminuir el valor del condensador hace que la capacitancia de las sondas afecte en mayor medida al circuito, haciendo que las medidas tomadas no sean correctas. Para solucionar este problema, se ha repetido el mismo análisis empleando unas bobinas más pequeñas que tendrán unas resistencias parásitas menores. Además, al reducir la inductancia de las bobinas se debe aumentar la capacitancia de los condensadores para mantener la frecuencia de funcionamiento en 13.56 MHz.

# 4.3 Sistema WPT con capacidad de $C_{RX} = 470$ pF.

Por los motivos previamente comentados en el apartado 4.2.7, en este apartado se procede a repetir las medidas de laboratorio con unas bobinas de un centímetro de diámetro menores que las bobinas de 5 centímetros previamente empleadas. El tamaño escogido para realizar las bobinas fue de únicamente 1cm de diámetro.

## **4.3.1** Fabricación y caracterización de inductancias

Para este circuito, se escogió un condensador de  $C_{R_X} = 470$  pF. Para que éste pudiera resonar con una bobina a  $f_0 = 13.56$  MHz, se requiere una bobina de 0.293 µH, (4.5). Para lograr tal inductancia con un diámetro de 1cm, se requieren 4.5 vueltas, como se observa en la ecuación (4.4)

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \rightarrow L = \left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2 C = \left(\frac{1}{2\pi \left(\frac{13.56MHz}{f_0}\right)}\right)^2 \left(\frac{470pF}{C}\right)$$
(4.5)

= **0**.293 μ*H* 

$$L = 0.394 \frac{r^2 N^2}{9r + 10(N d)} \rightarrow$$

$$\mathbf{0.277}\mu H = 0.394 \frac{(0.5)^2 (\mathbf{4.5})^2}{9 (0.5) + 10 (\mathbf{4.5} \ 0.06)}$$

$$(4.4)$$

Sin embargo, al realizar estas bobinas, el circuito no resonaba correctamente (véase apartado 4.2.2 y 4.3.2 para estudio de la frecuencia de resonancia). Por ello, se realizaron modificaciones en las bobinas aumentando su inductancia hasta lograr la correcta resonancia con el condensador resonador.

Una vez se consiguió la resonancia a la frecuencia deseada de  $f_0 = 13.56 MHz$ , se realizó un análisis de las bobinas y los condensadores empleando un analizador de redes, el cual devolvió los siguientes datos.

Tabla 4-17. Características de bobinas y condensadores recibidos por el analizador de redes.

$C_{TX}$	C <sub>RX</sub>	$L_{TX}$	L <sub>RX</sub>
454 pF /1.35 Ω	432 pF/1.38 Ω	0.287μH / 0.34 Ω	$0.303 \mu H \ / \ 0.37 \ \Omega$

Como se puede observar, en este caso, la resistencia parasita, no es debida principalmente a la bobina, sino al condensador, puesto que sus resistencias parásitas son superiores a la de las bobinas.

Una vez conocido el valor de las bobinas y los condensadores el circuito resultante se puede observar en la siguiente figura:



Fig. 4.36. Circuito de resonadores LC con bobinas pequeñas

#### 4.3.2 Identificación de la frecuencia de resonancia

Tal y como se hizo en el apartado 4.2.2, para analizar la resonancia del condensador con la bobina, se conecta el circuito transmisor teniendo en cuenta la sonda de medida en  $V_{IN}$ , con la cual queda el circuito de la siguiente forma:



Fig. 4.37. Circuito de medida de la resonancia del circuito transmisor

Al igual que en el apartado 4.2.2. Se realiza una simulación de la implementación del circuito de la Fig. 4.37 a partir de un barrido de la frecuencia entre f = [1,25] MHz, representando la tensión obtenida en el punto denominado como  $V_{in}$  en el esquema de la Fig. 4.37.



Fig. 4.38. Gráfica de la resonancia del circuito transmisor de Frecuencia vs Voltaje de entrada

Como se observa en la Fig. 4.38,  $V_{in}$  tiene un descenso del voltaje, bajando de los 10 V que tiene a 1 MHz a 0.32 V en la frecuencia de funcionamiento.

Con ello, se demuestra que el circuito ha sido correctamente diseñado para que el circuito resuene a 13.56 MHz aproximadamente, debido a que sus admitancias tienen idéntico valor a esta frecuencia, pero de signo opuesto; lo que hace que el conjunto de sus impedancias sea idealmente nulo. En realidad, la suma de las admitancias de  $C_{T_X}$  y  $L_{T_X}$  es no nula, pero sí muy pequeña en comparación con la resistencia del generador de funciones. Por ello, el circuito resultante a la frecuencia de resonancia estaría compuesto únicamente por la resistencia del generador de funciones  $R_{SIG}$  y llas pérdidas del condensador y la bobina, denominadas como  $R_{T_X}$ .

Para justificar el valor despreciable de la suma de las admitancias de  $C_{T_X}$  y  $L_{T_X}$ , se ha calculado su magnitud a la frecuencia de resonancia obtenida de  $f_0 = 13.97$  MHz; dando como resultados dos valores prácticamente idénticos y de signo contrario. Como se observa en los siguientes cálculos.

$$Z_{C} = \frac{1}{jwC} = \frac{1}{j2\pi} \underbrace{(13.97MHz)}_{f_{0}} \underbrace{(454pF)}_{C_{T_{X}}} = -25.09j$$
(4.7)

$$Z_L = jwL = j2\pi \underbrace{(13.97MHz)}_{f_0} \underbrace{(0.287\mu H)}_{L_{T_X}} = 25.19j$$
(4.8)

Como se observa, a la frecuencia de 13.97 MHz las impedancias de la bobina y el condensador se anulan entre sí, quedando únicamente la resistencia parásita que

ejercen ambos componentes, la cual tiene un valor de 1.69  $\Omega$ . Con esos valores, la tensión en  $V_{in}$  a esta frecuencia será de 0.3269V, similar al mínimo de la gráfica.

$$V_{in} = V_S \frac{R_{Rx}}{R_{SIG} + R_{RX}} = \underbrace{10}_{V_S} \frac{\underbrace{1.69}_{SIG}}{\underbrace{50}_{R_{SIG}} + \underbrace{1.69}_{R_{RX}}} = 0.3269$$
(4.9)

Esta es una aproximación sin emplear la impedancia que ejerce la sonda. El cálculo real se debe realizar considerando la influencia de ésta. Así, la impedancia total del bloque se puede calcular mediante la fórmula (4.10) y la  $V_{in}$  real usando (4.9).

$$Z_{(V_{in})} = \frac{\left(\left(R_{Tx} - \frac{j}{C_{Tx} w} + jL_{Tx} w\right) \left(\frac{R_{sond} \left(-\frac{j}{C_{sond} w}\right)}{R_{sond} - \frac{j}{C_{sond} w}}\right)\right)}{\left(R_{Tx} - \frac{j}{C_{Tx} w} + jL_{Tx} w\right) + \left(\frac{R_{sond} \left(-\frac{j}{C_{sond} w}\right)}{R_{sond} - \frac{j}{C_{sond} w}}\right)}$$

$$V_{in} = Vs \frac{Z}{Z + R_{sign}}$$

$$(4.10)$$

Para demostrar este funcionamiento, se realiza el mismo estudio con nuestro circuito en el laboratorio, para verificar que funciona correctamente a la frecuencia escogida, los datos recogidos en el laboratorio son los siguientes:

f(MHz)	$V_{in}(Vpp)$	f(MHz)	V <sub>in</sub> (Vpp)	f(MHz)	V <sub>in</sub> (Vpp)
1	10	11.5	2.3	17	2.21
2	9.98	12	1.79	17.5	2.5
3	9.94	12.5	1.3	18	2.78
4	9.44	13	0.84	18.5	3.03
5	8.81	13.5	0.49	19	3.25
6	8	13.56	0.47	19.5	3.46
7	7.11	14	0.43	20	3.65
8	6.11	14.5	0.63	21	4.04
9	5.04	15	0.93	22	4.39

Tabla 4-18. Tabla de resonancia del circuito transmisor en laboratorio

10	3.91	15.5	1.28	23	4.7
10.5	3.35	16	1.6	24	4.98
11	2.82	16.5	1.93	25	5.22



Fig. 4.39. Gráfica de resonancia del circuito transmisor en laboratorio

Adicionalmente, para asegurar su correcto funcionamiento con el circuito transmisor, se realiza el mismo estudio con el circuito receptor de la forma que se muestra en la Fig. 4.40.



Fig. 4.40. Circuito para medida de la frecuencia de resonancia del circuito receptor

Tabla 4-19. Tabla para medir la frecuencia de resonancia en el laboratorio del circuito receptor

f (MHz)	$V_{in}\left(Rx\right)\left(V ight)$	f (MHz)	$V_{in}\left(Rx\right)\left(V ight)$	f (MHz)	$V_{in}\left(Rx\right)\left(V ight)$
10	10.3	13.56	2.71	18	1.52
10.5	10	13.6	2.24	18.5	1.82

11	9.8	14	1.82	19	2.1
11.5	9.24	14.5	1.42	19.5	2.36
12	8.53	15	1.1	20	2.63
12.5	7.68	15.5	0.9	21	2.88
12.75	6.72	16	0.86	22	3.12
13	5.75	16.5	0.88	23	3.35
13.2	4.73	17	1.01	24	3.56
13.4	3.7	17.5	1.25	25	3.75
13.5	3.19				



Fig. 4.41. Gráfica que muestra la resonancia del circuito receptor en laboratorio

En las gráficas se puede ver que ambos circuitos oscilan en torno a 13.56 MHz, demostrando el correcto funcionamiento del circuito.

También se observa que para regresar a los 10V que recibe del generador de funciones, esta vez necesita un valor más alejado de frecuencias que con el circuito de las bobinas grandes. Esto es debido al factor de calidad y el ancho de banda, temas que serán explicados más adelante en el apartado 4.4.1

## 4.3.3 Medida indirecta del factor de acoplo

En este momento, sólo falta conocer la  $R_L$  adecuada para el circuito. Para ello se requiere conocer el factor de acoplo  $(k_{T_X-R_X})$  que ejercen ambas bobinas entre sí, como se explica en el apartado 4.2.3.

Para esto, se realiza un experimento en el que se colocan ambas bobinas enfrentadas en abierto, estando  $L_{T_X}$  conectada únicamente a una fuente de alimentación y  $L_{R_X}$  a la sonda, tal y como se muestra en el circuito de la siguiente gráfica.



Fig. 4.42. Circuito de medida del factor de acoplo con la bobina transmisora conectada a fuente y la receptora a la sonda

Según el voltaje que se transmita de  $L_{T_X}$  a  $L_{R_X}$  y su desfase, la k se puede obtener de la forma que se observa en la fórmula (4.13) [25].

En el apartado 4.2.3 se detalla el cálculo del factor de acoplo para este sistema

Se realiza este experimento con las bobinas enfrentadas, mientras se van alejando, para conocer el descenso del factor de acoplo respecto a la distancia de las bobinas y se obtienen los siguientes datos:

Distancia (cm)	<i>Fase</i> ( <sup>0</sup> )	V1	V2	M (nH)	<b>k</b> (-)
0	12	10	1,6	71.241145	0,151474302
0.5	12	10	1.2	34.8225494	0,102172086
1	13	10	0.8	23.3777484	0,068592144
2	11	10	0.3	8.79316363	0,025799831
3	10	10	0.1	2.94604563	0,008643929
4	8	10	0.08	2.07190171	0,006079122
5	30	10	0.03	0.88853934	0,002607044

Tabla 4-20. Datos del factor de acoplo recogido de las bobinas en el laboratorio



Fig. 4.43. Gráfica de la relación entre acoplo y distancia entre bobinas.

Como se comentó previamente en el apartado 4.2.3., para escoger la distancia estándar del circuito, debido a que nuestro proyecto pretende demostrar el posible funcionamiento de un sistema de enlace inductivo con un dispositivo AIMD, se escoge 5mm como distancia estándar, debido a que la piel tiene un grosor máximo de 4mm, con un pequeño margen [24].

### 4.3.4 Medida de la tensión entregada al circuito RX

Una vez conocidos los siguientes valores, se puede calcular la resistencia de carga  $R_L$  necesario para lograr el MEP y el MPP.

Tabla 4-21. Datos del circuito con las bobinas pequeñas.	
--	--

Frecuencia	$L_{TX}$	L <sub>RX</sub>	R <sub>TX</sub>	R <sub>RX</sub>	K	R <sub>fuente</sub>
13.56 MHz	0.287 µH	0.303 µH	1.69 Ω	1.75 Ω	0.1	50

$$Re\left\{Z_{MN_{opt}-\eta}\right\}_{MEP} = R_{Rx}\sqrt{k_{Tx-Rx}^2Q_{Tx}Q_{Rx} + 1}$$
$$= 1.69\sqrt{0.1^2 \frac{13.56 \cdot 10^6 \ 2\pi \ 0.287 \cdot 10^{-6}}{1.69} \frac{13.56 \cdot 10^6 \ 2\pi \ 0.303 \cdot 10^{-6}}{1.75} + 1}$$
(3.3)
$$= 3 \ \Omega$$

$$Re\left\{Z_{MN_{opt-P_{MN}}}\right\}_{MPP} = R_{Rx}(1 + k_{Tx-Rx}^2 Q_{Tx} Q_{Rx})$$
  
=  $1.69\left(1 + 0.1^2 \frac{13.56 \cdot 10^6 \ 2\pi \ 0.287E - 6}{1.72 + 50 \ (*)} \frac{13.56E6 \ 2\pi \ 0.303E - 6}{1.69}\right)$  (3.11)  
= **1.87**  $\Omega$ 

Como se observaba en el apartado la resistencia que ejerce la fuente de alimentación se debe considerar para el punto de MPP, pero no para el punto de MEP. Esto es debido a que en el MEP se considera el circuito desde el condensador resonante, sin llegar a la fuente de alimentación.

Por lo que para lograr en este sistema el MEP, hace falta una resistencia  $R_{LOAD}$  de 3  $\Omega$ . Y para lograr el MPP, 1.87  $\Omega$ .

Debido a limitaciones por las resistencias empleadas, en este caso se ha usado únicamente la resistencia disponible más pequeña a la que se tiene acceso en paralelo a otra del mismo valor, 4.7  $\Omega$ . Lo cual, en paralelo con otra del mismo valor, al medir con el multímetro tienen un valor de 2.48  $\Omega$ .

Una vez con todos los datos conocidos, y empleando la placa que se utilizó en el apartado anterior para colocar los diferentes componentes el circuito a realizar debe ser de la topología que aparece en Fig. 4.44.



Fig. 4.44. Circuito base con todos los componentes.

A continuación, se implementa el circuito de la Fig. 4.44 para su implementación en la herramienta CAD PSPICE. Los resultados de la simulación incluidos en la Fig. 4.45 a continuación se han obtenido a partir de un barrido de frecuencia entre f = [7,20]MHz. Representando el valor de la tensión entregada a la bobina receptora  $V_{R_X}$  a diferentes factores de acoplo, siendo estos los calculados en el apartado 4.3.3 propios de las distancias  $d_{T_X} = [0.5, 1, 2]$  cm usando en el CAD PSPICE  $k_{TX-R_X} = [0.025, 0.068, 0.1]$ . Véase Tabla 4-20.



Fig. 4.45. Gráfica de Frecuencia frente a  $V_{R_x}$  con diferentes distancias (verde; k=0.025), (rojo; k=0.068) y (azul; k=0.1).

Como se observa en la Fig. 4.45, las tensiones en la frecuencia de trabajo alcanzan los 2 V. Sin embargo, como se observó en el apartado anterior, estos datos podrían no ser fiables en el laboratorio debido a las sondas de medida. Por ello, a la implementación del circuito previo, le añadimos las sondas de medida de los valores obtenidos en el laboratorio, para verificar que, con las bobinas reducidas, el efecto capacitivo de estas sondas no afecta al análisis del laboratorio del circuito. Una vez añadidas las sondas de medida en la implementación para el CAD PSPICE, el circuito queda de la siguiente forma.



Fig. 4.46. Circuito real con sondas en  $V_{RX}$ .

Con esta implementación del circuito para la herramienta CAD PSPICE. Los resultados de la simulación aparecen en la Fig. 4.47 a continuación. En este análisis se ha realizado un barrido de frecuencia entre f = [7, 20] MHz. Representando la tensión transmitida a la bobina receptora  $V_{R_X}$  Repitiendo los mismos factores de acoplo k = 0.025, 0.068, 0.1. Véase Tabla 4-20



Fig. 4.47. Gráfica de Frecuencia frente a  $V_{R_x}$  real con diferentes distancias (verde; k=0.025), (rojo; k=0.068) y (azul; k=0.1).

Como se observa, las medidas con sondas esta vez son muy similares a las medidas sin sonda, lo cual hace pensar que la teoría de aumentar el valor del condensador de resonancia es correcta y esta vez los datos no son afectados por la sonda de medida.

Una vez demostrado que esta vez el efecto de las sondas es mínimo, se realiza el circuito en el laboratorio, en el cual recibimos los siguientes datos

f (MHz)	$V_{in}(V)(0.5cm)$	$V_{RX}(V)(0.5cm)$	f (MHz)	$V_{in}(V)(0.5cm)$	$V_{RX}(V)(0.5cm)$
7	10	0.388	14.5	1.2	2.37
8	10	0.561	15	1.96	2.13
9	9.4	0.8	15.5	2.7	1.91
10	7.6	1.15	16	3.5	1.72
10.5	6.7	1.65	16.5	4.3	1.56
11	5.7	2	17	5	1.42
11.5	4.8	2.37	17.5	5.6	1.3
12	3.8	2.73	18	6.2	1.2
12.5	2.9	2.97	18.5	6.9	1.1
13	2	3	19	7.4	1

Tabla 4-22. Tensión suministrada a la bobina receptora ( $V_{R_X}$ ).

13.5	1.2	2.87	19.5	7.9	0.93
13.56	1	2.8	20	8.2	0.86
14	0.8	2.55			

Una vez realizado el estudio de la tensión suministrada a la bobina receptora con la distancia estándar, se procede a alejar las bobinas, obteniendo los siguientes resultados de  $V_{R_X}$ 

Tabla 4-23. Tensión transmitida a la bobina receptora  $(V_{R_X})$  a diferentes distancias (lcm, 2cm).

f (MHz)	V <sub>in</sub>	$V_{RX}$ (1cm)	$V_{RX}$ (2cm)
7	10	0.17	0.05
8	10	0.24	0.068
9	9.4	0.35	0.1
10	7.6	0.5	0.135
10.5	6.7	0.72	0.178
11	5.7	0.87	0.215
11.5	4.8	1	0.27
12	3.8	1.19	0.32
12.5	2.9	1.28	0.36
13	2	1.3	0.38
13.5	1.2	1.25	0.42
13.56	1	1.2	0.4
14	0.8	1.12	0.37
14.5	1.2	1.01	0.35
15	1.96	0.9	0.34
15.5	2.7	0.888	0.31
16	3.5	0.722	0.27
16.5	4.3	0.652	0.24
17	5	0.6	0.21
17.5	5.6	0.535	0.19
18	6.2	0.485	0.17

18.5	6.9	0.43	0.14
19	7.4	0.4	0.13
20	8.2	0.33	0.115

A continuación, aparecen las gráficas correspondientes a estas tablas. En ellas se aprecian los valores de tensión en función de la frecuencia, con diferentes distancias entre bobinas (Azul->0.5cm, Naranja->1cm y gris->2cm), lo que afecta de forma inversamente proporcional al factor de acoplo entre ellas:



Fig. 4.48. Gráfica de la tensión suministrada a la bobina receptora en laboratorio  $(V_{R_x})$ .

Como se observa en Fig. 4.48, a 2cm de distancia entre las bobinas no aparece prácticamente ninguna subida en la tensión, por lo que estas bobinas a partir de 2 cm de distancia no son recomendables.

### 4.3.5 Medida de la tensión entregada a la carga $R_L$ .

La resistencia  $R_L$ , se trata de una resistencia que debe hacer como simulación de un circuito real, proporcionando la resistencia que éste podría realizar y permitiendo optimizar el circuito para esta carga. Para medir la tensión entregada al circuito de carga se ha realizado la implementación del siguiente circuito en el CAD PSPICE para así obtener los datos de la caída de tensión  $V_{out}$  en la resistencia de carga  $R_L$ . Donde los resultados de la simulación en el CAD, se pueden observar en la Fig. 4.50. Esta gráfica muestra la tensión entregada a la resistencia de carga  $V_{out}$  variando el factor de acoplo a los valores propios de las distancias d =0.5, 1, 2 cm. Como se muestra en la gráfica de factor de acoplo, los cuales son k =0.025, 0.068, 0.1. Véase Tabla 4-20



Fig. 4.49. Circuito real con sondas colocadas en V<sub>OUT</sub>.



Fig. 4.50. Tensión en el circuito de carga variando el factor de acoplo con sonda (azul, k=0.1), (Rojo, k=0.068), (verde, k=0.025).

Una vez realizada la simulación de este circuito con sondas, todavía existía la posibilidad de que para esta tensión las sondas surtirían un cambio en la tensión, por ello, volvimos a la implementación del circuito sin sondas, el cual devolvía la siguiente gráfica, usando como en la anterior simulación los mismos factores de acoplo k = 0.025, 0.068, 0.1 propios de las distancias  $d_{T_X-R_X} = [0.5, 1, 2]$  cm como se observó en el apartado 4.3.3. Véase Tabla 4-20


Fig. 4.51. Tensión en el circuito de carga variando el factor de acoplo sin sondas (azul, k=0.1), (Rojo, k=0.068), (verde, k=0.025).

Al igual que en el apartado anterior con la  $V_{RX}$ , las sondas en este apartado apenas afectan a los resultados, al contrario de cómo se observó en el apartado 4.3.4.

Con las simulaciones realizadas en el CAD PSPICE y los datos obtenidos, se pasa a la comparación con los datos del circuito en el laboratorio a la distancia estándar  $ded_{T_x-R_x} = 0.5$  cm, los cuales son los siguientes

f (MHz)	V <sub>in</sub>	$V_{OUT}(0.5cm)(mv)$	f (MHz)	V <sub>in</sub>	$V_{OUT}(0.5cm)(mv)$
7	10	27	14.5	1.2	509
8	10	47	15	1.96	470
9	9.4	78	15.5	2.7	452
10	7.6	134	16	3.5	428
10.5	6.7	220	16.5	4.3	410
11	5.7	285	17	5	390
11.5	4.8	358	17.5	5.6	375
12	3.8	440	18	6.2	355
12.5	2.9	510	18.5	6.9	348
13	2	550	19	7.4	330
13.5	1.2	555	19.5	7.9	325

Tabla 4-24. tensión generada en el circuito de carga del laboratorio a 0.5 cm.

13.56	1	550	20	8.2	313
14	0.8	526			

Una vez obtenidos los datos del circuito a la distancia estándar, se procede a realizar el mismo análisis separando las bobinas, para poder estudiar el efecto de la distancia en la tensión entregada a la carga: $V_{OUT}$ .

f (MHz)	$V_{in}(V)$	$V_{OUT} (1cm) (mv)$	$V_{OUT}\left(2cm\right)\left(mv ight)$
7	6.4	10	5
8	5.4	20	6.5
9	4.7	31	7
10	3.8	56	14
10.5	3.35	95	28
11	2.85	123	35
11.5	2.4	155	44
12	1.9	192	54
12.5	1.45	226	65
13	1	245	70
13.5	0.6	250	73
13.56	0.5	248	71
14	0.4	240	68
14.5	0.6	230	64.5
15	0.98	220	62
15.5	1.35	210	58
16	1.75	200	54
16.5	2.15	190	50
17	2.5	184	47
17.5	2.8	176	45
18	3.1	170	44
18.5	3.45	165.7	43
19	3.7	160	41

Tabla 4-25. Tensión en el circuito de carga con bobinas a 1cm y 2cm distancia.

19.5	3.95	155	41
20	4.1	152	40



Fig. 4.52. Tensión en circuito de carga ( $V_{OUT}$ ) en laboratorio a diferentes distancias entre bobinas (azul; d=0.5cm), (naranja; d=1cm) y (gris; d=2cm).

# 4.3.6 Medida de eficiencia del enlace y potencia entregada al circuito RX.

En el apartado 4.2.6, se demuestra el método para lograr las fórmulas que hace falta introducir al sistema CAD PSPICE para recibir los resultados para obtener la potencia y la eficiencia.

Basándose en los cálculos del apartado 4.3.4, el valor en el que alcanza el MPP (Punto de máxima Potencia) aparece cuando la  $R_{OUT}$  es de 1.8  $\Omega$  y el valor al que alcanza el MEP (Punto de máxima Eficiencia) con una  $R_{OUT}$  de 3  $\Omega$ .

Para demostrar el MPP y MEP, se realiza la implementación en el CAD del siguiente circuito y se hace un estudio del barrido variando la resistencia de carga a diferentes valores  $R_L = 1.8, 3, 5, 7 \Omega$  con un barrido de f = [10, 20] MHz.



Fig. 4.53. Circuito base sin sondas.

Respecto a la  $P_{MN}$ , como se ve en la Fig. 4.54, alcanza su valor máximo con  $R_L$  = 1.8 n  $\Omega$  a la frecuencia de resonancia, como constata la teoría, al ser esta  $R_L$  la equivalente al MPP.



Fig. 4.54. Frecuencia frente a potencia generada por la bobina receptora  $(P_{MN})$  con diferentes impedancias de carga.

Al analizar la eficiencia, de la implementación del circuito, el CAD devuelve la siguiente gráfica, con un máximo con una  $R_L = 3 \Omega$  a la frecuencia de resonancia, como se calculó de forma teórica al ser el punto de MEP.



Fig. 4.55. Frecuencia frente a la eficiencia con diferentes impedancias de carga.

Una vez explicados ambos puntos de optimización en un circuito ideal, se procede a realizar el estudio de la potencia y eficiencia de nuestro circuito experimental para  $R_L$ =2.47  $\Omega$ , los datos obtenidos en el laboratorio aparecen en la tabla a continuación, junto con una gráfica de ellos después.

f (MHz)	V <sub>IN</sub>	$V_{RX}(V)$	$P_{TX}(W)$	<b>P</b> <sub>MN</sub> (μ <b>W</b> )	<i>Eff</i> (-)
5	7.9	0.17	0.0141174	0.000007	0.000496
6	7	0.26	0.01824563	0.000022	0.001206
7	6.4	0.388	0.02461844	0.000067	0.002722
8	5.4	0.561	0.02842455	0.000184	0.006473
9	4.7	0.8	0.03595597	0.000472	0.013127
10	3.8	1.15	0.04169385	0.001203	0.028853
10.5	3.35	1.65	0.04478866	0.00273	0.060953
11	2.85	2	0.04648376	0.0044	0.094657
11.5	2.4	2.37	0.04974621	0.006749	0.135669
12	1.9	2.73	0.05065122	0.009746	0.192414
12.5	1.45	2,97	0.05359295	0.01251	0.233426
13	1	3	0.05532798	0.013797	0.249367
13.5	0.6	2.87	0.0553977	0.013609	0.24566

Tabla 4-26. Tabla con las potencias y las eficiencias recogidas en laboratorio.

13.56	0.5	2.8	0.05385819	0.013068	0.29796
14	0.4	2.55	0.05164622	0.011547	0.247544
14.5	0.6	2.37	0.05013251	0.010687	0.236792
15	1	2.13	0.05156844	0.009232	0.179024
15.5	1.35	1.91	0.04919132	0.007921	0.161024
16	1.75	1.72	0.05069011	0.00684	0.134938
16.5	2.15	1.56	0.05191372	0.00598	0.115191
17	2.5	1.42	0.05100425	0.005255	0.103031
17.5	2.8	1.3	0.04882437	0.004664	0.095526
18	3.1	1.2	0.04737106	0.004201	0.088683
18.5	3.45	1.1	0.04777018	0.003726	0.077998
19	3.7	1	0.04574833	0.003246	0.070953
19.5	4	0.93	0.0453349	0.002954	0.06516
20	4.1	0.86	0.04099511	0.002655	0.064764
MAX			0.0553977	0.013797	0.249367



Fig. 4.56. Frecuencia frente a potencia de transmisión.



Fig. 4.57. Frecuencia frente a la potencia generada por la bobina receptora ( $P_{MN}$ ).



Fig. 4.58. Frecuencia frente a la eficiencia del dispositivo.

Como cabría esperar por la teoría, en la frecuencia de funcionamiento se consigue el mayor rendimiento, en ambas potencias y en el valor de la eficiencia.

Para comparar debidamente estos datos con los de la simulación del CAD PSPICE, se realiza la implementación del siguiente circuito Fig. 4.59, como se vio previamente, también aparecen en él las sondas colocadas para medir  $V_{in}$  en el circuito transmisor y  $V_{R_X}$  en el circuito receptor.

Mediante esta implementación se realiza un estudio de la potencia transmitida por la bobina  $L_{T_X}$  y recibida en la bobina  $L_{R_X}$ , además de un estudio de la eficiencia que es el cociente entre estas dos, empleando las fórmulas vistas en el apartado 4.2.6.



Fig. 4.59. Circuito real con sondas colocadas para medir  $V_{R_X}$ .



Fig. 4.60. Gráfica de la frecuencia frente a la potencia de transmisión en el circuito con sondas.



Fig. 4.61. Gráfica de la frecuencia frente la potencia generada por la bobina receptora en el circuito.



Fig. 4.62. Gráfica de la frecuencia frente a la eficiencia en el circuito con sondas en  $V_{R_X}$ .

Como se observa, la eficiencia junto con las potencias suministrada y producida, alcanzan un pico máximo en torno a la frecuencia de funcionamiento de 13.56 MHz. Lo que demuestra la correcta medición del circuito con las sondas colocadas ya que estas no afectan al resultado. Además, los valores de estos análisis son muy similares a los recogidos en el laboratorio, demostrando la correcta construcción de este

#### 4.3.7 Inconvenientes de bobinas menores

Respecto a la eficiencia y la potencia, se observa que este circuito es óptimo con una resistencia de carga de 1,8  $\Omega$  si se desea la mayor potencia, y con una resistencia de 3  $\Omega$  si se requiere la mayor eficiencia.

No obstante, si la resistencia se aleja de estos valores a una impedancia no demasiado exagerada, como  $20 \Omega$ , la frecuencia de funcionamiento comienza a desplazarse debido a la resistencia reflejada.

$$R_{Rx-Tx_{ref}} = \frac{w^2 k_{Tx-Rx}^2 L_{Tx} L_{Rx}}{R_{Rx} + Re (Z_{MN})}$$
(2.12)

La siguiente gráfica ha sido realizada con la implementación del circuito prototipo que se ha empleado en otros apartados con las bobinas pequeñas sin considerar las sondas. Mediante un barrido en frecuencia de f = [7,50]MHz. Variando la  $R_L$  con valores mas amplios que en el apartado 4.3.6 con  $R_L = 2\Omega$  (verde),  $R_L = 10\Omega$  (Rojo),  $R_L = 30\Omega$  (azul),  $R_L = 100\Omega$  (fucsia).



Fig. 4.63. Circuito real con sondas colocadas para medir  $V_{R_X}$ .



Fig. 4.64. Gráfica de la frecuencia frente a la caída de tensión en el circuito de carga con diferentes impedancias de carga.

En esta gráfica, aparentemente, da la impresión de que, a mayor impedancia de carga, se obtiene mayor potencia. Sin embargo, este análisis únicamente muestra la tensión transmitida a la bobina  $L_{R_X}$ . Lo realmente importante de la transmisión, seria la potencia que es capaz de transportar, la cual se puede observar en la siguiente gráfica Fig. 4.65.



Fig. 4.65. Frecuencia frente a la potencia generada por la bobina receptora a diferentes impedancias de carga.

En esta gráfica se observa como se esperaba que la potencia suministrada es mayor en el valor cercano al MPP, tal y como explica la teoría.

Y respecto a la eficiencia se observa cómo se mueve la frecuencia de resonancia del circuito.



Fig. 4.66. Frecuencia frente a la eficiencia en el circuito con diferentes impedancias de carga.

Estas últimas gráficas, demuestran que, a grandes resistencias de carga, la frecuencia de funcionamiento se desplaza ampliamente, por lo que podría resultar que, para ciertas impedancias de carga, el circuito quede inutilizado a la frecuencia deseada.

#### 4.4 Resultados comparación de los diferentes tamaños

Una vez expuestos los resultados de ambas las bobinas de diferente tamaño, lo que falta es analizar las diferencias entre ambos tamaños de bobinas, para las bobinas de 5cm de diámetro (14,2  $\mu$ H y 13,9  $\mu$ H) y otras más pequeñas con 1cm de diámetro (0,287  $\mu$ H y 0,303  $\mu$ H), ambos a una frecuencia de funcionamiento de 13.56 MHz aproximadamente.

#### 4.4.1 Factor de calidad

En cuanto al ancho de banda (rango de frecuencias para que el cual la potencia se mantiene alta), la potencia de las bobinas grandes tiene un descenso más brusco de la potencia según se aleja ésta de la frecuencia de resonancia, como se ve en las siguientes gráficas sobre la potencia de ambos circuitos.

Estas gráficas han sido obtenidas gracias a la implementación de la topología del circuito base sin considerar las sondas con el que se empezó desde el apartado 4.2, dando valores de los diferentes componentes en cada configuración.



Fig. 4.67. Frecuencia frente a la potencia generada por la bobina receptora con las bobinas pequeñas.

Mientras que la gráfica de la potencia con bobinas pequeñas tiene un descenso más pausado y se observa que a 10 MHz tiene un valor de potencia visible.



Fig. 4.68. Frecuencia frente a la potencia generada por la bobina receptora con las bobinas grandes.

En la potencia con bobinas grandes ya en 12 MHz el valor parece prácticamente nulo.

Esto es debido al factor de calidad del circuito. Como en este caso el circuito empleado es el circuito base del apartado 4.3 y 4.2 sin considerar las sondas, se obtiene con la siguiente ecuación.

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R}$$

$$Q_{peqTX} = \frac{\sqrt{\frac{0.287\mu H}{454pF}}}{1.69} = 14.87; \ Q_{peqRX} = \frac{\sqrt{\frac{0.303\mu H}{432\,pF}}}{1.75} = 15.13 \tag{4.16}$$

$$Q_{granTX} = \frac{\sqrt{\frac{14.2\mu H}{9.4pF}}}{24.4} = 50.37; \ Q_{granRX} = \frac{\sqrt{\frac{13.9\mu H}{9.2pF}}}{23.2} = 52.98$$

Como se observa, el circuito con las bobinas grandes tiene un factor de calidad tres veces mayor, por lo que su ancho de banda es menor que con las bobinas pequeñas.

#### 4.4.2 Conclusiones

Como se ha observado, las bobinas grandes permiten una potencia suministrada a la misma distancia de casi a 350mW mientras que con las bobinas pequeñas se llega a suministrar apenas 50mW.

Además, como muestra el apartado 4.3.6, el prototipo con bobinas pequeñas no funciona para distancias superiores a 2cm ni para circuitos de carga de impedancia superior a 20  $\Omega$ .

Por estos motivos, se observa que, al reducir la bobina, ésta es incapaz de trabajar bajo diversas situaciones. Además, se reduce la potencia que ésta suministra en el circuito receptor. Por estos motivos, se recomienda colocar el mayor tamaño posible, pues permite mayor potencia a la salida, pero ajustando la impedancia de carga para el MEP, en caso de que no exista efecto de sobre acoplo. En caso de que éste exista o la potencia suministrada sea insuficiente para el objetivo, se aconseja ajustarlo al MPP.

## **5** Conclusiones y líneas futuras

El objetivo inicial de este proyecto es demostrar la existencia de una tecnología capaz de alimentar un circuito sin necesidad de cables, ni un medio que conecte físicamente la fuente de alimentación con el circuito de carga. Para ello, se tenía la idea de emplear antenas pequeñas, que no ocupasen un gran espacio (inferiores a 5cm de diámetro). De ser posible, esta tecnología permitiría alimentar un circuito sin necesidad de cableado, evitando los riesgos por ruptura que éste conlleva y que, en ocasiones, resulta hasta imposible de implementar. Tal circuito podría utilizarse en aplicaciones tales como los Dispositivos Sanitarios Implantables Activos (Active Implantable Medical Device, AIMD).

Para ello, este proyecto comienza realizando un análisis de los resultados obtenidos en previas investigaciones, realizadas por diferentes autores. Una referencia a todos los artículos empleados se puede encontrar en la bibliografía de este documento. Gracias a este estudio, se obtiene un profundo entendimiento de diferentes formas de transferencia inalámbrica de potencia (*Wireless Power Transfer*, WPT), centrándose en el sistema de inducción inalámbrica y las diferentes formas de lograr su optimización.

Una vez realizada la investigación inicial, se procede a demostrar la teoría mediante la realización de un prototipo compuesto por dos circuitos (transmisor y receptor) separados sin ningún tipo de conexión física. En este circuito la energía se transmite como una onda electromagnética a la frecuencia de 13.56 MHz, específicamente escogida por ser una frecuencia de la banda ISM. Esta banda está compuesta por diferentes frecuencias, las cuales se pueden usar libremente en el campo industrial, científico (como es este caso) o médico. Esta frecuencia, además, permite atravesar un medio acuoso, como el cuerpo humano, con la menor atenuación posible, siendo por ello la frecuencia ideal para los dispositivos AIMD.

Con el objetivo de optimizar el dispositivo, se realizaron mediciones con diferentes configuraciones de las antenas, variando tanto su geometría como el tamaño de éstas. Además, en la investigación realizada se descubrió que el sistema WPT de enlace inductivo se puede optimizar para dos puntos diferentes: el punto de mayor Eficiencia (MEP) y el punto de mayor transferencia de potencia al circuito receptor (MPP), variando únicamente el circuito de carga.

Durante la caracterización experimental, los resultados obtenidos se han ido comparando continuamente con los resultados recibidos por el CAD PSPICE. A pesar de que inicialmente ambos resultados parecían ser diferentes, se logró conseguir la similitud entre ambos tras añadir las sondas al CAD, lo que demostró que nuestro dispositivo estaba construido correctamente.

Debido a que las sondas de medida afectaban a los resultados, se decidió reducir la bobina para así poder aumentar la capacidad del condensador. De esta manera, se consiguió reducir los efectos que sesgaban las medidas, manteniendo la frecuencia de resonancia, gracias a un condensador que superaba al condensador de la sonda en capacidad. Sin embargo, a pesar de que el nuevo sistema tenía una menor resistencia parásita, el factor de calidad se vio disminuido y el ancho de banda aumentado, ya que también se había reducido el tamaño de la bobina receptora. Una bobina más pequeña también significó una reducción en la potencia suministrada al circuito receptor.

Gracias a este proyecto, ahora se tiene una mayor comprensión del funcionamiento de los sistemas de enlace inductivo, así como una prueba física de que es posible alimentar un circuito eléctrico, sin necesidad de un medio que los conecte. Además, las diferentes configuraciones probadas y las correspondientes medidas han demostrado que, dependiendo del tipo de aplicación deseada, necesitaremos utilizar diferentes tamaños y formas de bobina optimizadas para el caso de uso en concreto.

El desarrollo de este estudio ha permitido, no solo obtener un profundo conocimiento del funcionamiento del WPT por enlace inductivo, sino también abre la posibilidad a analizar la posibilidad de alimentar un dispositivo de baja potencia, con la fuente y el circuito separado como un medio acuoso. Esto permitiría eliminar las baterías, hechas de materiales que podrían dañar al paciente por sus componentes tóxicos que se encuentran en el interior del cuerpo humano en la infinidad de AIMD existentes y utilizados hoy en día.

Este estudio, además, se ha empleado para la capacidad resonante un condensador de dieléctrico Y5V, el cual varía hasta un 60% sobre su valor nominal según la temperatura. Esto permite abrir una línea de investigación para diseñar y fabricar dispositivos que puedan medir la temperatura sin necesidad de los habituales termorresistores, que producen pérdidas y disipación por calor. Otro aspecto susceptible de ser investigado, gracias a este componente, serían las seguridad comunicaciones como medida de para evitar el posible sobrecalentamiento del dispositivo; de forma que, si este se caliente en exceso, la transmisión varíe en la banda de frecuencia y este cambio sea detectado por un lector externo.

En resumen, durante este proyecto se han presentado las bases para la realización de un dispositivo que permite la transmisión de potencia entre dos circuitos que pueden estar separados por un medio acuoso, como es el cuerpo humano, sin contacto físico entre ellos, ya que la energía eléctrica se transmite mediante ondas electromagnéticas que atraviesan sin apenas atenuación la piel humana. Además, este estudio permite la optimización del circuito para que el dispositivo pueda recoger la mayor cantidad posible de energía del circuito transmisor y con una eficiencia de transferencia de potencia maximizada.

## 6 Bibliografía

- [1] P. Pérez-Nicoli, F. Silveira y M. Ghovanloo, Inductive Links for Wireless Power Transfer, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2021.
- [2] S. Bush, Smart Grid: Communication-Enabled Intelligence for the Electric Power Grid, Wiley, 2014.
- [3] T. Sun, X. Xie y Z. Wang, Wireless Power Transfer for Medical Microsystems, Springer Science + Business Media, 2013.
- [4] G. Rincón-Mora, Analog IC Design with Low-Dropout Regulators (LDOs), The McGraw-Hill Companies, Inc., 2009.
- [5] T. K. Sakar, R. J. Mailloux, A. A. Oliner, M. Salazar-Palma y D. L. Sengupta, History of Wireless, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [6] G. B. Hmida, H. Ghariani y M. Samet, "Design of wireless power and data transmission circuits for implantable biomicrosystem," *Biotechnology*, vol. 6, n° 2, pp. 153-164, 2007.
- [7] D. M. Dobkin, The RF in RFID. Passive UHF RFID in Practice., Newnes, 2008.
- [8] Y. Zhang y Z. Zhao, «Frequency splitting analysis of two-coil resonant wireless power transfer,» *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 400-402, 2014.
- [9] L. Jianyu, T. Houjun y G. Xin, «Frequency splitting analysis of wireless power transfer system based on T-type transformer model,» *Elektronika Elektrotechnika*, vol. 19, n° 10, pp. 109-113, 2013.
- [10] M. Van Valkenburg, Network Analysis, Prentice-Hall, 1964.
- [11] Kyocera AVX, Y5V Dielectric Datasheet and Catalog.
- [12] R. Serway y J. Jewett, Physics For Global Scientists and Engineers, National Geographic Learning, 2019.
- [13] C. Pérez Vega y J. Zamanillo Sáinz de la Maza, Laboratorio de Radiocomunicación y Televisión - Diseño de bobinas, Universidad de Cantabria, Dpto. de Ingeniería de Telecomunicaciones, 2000.
- [14] I. T. U. -. R. S. (ITU-R), «Report ITU-R SM.2303-2,» ITU, Ginebra, 2017.
- [15] E. C. C. (. w. t. E. C. o. P. a. T. A. (CEPT), «ERC Report 25 The European Table of Frequency Allocations and Applications in the Frequency Range 8.3 kHz to 3000 GHz (ECA Table),» 2021.
- [16] M. d. A. E. y. T. D. d. G. d. España, «Orden ETD/1449/2021, de 16 de diciembre, por la que se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (BOE-A-2021-21346),» 2021.

- [17] Y. Ben Fadhel, S. Ktata, K. Sedraoui, S. Rahmani y K. Al-Haddad, «A Modified Wireless Power Transfer System for Medical Implants,» *Energies*, vol. 12, n° 10, p. 1890, 2019.
- [18] F. Terman, Radio Engineer's Handbook, McGraw-Hill Book Company Inc., 1943.
- [19] G. Giovannetti, «Comparison between circular and square loops for lowfrequency magnetic resonance applications: Theoretical performance estimation,» *Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering*, vol. 46B, n° 3, pp. 146-155, 2016.
- [20] NanoVNA, «NanoVNA Official Website,» [En línea]. Available: https://nanovna.com/.
- [21] Tektronix, «ABCs of Probes Primer,» Tektronix, 2016.
- [22] R. &. Schawrz, «Understanding passive oscilloscope probes,» Rohde & Schwarz, 2021.
- [23] L. Heinzle, «Measuring the Mutual Interaction between Coaxial Cylindrical Coils with the Bode 100,» Omicorn Lab., 2013.
- [24] M. Peckham, A. Knibbs y S. Paxton, "Histology Guide," Faculty of Biological Sciences, University of Leeds, 2003. [En línea]. Available: https://www.histology.leeds.ac.uk/index.php.
- [25] L. Heinzle, «Measuring the Mutual Interaction between Coaxial Cylindrical coils,» 2013.
- [26] S. Hekal, A. Allam, A. Abdel-Rahman y R. Pokharel, Compact Size Wireless Power Transfer Using Defected Ground Structures, Springer, 2019.

## 7 Apéndices

### 7.1 Código "EFICIENCIA\_VS\_REALZMN\_RL\_01".

```
2
% PROGRAMA "EFICIENCIA VS REALZMN RL 01.m"
                                     *****
8{
% Programa de estudio de la influencia de la impedancia de entrada del
% circuito receptor (ZMN) sobre la eficiencia del enlace, la eficiencia de
% la bobina transmisora y la eficiencia de la bobina receptora, para un
% sistema de Transmisión Inalámbrica de Potencia (WPT).
% Adicionalmente, el programa estudia las topologías de circuito receptor
% resonante serie y paralelo, y cuantifica el impacto de la resistencia de
% carga sobre la impedancia de entrada (ZMN) y las eficiencias de la bobina
% transmisora, la bobina receptora y del enlace.
% Para este análisis se han supuesto condiciones de resonancia tanto para
% el circuito transmisor como para el circuito receptor.
   -> Topología del sistema:
8
      * Circuito TX: resonancia serie.
8
       * Circuito RX:
8
8
          -> resonancia serie.
          -> resonancia paralelo.
2
2
% El sistema WPDT está basado en una configuración de dos bobinas acopladas
% mediante enlace inductivo.
                                _____
2 -
% Relación de parámetros de interés:
06
2
8
    -> w0: frecuencia angular de resonancia del sistema WPDT (rad/s).
2
90
    -> QLX: factor de calidad de la bobina transmisora (-).
8
       * QLX = (w*L TX)/R TX
8
          + L TX: autoinductancia de la bobina transmisora (H).
8
          + R_TX: resistencia parásita de la bobina transmisora (H).
8
    -> QRX: factor de calidad de la bobina receptora (-).
8
8
       * QRX = (w^*L RX)/R RX
%
          + L RX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
2
          + R RX: resistencia parásita de la bobina receptora (H).
8
8
    -> QL: factor de calidad del circuito receptor (-).
       * QL = (w*L RX)/real{ZMN}
8
          + L RX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
8
           + ZMN: impedancia de entrada del circuito receptor.
8
    -> K TX RX: factor de acoplo entre las bobinas transmisora y receptora
8
8
      en el sistema de WPDT (-).
8
8
    -> EFF LINK: eficiencia del enlace WPDT (-).
%
8
    -> EFF LTX: eficiencia de la bobina transmisora (-).
2
    -> EFF LRX: eficiencia de la bobina receptora (-).
    _____
                        _____
2 ___
% Referencias bibliográficas
                           _____
  _____
```

```
% Las ecuaciones y modelos utilizados en este programa se han obtenido de
% las referencias siguientes:
% [1] P. Perez-Nicoli, "Inductive Links for Wireless Power Transfer:
   Fundamental Concepts for Designing High-efficiency Wireless Power
2
8
   Transfer Links", Springer Nature Switzerland AG, 2021.
2
% [2] G.B. Hmida, "Design of Wireless Power Data Transfer Circuits for
Ŷ
   Implantable Bio-Micro System", Biotechnology, vol. 6, num. 2,
8
   pp. 153-164, February 2007.
8
응}
2
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Universidad de Cantabria 2021.
                      °
§ _____
% INICIALIZACIÓN DEL PROGRAMA.
<u>%</u>
clc;
clear all;
close all;
_____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL INICIO DEL PROGRAMA.
<u>%</u> _____
disp('=========:==:=====:=;');
disp('Ejecutando "EFICIENCIA VS REALZMN RL 01.m"');
disp('------');
% _____
% DEFINICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES.
§ _____
% Frecuencia de resonancia del enlace inductivo (Hz).
f0=13.56E6;
% Frecuencia angular de resonancia del enlace inductivo (rad/s).
w0=2*pi*f0;
% Resistencia de pérdidas de la bobina transmisora (Ohm).
R TX=5;
% Resistencia de pérdidas de la bobina receptora (Ohm).
R RX=5;
% Factor de calidad de la bobina transmisora (-).
Q TX=200;
% Factor de calidad de la bobina receptora (-).
Q RX=200;
% Amplitud de fuente de señal de tensión (V).
VS=1:
% Factor de acoplo entre las bobinas del sistema (-).
K TX RX=0.01;
% _____
% CÁLCULO DE VALORES DE INDUCTANCIAS DEL TRANSMISOR Y DEL RECEPTOR.
۶ _____
```

```
% Autoinductancia de la bobina transmisora (H).
% \rightarrow QTX = (w*LTX)/RTX
L TX=Q TX*R TX/w0;
% Autoinductancia de la bobina receptora (H).
% \rightarrow QRX = (w*LRX)/RRX
L_RX=Q_RX*R_RX/w0;
% Inductancia mutua debida al acoplo entre las bobinas (H).
2
 -> K TX RX = M TX RX/sqrt(LTX*LRX)
M_TX_RX=K_TX_RX*sqrt(L_TX*L_RX);
ç
% DEFINICIÓN DE VALORES REALES DE IMPEDANCIA DE ENTRADA DEL CIRCUITO RX.
§ _____
% Parte real de la impedancia de entrada del circuito RX (Ohm).
8
 -> ZMN= real{ZMN} + j*imag{ZMN}.
realZMN INI=0.5;
realZMN END=100;
realZMN PTOS=200;
realZMN=linspace(realZMN INI,realZMN END,realZMN PTOS);
°, _____
% CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE TRANMISIÓN DE POTENCIA DEL SISTEMA.
۶. _____
% Configuración del sistema.
  -> Circuito TX resonante serie.
  -> Circuito RX resonante serie.
8
 -> Condiciones de resonancia para ambos circuitos.
8
  -> EFF LINK = EFF TX*EFF RX
8
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
8{
   -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + j*w0*L RX + ZMN)
8
8
  -> Condición de resonancia:
     \rightarrow j*w0*L_RX = -j*imag{ZMN}
8
8
      \rightarrow ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + real{ZMN})
응}
%
ZREF=((w0*M TX RX)^2)./(R RX+realZMN);
∞
% Eficiencia de la bobina receptora (-).
8{
  -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
00
8
  -> P_ZMN = (1/2) *real{V_MN*I_MN'}
%
         = (1/2) *real{(I RX*ZMN)*I RX'}
          = (1/2)*(I_RX^2)*real{ZMN}
2
8
%
  -> P RRX = (1/2) *real{V RRX*I RRX'}
8
          = (1/2) *real{(I_RX*R_RX) *I_RX'}
          = (1/2) * (I RX^2) * R RX
8
8
  -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
          = real{ZMN}/(R RX+real{ZMN})
8
8}
8 -
                       _____
EFF RX=realZMN./(R RX+realZMN);
% _____
                                ------
% Eficiencia de la bobina transmisora (-).
응 {
```

```
APÉNDICES
```

```
8
   -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
8
8
   -> P ZREF = (1/2) *real{V ZREF*I ZREF'}
8
          = (1/2) *real{(I_TX*ZREF) *I TX'}
%
          = (1/2) * (I TX^{2}) * real {ZREF}
8
%
  -> P_RTX = (1/2) *real{V_RTX*I_RTX'}
= (1/2) *real{(I_TX*R_TX) *I_TX'}
8
Ŷ
          = (1/2)*(I_TX^2)*R_TX
8
8
  \rightarrow EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
8
00
          = real{ZREF}/(R RX+real{ZREF})
8
응}
% _
    _____
EFF TX=real(ZREF)./(R TX+real(ZREF));
ofc _____
% Eficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
8 {
2
   -> EFF_LINK = EFF_TX*EFF_RX
8}
06
EFF_LINK=EFF_TX.*EFF_RX;
<u>%</u> _____
% CIRCUITO RECEPTOR RESONANTE SERIE.
      _____
                           _____
% Resistencias de carga evaluadas (Ohm).
RL SERIE INI=0.5;
RL SERIE END=100;
RL SERIE PTOS=500;
RL SERIE=linspace(RL SERIE INI, RL SERIE END, RL SERIE PTOS);
% Condición de resonancia del circuito resonante serie.
응 {
8
8
   -> j*w0*L_RX = j*1/(w0*C_RX).
8
  -> C RX = 1/((w0^2)*C RX).
2
8}
C RX SERIE=1/((w0^2)*L RX);
% Parte real de la impedancia de entrada del circuito RX (Ohm).
8{
8
  \rightarrow ZMN = real{ZMN} + j*imag{ZMN}.
8
8
  -> ZMN = RL - j*1/(w0*C RX).
8
8}
realZMN SERIE=RL SERIE;
op
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
8{
00
   -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + j*w0*L RX + ZMN)
   -> Condición de resonancia:
90
     \rightarrow j*w0*L RX = -j*imag{ZMN}
8
      \rightarrow ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + real{ZMN})
8
8}
%
ZREF_SERIE=((w0*M_TX_RX)^2)./(R_RX+realZMN_SERIE);
% Eficiencia de la bobina receptora (-).
```

```
APÉNDICES
```

```
8{
8
   -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
8
   -> P ZMN = (1/2) *real{V MN*I MN'}
%
          = (1/2) *real{ (I RX*ZMN) *I RX'}
          = (1/2) * (I RX^2) * real {ZMN}
8
%
   -> P_RRX = (1/2) *real{V_RRX*I_RRX'}
8
Ŷ
           = (1/2) *real{(I_RX*R_RX) *I_RX'}
           = (1/2)*(I_RX^2)*R_RX
8
8
  -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
8
          = real{ZMN}/(R RX+real{ZMN})
8}
2 -
EFF RX SERIE=realZMN SERIE./(R RX+realZMN SERIE);
op
% Eficiencia de la bobina transmisora (-).
8{
8
   -> EFF_TX = P_ZREF/(P_ZREF + P_TX)
8
90
   -> P_ZREF = (1/2) *real{V_ZREF*I_ZREF'}
8
           = (1/2)*real{(I_TX*ZREF)*I_TX'}
8
           = (1/2)*(I TX^2)*real{ZREF}
8
8
   -> P RTX = (1/2) *real{V RTX*I RTX'}
%
8
          = (1/2) *real{(I_TX*R_TX)*I_TX'}
8
          = (1/2) * (I_TX^2) * R_TX
8
  -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
8
          = real{ZREF}/(R RX+real{ZREF})
8
8
8}
8
EFF_TX_SERIE=real(ZREF_SERIE)./(R_TX+real(ZREF_SERIE));
۶ _____
% Eficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
응 {
8
   -> EFF_LINK = EFF_TX*EFF_RX
8}
%
EFF_LINK_SERIE=EFF_TX_SERIE.*EFF_RX_SERIE;
8 ------
% CIRCUITO RECEPTOR RESONANTE PARALELO.
% _____
% Resistencias de carga evaluadas (Ohm).
RL PARALELO INI=0.5;
RL PARALELO END=1E6;
RL PARALELO PTOS=500;
RL PARALELO=linspace(RL PARALELO INI, RL PARALELO END, RL PARALELO PTOS);
% Condición de resonancia del circuito resonante paralelo.
8{
8
   -> Condición: (w0*C RX*RL)^2 >> 1.
8
      -> j*w0*L_RX = j*1/(w0*C_RX).
8
      -> C_RX = 1/((w0^2)*C RX).
8
8
81
C RX PARALELO=1/((w0^2)*L RX);
% Parte real de la impedancia de entrada del circuito RX (Ohm).
```

```
8{
2
   -> Condición: (w0*C RX*RL)^2 >> 1.
8
8
     \rightarrow ZMN = real{ZMN} + j*imag{ZMN}.
     -> ZMN = 1/(RL*(w0*C RX)^2) - j*1/(w0*C RX).
00
8
응}
realZMN PARALELO=1./(RL PARALELO*((w0*C RX PARALELO)^2));
۶<u>۲</u>
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
8{
%
   -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + j*w0*L RX + ZMN)
  -> Condición de resonancia:
2
      \rightarrow j*w0*L_RX = -j*imag{ZMN}
8
      -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + real{ZMN})
2
8}
% _____
                      _____
                                              _____
ZREF PARALELO=((w0*M TX RX)^2)./(R RX+realZMN PARALELO);
%
% Eficiencia de la bobina receptora (-).
8{
   -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
%
%
   -> P_ZMN = (1/2) *real{V_MN*I_MN'}
         = (1/2) *real{(I RX*ZMN)*I RX'}
%
          = (1/2) * (I RX^2) * real {ZMN}
8
2
8
   -> P_RRX = (1/2) *real{V_RRX*I_RRX'}
8
          = (1/2) *real{(I RX*R RX)*I RX'}
          = (1/2) * (I RX^2) * R RX
8
8
8
  -> EFF_RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
          = real{ZMN}/(R RX+real{ZMN})
8
8}
۶<u>۲</u>
EFF_RX_PARALELO=realZMN_PARALELO./(R_RX+realZMN_PARALELO);
% Eficiencia de la bobina transmisora (-).
8{
2
8
   -> EFF_TX = P_ZREF/(P_ZREF + P_TX)
8
   -> P_ZREF = (1/2) *real{V_ZREF*I_ZREF'}
2
           = (1/2)*real{(I_TX*ZREF)*I_TX'}
= (1/2)*(I_TX^2)*real{ZREF}
8
8
÷
   \rightarrow P RTX = (1/2) *real{V RTX*I RTX'}
Ŷ
8
          = (1/2) *real{(I TX*R TX)*I TX'}
          = (1/2) * (I_TX^2) * R_T\overline{X}
8
8
  -> EFF_TX = P_ZREF/(P_ZREF + P_TX)
8
          = real{ZREF}/(R RX+real{ZREF})
8
8
8}
8.
         _____
                              _____
EFF TX PARALELO=real(ZREF PARALELO)./(R TX+real(ZREF PARALELO));
%
% Eficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
8{
8
   -> EFF LINK = EFF TX*EFF RX
응 }
% _____
                           _____
EFF_LINK_PARALELO=EFF_TX_PARALELO.*EFF_RX_PARALELO;
```

```
% _____
% PRESENTACIÓN DE DATOS POR PANTALLA.
<u>%</u>
% Impresión de resultados del programa por pantalla.
disp('');
disp('-----');
disp('PARÁMETROS INICIALES DEL PROGRAMA');
disp('-----');
disp(' ');
fprintf('-> Topología de circuito transmisor. \n');
fprintf('\t -> Circuito resonante serie. \n');
disp(' ');
fprintf('-> Topología de circuito receptor. \n');
fprintf('\t -> Circuito resonante serie. \n');
disp(' ');
fprintf('-> Condición de resonancia en el circuito transmisor. \n');
fprintf(' \ -> j*w0*LTX = -1/(j*w0*CTX) \ n');
disp(' ');
fprintf('-> Condición de resonancia en el circuito receptor. \n');
fprintf('\t -> j*w0*LRX = -j*imag{ZMN} \n');
disp(' ');
fprintf('-> Relación de frecuencias de operación evaluadas. \n');
fprintf(' \to f0 = %g MHz \ n', f0*1E-6);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de acoplo evaluados. \n');
fprintf('\t -> K_TX_RX = %g \n',K_TX_RX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad evaluados. \n');
fprintf(' \to QTX = %g n', QTX);
fprintf(' \ -> QRX = %g \ n', QRX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de pérdidas asociadas a las bobinas. \n');
fprintf('\t -> RTX = %g Ohm \n', R_TX);
fprintf('\t -> RRX = %g Ohm \n', R RX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de autoinductancias de las bobinas. \n');
fprintf('t \rightarrow LTX = %g uH n', L TX*1E6);
fprintf(' \to LRX = %g uH n', L RX*1E6);
disp(' ');
fprintf('-> Relación impedancias del circuito RX evaluadas. \n');
fprintf('\t -> real{ZMN} = [%g, %g] Ohm \n', realZMN(1), realZMN(end));
disp(' ');
disp(' ');
disp('-----');
disp('CIRCUITO RECEPTOR RESONANTE SERIE');
                                   -----');
disp('-----
disp(' ');
fprintf('-> Relación resistencias de carga. \n');
fprintf('\t -> RL = [%g, %g] Ohm \n', RL SERIE(1), RL SERIE(end));
disp(' ');
fprintf('-> Condición de resonancia del circuito. \n');
fprintf(' \ -> j*w0*LRX = j*1/(w0*CRX) \ n');
fprintf('t \rightarrow LRX = %g uH n', L RX*1E6);
fprintf('\t -> CRX = %g pF \n', C RX SERIE*1E12);
disp(' ');
fprintf('-> Relación impedancias de entrada del circuito RX. \n');
fprintf(' \ -> real{ZMN} = [\&g, \&g] Ohm \ n',...
   realZMN_SERIE(1), realZMN_SERIE(end));
disp(' ');
disp(' ');
disp('----
                                      -----');
disp('CIRCUITO RECEPTOR RESONANTE PARALELO');
disp('-----');
disp('');
fprintf('-> Relación resistencias de carga. \n');
fprintf(' \ t \ -> \ RL = \ [\g, \g] \ Ohm \ \n', RL PARALELO(1), RL PARALELO(end));
```

```
disp(' ');
fprintf('-> Condición de resonancia del circuito. \n');
fprintf('\t -> Condición: (w0*C_RX*RL)^2 >> 1. \n');
fprintf('\t -> j*w0*LRX = j*1/(w0*CRX) \n');
fprintf('\t -> LRX = %g uH \n',L RX*1E6);
fprintf('\t -> CRX = %g pF \n', C_RX_PARALELO*1E12);
disp(' ');
fprintf('-> Relación impedancias de entrada del circuito RX. \n');
fprintf(' \to real{ZMN} = [\&g, \&g] Ohm \n',...
  realZMN_PARALELO(1), realZMN_PARALELO(end));
disp(' ');
disp(' ');
ç
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL FINAL DEL PROGRAMA.
% _____
disp('------');
disp('"EFICIENCIA VS REALZMN RL 01.m" terminado');
disp('==================================;');
% _____
§_____
% REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS.
* _____
ç
%
% DEFINICIÓN DE FORMATO DE IMÁGENES.
e _____
                                _____
% Tamaño de la imagen (cm).
% FIG DX=7.20;
% FIG_DY=4.5;
% FIG_DX=14;
% FIG DY=6;
FIG DX=15;
FIG_DY=7;
% Nombre de la imagen.
IMG01='EFICIENCIA_VS_REALZMN_RL_01_01';
IMG02='EFICIENCIA VS REALZMN RL 01 02';
IMG03='EFICIENCIA VS REALZMN RL 01 03';
% Formato de la imagen.
% 01) FORMATO==0 <--> '.emf'
% 02) FORMATO==1 <--> '.png'
% 03) FORMATO==2 <--> '.pdf'
FORMATO=0;
% Tamaño de marcadores en los ejes de la figura.
AXIS FONT=0.07*FIG DY;
% Tamaño de título en la figura.
TITLE FONT=0.08*FIG DY;
% Tamaño de etiquetas en la figura.
LABEL FONT=0.075*FIG DY;
% Tamaño de leyendas en la figura.
% LEYENDA FONT=10.5;
LEYENDA FONT=12;
% Tamaño de texto incluido en la figura.
TEXTO_FONT=0.06*FIG_DY;
```

<u>\_\_\_\_\_</u>

% GRÁFICA 01: EFICIENCIAS DEL SISTEMA. -> EFICIENCIA DEL ENLACE. 8 -> EFICIENCIA DE LA BOBINA TRANSMISORA. % 8 -> EFICIENCIA DE LA BOBINA RECEPTORA. 2 -> FRENTE A IMPEDANCIA DE ENTRADA DE CIRCUITO RECEPTOR. % \_\_\_ \_\_\_\_\_ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG01; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=3; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA(1,:)=realZMN; X DATA(2,:)=realZMN; X\_DATA(3,:)=realZMN; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y DATA(1,:)=EFF TX\*100; Y\_DATA(2,:)=EFF\_RX\*100; Y\_DATA(3,:)=EFF\_LINK\*100; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 2D. X SCALE='linear'; Y\_SCALE='linear'; % Relación de colores de líneas a representar. COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'}; LIN\_COLOR=cell(1,GRAF NUM); if GRAF NUM<=length(COLOR LIST) LIN COLOR=COLOR LIST (1: GRAF NUM); else for i=1:GRAF NUM LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)]; end end % Tipos de líneas a utilizar en la representación. LIN LIST={ '-', '--', ':', '-.' }; if GRAF NUM<=length(LIN LIST) LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM); else LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM); LIN TYPE (1:end) = { '-' }; end % Grosor de líneas a utilizar en la representación. LIN WIDE=1.5; % Número de puntos o marcadores a incluir en la figura. POINT NUM=0; % Coordenadas del eje de abscisas de los marcadores a representar. POINT X=[]; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. POINT Y=[]; % Tipo de símbolos para la representación de marcadores. POINT TYPE=[]; % Color de símbolos para la representación de marcadores. POINT COLOR=[];

\_\_\_\_\_

```
% Tamaño de símbolos para la representación de marcadores.
POINT SIZE=[];
% Textos asociados a los marcadores representados.
POINT TEXT=[];
% Tamaño de fuente de extos asociados a los marcadores representados.
POINT FONT=TEXTO FONT;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    sprintf('$$R_{T_{X}}~=~R_{R_{X}}~=~$$%g~$$\\Omega$$',R_TX),...
    sprintf('$$Q_{T_{X}}~=~Q_{R_{X}}~=~$$%g',Q_TX)};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=2;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA_DATA(1) = { '$$\eta_{L_{T_{X}}}$; ;
LEYENDA_DATA(2) = { '$$\eta_{L_{R_{X}}}$; ;
LEYENDA DATA(3) = { \$ \eta {link} }; };
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencias del sistema vs.~',...
    'impedancia real del $$R {X}$$');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL_DATA='Impedancia real del $$R_{X}$$, $$real\left \{ Z_{MN} \right \}$$
($$\Omega$$)';
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Eficiencia, $\eta$ (\%)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
% -> Función "FCN GRAFICAS 2D 2021":
[SALIDA] = FCN_GRAFICAS_2D_2021(X_DATA, Y_DATA, GRAF_NUM, ...
    X SCALE, Y SCALE, ...
    FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
    LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
    POINT NUM, POINT X, POINT Y, ...
    POINT_TYPE, POINT_COLOR, POINT_SIZE, POINT_TEXT, POINT_FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
    LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
    TITLE DATA, TITLE FONT, ...
    XLIM DATA, YLIM DATA, ...
    XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, LABEL FONT, ...
    FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
```

#### 8

% GRÁFICA 02: EFICIENCIAS DEL SISTEMA. -> CIRCUITO RECEPTOR RESONANTE SERIE. 2 -> EFICIENCIA DEL ENLACE. 8 8 -> EFICIENCIA DE LA BOBINA TRANSMISORA. -> EFICIENCIA DE LA BOBINA RECEPTORA. 8 8 -> FRENTE A RESISTENCIA DE CARGA. \_\_\_\_\_ 8 ---% Nombre de la figura. FIG NAME=IMG02; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=3; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA(1,:)=RL SERIE; X DATA(2,:)=RL SERIE; X DATA(3,:)=RL SERIE; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y DATA(1,:)=EFF TX SERIE\*100; Y DATA(2,:)=EFF RX SERIE\*100; Y\_DATA(3,:)=EFF\_LINK\_SERIE\*100; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 2D. X SCALE='linear'; Y SCALE='linear'; % Relación de colores de líneas a representar. COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'}; LIN COLOR=cell(1, GRAF NUM); if GRAF NUM<=length(COLOR LIST) LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM); else for i=1:GRAF NUM LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)]; end end % Tipos de líneas a utilizar en la representación. LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'}; if GRAF NUM<=length(LIN LIST)</pre> LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM); else LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM); LIN TYPE  $(1:end) = \{ '-' \};$ end % Grosor de líneas a utilizar en la representación. LIN WIDE=1.5; % Número de puntos o marcadores a incluir en la figura. POINT NUM=0; % Coordenadas del eje de abscisas de los marcadores a representar. POINT X=[]; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. POINT Y=[]; % Tipo de símbolos para la representación de marcadores. POINT TYPE=[]; % Color de símbolos para la representación de marcadores. POINT COLOR=[];

```
% Tamaño de símbolos para la representación de marcadores.
POINT SIZE=[];
% Textos asociados a los marcadores representados.
POINT TEXT=[];
% Tamaño de fuente de textos asociados a los marcadores representados.
POINT FONT=TEXTO FONT;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    sprintf('Circuito $$R {X}$$ resonante serie'),...
    sprintf('$$R_{T_{X}}~=~R_{R_{X}}~=~$$%g~$$\\Omega$$',R_TX),...
    sprintf('$$Q_{T_{X}}~=~Q_{R_{X}}~=~$$%g',Q_TX)};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=3;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA_DATA(1) = { '$$\eta_{L_{T_{X}}}$; ;
LEYENDA_DATA(2) = { '$$\eta_{L_{R_{X}}}$; ;
LEYENDA DATA(3) = { \$ \eta {link} }; };
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencias del sistema vs.~',...
    'resistencia de carga');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Resistencia de carga, $$R {L}$$ ($$\Omega$$)';
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Eficiencia, $\eta$ (\%)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
   -> Función "FCN GRAFICAS 2D 2021":
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2D 2021(X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
    X_SCALE, Y_SCALE, ...
    FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
    LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
    POINT NUM, POINT X, POINT Y, ...
    POINT TYPE, POINT COLOR, POINT SIZE, POINT TEXT, POINT FONT, ...
    TEXTO_DATA, TEXTO_NUM, TEXTO_FONT, ...
    LEYENDA_DATA, LEYENDA_FONT, LEYENDA POS, ...
    TITLE DATA, TITLE FONT, ...
    XLIM DATA, YLIM DATA, ...
    XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ...
    FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
8 _____
                                          _____
% GRÁFICA 03: EFICIENCIAS DEL SISTEMA.
8
   -> CIRCUITO RECEPTOR RESONANTE PARALELO.
```

```
% -> EFICIENCIA DEL ENLACE.
```

-> EFICIENCIA DE LA BOBINA TRANSMISORA. 8 2 -> EFICIENCIA DE LA BOBINA RECEPTORA. 8 -> FRENTE A RESISTENCIA DE CARGA. § \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG03; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=3; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA(1,:)=RL PARALELO\*1E-6; X\_DATA(2,:)=RL\_PARALELO\*1E-6; X DATA(3,:)=RL PARALELO\*1E-6; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y\_DATA(1,:)=EFF\_TX\_PARALELO\*100; Y\_DATA(2,:)=EFF\_RX\_PARALELO\*100; Y\_DATA(3,:)=EFF\_LINK\_PARALELO\*100; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 2D. X SCALE='linear'; Y SCALE='linear'; % Relación de colores de líneas a representar. COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'}; LIN COLOR=cell(1, GRAF NUM); if GRAF\_NUM<=length(COLOR\_LIST)
 LIN\_COLOR=COLOR\_LIST(1:GRAF\_NUM);</pre> else for i=1:GRAF NUM LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)]; end end % Tipos de líneas a utilizar en la representación. LIN\_LIST={'-', '--', ':', '-.'}; if GRAF\_NUM<=length(LIN\_LIST) LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM); else LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM); LIN TYPE(1:end) = { '-' }; end % Grosor de líneas a utilizar en la representación. LIN WIDE=1.5; % Número de puntos o marcadores a incluir en la figura. POINT NUM=0; % Coordenadas del eje de abscisas de los marcadores a representar. POINT\_X=[]; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. POINT Y=[]; % Tipo de símbolos para la representación de marcadores. POINT TYPE=[]; % Color de símbolos para la representación de marcadores. POINT COLOR=[]; % Tamaño de símbolos para la representación de marcadores. POINT SIZE=[];

```
% Textos asociados a los marcadores representados.
POINT TEXT=[];
% Tamaño de fuente de textos asociados a los marcadores representados.
POINT FONT=TEXTO_FONT;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    sprintf('Circuito $$R {X}$$ resonante paralelo'),...
    sprintf('$$R_{T_{X}}~=~R_{R_{X}}~=~$$%g~$$\\Omega$$',R_TX),...
sprintf('$$Q_{T_{X}}~=~Q_{R_{X}}~=~$$%g',Q_TX)};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=3;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA_DATA(1) = { '\$ \eta_{L_{T_{X}}} };
LEYENDA DATA(2) = { '$$\eta {L {R {X}}}};
LEYENDA DATA(3) = { '$$\eta {link}$$'};
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA_POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencias del sistema vs.~',...
    'resistencia de carga');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Resistencia de carga, $$R_{L}$$ (M$$\Omega$$)';
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Eficiencia, $\eta$ (\%)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
    -> Función "FCN GRAFICAS 2D 2021":
[SALIDA] = FCN_GRAFICAS_2D_2021(X_DATA, Y_DATA, GRAF_NUM, ...
    X SCALE, Y SCALE, ...
    FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
    LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
    POINT_NUM, POINT_X, POINT_Y, ...
    POINT TYPE, POINT COLOR, POINT SIZE, POINT TEXT, POINT FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, .
    LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
    TITLE DATA, TITLE FONT, ...
    XLIM_DATA, YLIM_DATA, ...
    XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, LABEL FONT, ...
    FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
```

### 7.2 Código "EFICIENCIA\_VS\_K\_Q\_01".

```
****
% PROGRAMA "EFICIENCIA VS K Q 01.m"
                                  *****
8{
% Programa de estudio de la influencia de los factores de calidad de las
% bobinas transmisora y receptora, junto con el factor de acoplo entre
% ellas, sobre la eficiencia del enlace por acoplo inductivo.
% Las ecuaciones utilizadas para los cálculos de las eficiencias del
% enlace, del transmisor y del receptor, son válidas para cualquier
% configuración de los circuitos del transmisor (serie, paralelo) y del
% receptor (serie, paralelo).
<u>&</u>
% Relación de parámetros de interés:
% -----
2
8
    -> w: frecuencia angular de resonancia del sistema WPDT (rad/s).
2
   -> QLX: factor de calidad de la bobina transmisora (-).
2
8
      * QLX = (w*LTX)/RLTX
8
         + LTX: autoinductancia de la bobina transmisora (H).
2
         + RLTX: resistencia parásita de la bobina transmisora (H).
8
    -> QRX: factor de calidad de la bobina receptora (-).
8
8
      * QRX = (w*LRX)/RLRX
         + LRX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
8
         + RLRX: resistencia parásita de la bobina receptora (H).
8
    -> QL: factor de calidad del circuito receptor (-).
8
8
      * QL = (w*LRX) /real{ZMN}
8
         + LRX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
          + ZMN: impedancia de circuito de adaptación de impedancias
8
8
               del receptor.
8
      * Configuración serie: QL = (w*LRX)/RL
      * Configuración paralelo: QL = RL/(w*LRX)
2
2
   -> K TX RX: factor de acoplo entre las bobinas transmisora y receptora
8
8
      en el sistema de WPDT (-).
÷
8
    -> EFF LINK: eficiencia del enlace WPDT (-).
2
ofc
% Referencias bibliográficas
§ _____
% Las ecuaciones y modelos utilizados en este programa se han obtenido de
% las referencias seguientes:
% [1] P. Perez-Nicoli, "Inductive Links for Wireless Power Transfer:
2
    Fundamental Concepts for Designing High-efficiency Wireless Power
%
    Transfer Links", Springer Nature Switzerland AG, 2021.
2
% [2] G.B. Hmida, "Design of Wireless Power Data Transfer Circuits for
    Implantable Bio-Micro System", Biotechnology, vol. 6, num. 2,
8
8
    pp. 153-164, February 2007.
00
8}
2
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Universidad de Cantabria 2021.
2
```

```
* _____
% INICIALIZACIÓN DEL PROGRAMA.
clc;
clear all;
close all;
8 _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL INICIO DEL PROGRAMA.
* _____
disp('------');
disp('Ejecutando "EFICIENCIA VS K Q 01.m"');
disp('------');
% _____
% DEFINICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES.
  _____
% Factor de calidad del circuito receptor (-).
QL=50;
% Factores de calidad de las bobinas transmisora y receptora (-).
Q_INI=0;
Q_END=1000;
Q PUNTOS=1000;
QTX=Q_INI: (Q_END-Q_INI) /Q_PUNTOS:Q_END;
QRX=QTX;
% Relación de factores de acoplo a considerar en el análisis (-).
K TX RX=[0.005, 0.01, 0.5];
% _____
% CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA DEL SISTEMA.
% _____
% Factor de calidad combinado de la bobina receptora y el circuito receptor
% del sistema WPDT (-).
 -> Q RX L = QL || QRX
Q RX L=QL.*QRX./(QL+QRX);
% Matriz de valores de factores de acoplo (-).
K MATRIX=K TX RX'*ones(1,length(QRX));
% Ajustar dimensiones de matrices de factores de calidad del transmisor y
% el receptor para faciliar la operación matricial.
Q_TX_MATRIX=ones(length(K_TX_RX),1)*QTX;
Q_RX_MATRIX=ones(length(K_TX_RX),1)*QRX;
Q RX L MATRIX=ones(length(K TX RX),1)*Q RX L;
% Eficiencia de la subcircuito transmisor (-).
  -> EFF_TX = (K_TX_RX^2)*QTX*Q_RX_L/((K_TX_RX^2)*QTX*Q_RX_L+1)
EFF TX=(K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX./...
  ((K_MATRIX.^2).*Q_TX_MATRIX.*Q_RX_L_MATRIX+1);
% Eficiencia de la subcircuito receptor (-).
 -> EFF TX = Q RX L./QL
2
EFF RX=Q RX L MATRIX./QL;
% Eficiencia de transimisión de potencia del sistema WPDT (-).
 -> EFF LINK = EFF TX*EFF RX
EFF LINK=EFF TX.*EFF RX;
% PRESENTACIÓN DE DATOS POR PANTALLA.
8 _____
disp(' ');
```

```
-----');
disp('-----
disp('PARÁMETROS INICIALES DEL PROGRAMA');
disp('-----
                             -----');
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de acoplo evaluados. \n');
for i=1:length(K TX RX)
  fprintf('\t (%g) K_TX_RX = %g \langle n', i, K_TX_RX(i) \rangle;
end
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad del TX y RX evaluados. \n');
fprintf('\t -> min(QTX) = min(QRX) = %g \n',QTX(1));
fprintf(' \ \rightarrow max(QTX) = max(QRX) = %g \ n',QTX(end));
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad de la carga evaluados. \n');
fprintf('t \rightarrow QL = %g \n', QL);
disp(' ');
disp(' ');
8 _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL FINAL DEL PROGRAMA.
8 _____
disp('-----');
disp('"EFICIENCIA_VS_K_Q_01.m" terminado');
disp('-----');
ç
ç
% REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS.
% _____
%
% DEFINICIÓN DE FORMATO DE IMÁGENES.
<u>&</u>
% Tamaño de la imagen (cm).
% FIG DX=7.20;
% FIG_DY=4.5;
% FIG_DX=14;
% FIG DY=6;
FIG DX=15;
FIG_DY=7;
% Nombre de la imagen.
IMG01='EFICIENCIA_VS_K_Q_01_01';
IMG02='EFICIENCIA_VS_K_Q_01_02';
IMG03='EFICIENCIA_VS_K_Q_01_03';
% Formato de la imagen.
% 01) FORMATO==0 <--> '.emf'
 02) FORMATO==1 <--> '.png'
8
% 03) FORMATO==2 <--> '.pdf'
FORMATO=0;
% Tamaño de marcadores en los ejes de la figura.
AXIS FONT=0.07*FIG DY;
% Tamaño de título en la figura.
TITLE FONT=0.08*FIG DY;
% Tamaño de etiquetas en la figura.
LABEL FONT=0.075*FIG DY;
% Tamaño de leyendas en la figura.
% LEYENDA FONT=10.5;
LEYENDA_FONT=15;
```

```
% Tamaño de texto incluido en la figura.
TEXTO FONT=0.06*FIG DY;
% _____
% GRÁFICA 01: EFICIENCIA DEL ENLACE.
  -> FRENTE AL FACTOR DE ACOPLO.
2
   -> FRENTE A LOS FACTORES DE CALIDAD DE LAS BOBINAS TX Y RX.
۶۶ _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG01;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=length(K TX RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=Q TX MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=EFF LINK*100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X_SCALE='linear';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR_LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
   LIN_COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
    LIN TYPE (1:end) = \{ '-' \};
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    sprintf('\$Q_{L} \sim \
    sprintf(strcat('$$\\eta _{link}~=~P_{MN}/P_{T_{X}}~',...
'=~\\eta _{L_{T_{X}}} \\cdot \\eta _{L_{R_{X}}$$'))};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=2;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:))));
LEYENDA TEXTO=strcat('\$ {T {X}-R {X}}\$-~', LEYENDA TEXTO);
LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA_POS='Best';
```
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del enlace vs. ',... % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Factores de calidad, \$\$Q {T {X}}\$\$~=~\$\$Q {R {X}}\$;; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Eficiencia del enlace, \$\eta {link}\$ (\%)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG\_SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 01": [SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM\_DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); % \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 02: EFICIENCIA DEL TRANSMISOR. -> FRENTE AL FACTOR DE ACOPLO. 2 -> FRENTE A LOS FACTORES DE CALIDAD DE LAS BOBINAS TX Y RX. % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG02; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=length(K TX RX); % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X\_DATA=Q\_TX\_MATRIX; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y DATA=EFF TX\*100; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 2D. X SCALE='linear'; Y SCALE='linear'; % Relación de colores de líneas a representar. COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'}; LIN\_COLOR=cell(1,length(K\_TX\_RX)); if GRAF NUM<=length(COLOR\_LIST) LIN\_COLOR=COLOR\_LIST(1:GRAF\_NUM); else

```
for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN_LIST={ '-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN LIST)
    LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
    LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    sprintf('$$Q_{L}~=~$$$g',QL),...
sprintf(strcat('$$\\eta _{L_{T_{X}}}~=~\\frac{k_{T_{X}-R_{X}}^{2}',...
'\\cdot Q_{T_{X}} \\cdot Q_{R_{X}-L}',...
    \{k_{T_{X}-R_{X}}^{2} \setminus dot Q_{T_{X}} \setminus dot Q_{R_{X}-L} + 1}
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=2;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:))));
LEYENDA TEXTO=strcat('\$k_{T_{X}}, R_{X}} =~', LEYENDA TEXTO);
LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del transmisor vs. ',...
     par\''ametros $$Q_{T_{X}}$$~=~$$Q_{R_{X}}$$ y $$k_{T_{X}-R_{X}}$;);
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Factores de calidad, $$Q {T {X}}$$~=~$$Q {R {X}}$$;
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Eficiencia del transmisor, $\eta {L {T {X}}}$ (\%)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
    -> Función "FCN GRAFICAS 01":
[SALIDA] = FCN GRAFICAS_2021(X_DATA, Y_DATA, GRAF_NUM, ...
    X SCALE, Y SCALE, ...
    FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
    LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
    LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
    TITLE DATA, TITLE FONT, ...
    XLIM DATA, YLIM_DATA, ...
    XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, LABEL_FONT, ...
```

FIG\_DIB,FIG\_SAVE,FORMATO);

```
%
% GRÁFICA 03: EFICIENCIA DEL RECEPTOR.
8
  -> FRENTE AL FACTOR DE ACOPLO.
2
  -> FRENTE A LOS FACTORES DE CALIDAD DE LAS BOBINAS TX Y RX.
°
                   _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG03;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=length(K TX RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=Q TX MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=EFF RX*100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF_NUM<=length(COLOR_LIST)
    LIN_COLOR=COLOR_LIST(1:GRAF_NUM);</pre>
else
    for i=1:length(K TX RX)
   LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
   end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN_LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)
   LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM);
   LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
   sprintf('$$Q_{L}~=~$$%g',QL),...
    sprintf('$$\\eta _{L_{R_{X}}}~=~\\frac{Q_{R_{X}}}{Q_{R_{X}}}+Q_{L}}$$');
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=2;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA_TEXTO=strtrim(char(num2str(K_TX_RX(:))));
LEYENDA TEXTO=strcat('\$ {T {X}-R {X}}$
LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
```

% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del receptor vs. ',... ' par\''ametros \$\$Q\_{T\_{X}}\$\$~=~\$\$Q\_{R\_{X}}\$\$ y \$\$k\_{T\_{X}-R\_{X}}\$;;; % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL\_DATA='Factores de calidad, \$\$Q\_{T\_{X}}\$\$~=~\$\$Q\_{R\_{X}}\$;; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL\_DATA='Eficiencia del receptor, \$\eta\_{L\_{R\_{X}}}\$ (\%)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 01": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2021(X\_DATA, Y\_DATA, GRAF\_NUM, ... X\_SCALE, Y\_SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM\_DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG\_DIB,FIG\_SAVE,FORMATO);

## 7.3 Código "PMN\_VS\_K\_Q\_01".

```
******
% PROGRAMA "PMN VS K Q 01.m"
*****
8{
% Programa de estudio de la influencia de los factores de calidad de las
% bobinas transmisora y receptora, junto con el factor de acoplo entre
% ellas, sobre la potencia transmitida al circuito receptor, a través del
% enlace por acoplo inductivo.
% Las ecuaciones utilizadas analizan distintas configuraciones de circuitos
% transmisores, atendiendo a la configuración de la fuente de señal y la
% capacidad de resonancia.
8
   -> Configuración 01:
8
      + Fuente de tensión.
8
       + Capacidad de resonancia en serie.
8
8
   -> Configuración 02:
       + Fuente de tensión.
8
2
       + Capacidad de resonancia en paralelo.
8
8
   -> Configuración 03:
2
      + Fuente de intensidad.
8
       + Capacidad de resonancia en serie.
8
  -> Configuración 04:
8
      + Fuente de intensidad.
8
8
       + Capacidad de resonancia en serie.
8
8 ---
    _____
% Relación de parámetros de interés:
     _____
8 ---
2
8
    -> w: frecuencia angular de resonancia del sistema WPDT (rad/s).
2
8
    -> QLX: factor de calidad de la bobina transmisora (-).
8
       * QLX = (w*LTX)/RLTX
8
           + LTX: autoinductancia de la bobina transmisora (H).
8
           + RLTX: resistencia parásita de la bobina transmisora (H).
8
00
    -> QRX: factor de calidad de la bobina receptora (-).
8
       * QRX = (w*LRX)/RLRX
8
           + LRX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
           + RLRX: resistencia parásita de la bobina receptora (H).
8
    -> QL: factor de calidad del circuito receptor (-).
8
       * QL = (w*LRX) /real{ZMN}
8
          + LRX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
2
          + ZMN: impedancia de circuito de adaptación de impedancias
8
                 del receptor.
8
       * Configuración serie: QL = (w*LRX)/RL
2
       * Configuración paralelo: QL = RL/(w*LRX)
8
8
    -> K TX RX: factor de acoplo entre las bobinas transmisora y receptora
8
      en el sistema de WPDT (-).
8
    -> EFF LINK: eficiencia del enlace WPDT (-).
8
8
8
    -> P TX: potencia entregada a la bobina transmisora (W).
8
8
    -> P MN: potencia entregada al circuito receptor (W).
2 -
% Referencias bibliográficas
                             _____
2 ---
```

```
% Las ecuaciones y modelos utilizados en este programa se han obtenido de
% las referencias seguientes:
% [1] P. Perez-Nicoli, "Inductive Links for Wireless Power Transfer:
    Fundamental Concepts for Designing High-efficiency Wireless Power
2
8
   Transfer Links", Springer Nature Switzerland AG, 2021.
2
\% [2] G.B. Hmida, "Design of Wireless Power Data Transfer Circuits for
8
   Implantable Bio-Micro System", Biotechnology, vol. 6, num. 2,
    pp. 153-164, February 2007.
8
8
8}
2
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Universidad de Cantabria 2021.
                      *********
°
& _____
% INICIALIZACIÓN DEL PROGRAMA.
<u>%</u>
clc;
clear all;
close all;
۶ _____
                                 _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL INICIO DEL PROGRAMA.
§ _____
disp('------');
disp('Ejecutando "PMN VS K Q 01.m"');
disp('========');
х _____
% DEFINICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES.
§ _____
% Frecuencia de resonancia del enlace inductivo (Hz).
f0=13.56E6;
% Frecuencia angular de resonancia del enlace inductivo (rad/s).
w0=2*pi*f0;
% Resistencia de pérdidas de la bobina transmisora (Ohm).
R TX=5;
% Amplitud de fuente de señal de tensión (V).
VS=1;
% Amplitud de fuente de señal de intensidad (A).
IS=1;
% Factor de calidad del circuito receptor (-).
QL=50:
% Factores de calidad de las bobinas transmisora y receptora (-).
Q INI=0;
Q END=1000;
Q_PUNTOS=1000;
QTX=Q INI: (Q END-Q INI)/Q PUNTOS:Q END;
ORX=OTX;
% Relación de factores de acoplo a considerar en el análisis (-).
K_TX_RX=[0.005, 0.01, 0.5];
```

```
۶. _____
% CÁLCULO DE LA AUTOINDUCTANCIA DE LAS BOBINAS.
<u>%</u>
% Cálculo de las autoinductancias de las bobinas transmisora y receptora
% del sistema de acoplo inductivo (H).
% Autoinductancia de la bobina transmisora (H).
  -> QLTX = w*LTX/RTX
2
  -> LTX = QLTX*RTX/w
L_TX=QTX*R_TX/w0;
% Autoinductancia de la bobina receptora (H).
% -> Suponiendo bobinas transmisora y receptora idénticas.
L RX=L TX;
% Ajustar dimensiones de matrices de autoinductancias de bobinas del
% transmisor y el receptor para faciliar la operación matricial.
L_TX_MATRIX=ones(length(K_TX_RX),1)*L_TX;
L RX MATRIX=ones(length(K TX RX),1)*L RX;
% _____
% CÁLCULO DE RESISTENCIAS DE PÉRDIDAS DE LAS BOBINAS.
§ _____
% Cálculo de las resistencias de pérdidas de la receptora del sistema de
% acoplo inductivo y de la parte resistiva de la impedancia de entrada
% del circuito receptor (Ohm).
% Resistencia de pérdidas de la bobina receptora (Ohm).
  -> QLRX = w*LRX/RRX
  -> RRX = w*LRX/QLRX
8
R RX=w0*L RX./QRX;
% Parte resisitiva de impedancia de entrada de circuito receptor (Ohm).
% -> QL = w^LRA/LCCL
% -> real(ZMN) = w*LRX/QL
________.
REAL_ZMN=w0*L RX./QL;
§ _____
% CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA DEL SISTEMA.
§ _____
% Factor de calidad combinado de la bobina receptora y el circuito receptor
% del sistema WPDT (-).
  -> Q RX_L = QL || QRX
2
Q RX L=QL. *QRX./(QL+QRX);
% Matriz de valores de factores de acoplo (-).
K MATRIX=K TX RX'*ones(1,length(QRX));
% Ajustar dimensiones de matrices de factores de calidad del transmisor y
% el receptor para faciliar la operación matricial.
Q TX MATRIX=ones(length(K TX RX),1)*QTX;
Q RX MATRIX=ones(length(K TX RX),1)*QRX;
Q_RX_L_MATRIX=ones(length(K_TX_RX),1)*Q_RX_L;
% Eficiencia de la subcircuito transmisor (-).
   -> EFF TX = (K TX RX^2)*QTX*Q RX L/((K TX RX^2)*QTX*Q RX L+1)
2
   -> La eficiencia del enlace es independiente de la configuración del
2
2
     circuito transmisor.
EFF TX=(K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX./...
   ((K_MATRIX.^2).*Q_TX_MATRIX.*Q_RX_L_MATRIX+1);
% Eficiencia de la subcircuito receptor (-).
% -> EFF TX = Q RX L./QL
EFF_RX=Q_RX_L_MATRIX./QL;
```

```
% Eficiencia de transimisión de potencia del sistema WPDT (-).
% -> EFF LINK = EFF TX*EFF RX
EFF LINK=EFF TX.*EFF RX;
%
% CÁLCULO DE LA POTENCIA ENTREGADA AL CIRCUITO RECEPTOR.
% _____
% Cálculo de la potencia entregada a la bobina transmisora para cada una de
% las configuraciones de circuito transmisor (W).
% Configuración 01.
% -> Fuente de tensión.
2
  -> Capacidad de resonancia en serie.
P TX 01=0.5*(VS^2)./...
   (R TX.*((K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX+1));
P MN 01=EFF LINK.*P_TX_01;
% Configuración 02.
   -> Fuente de tensión.
   -> Capacidad de resonancia en paralelo.
2
P TX 02=0.5*((VS^2)./((w0*L TX MATRIX).^2)).*R_TX.*...
   ((K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX+1);
P MN 02 = EFF_LINK.*P_TX_02;
% Configuración 03.
  -> Fuente de intensidad.
2
  -> Capacidad de resonancia en serie.
2
P TX 03=0.5*(IS^2)*R TX*((K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX+1);
P_MN_03=EFF_LINK.*P_TX_03;
% Configuración 04.
% -> Fuente de intensidad.
2
  -> Capacidad de resonancia en paralelo.
P_TX_04=0.5*(VS^2)*((w0*L TX MATRIX).^2).*(1/R TX).*...
   (1./((K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX+1));
P MN 04=EFF LINK.*P TX 04;
<u>%</u> _____
% PRESENTACIÓN DE DATOS POR PANTALLA.
disp(' ');
disp('-----
         -----');
disp('PARÁMETROS INICIALES DEL PROGRAMA');
disp('-----');
disp(' ');
fprintf('-> Parámetros iniciales del sistema. \n');
fprintf(' t \rightarrow f0 = %g MHz n', f0*1E-6);
fprintf(' \ -> RTX = % g Ohm \ , R TX);
disp(sprintf('\t -> LTX = LRX'));
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de acoplo evaluados. \n');
for i=1:length(K_TX_RX)
   fprintf('\t (%g) K_TX_RX = %g \n', i, K_TX_RX(i));
end
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad del TX y RX evaluados. \n');
fprintf('\t -> min(QTX) = min(QRX) = %g \n',QTX(1));
fprintf('\t -> max(QTX) = max(QRX) = %g \n',QTX(end));
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad de la carga evaluados. \n');
fprintf('t \rightarrow QL = %g \n', QL);
disp(' ');
disp(' ');
```

8 \_\_\_\_\_

```
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL FINAL DEL PROGRAMA.
ç
disp('-------');
disp('"PMN_VS_K_Q_01.m" terminado');
disp('==================================;);
§ _____
ok
% REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS.
8 _____
§ ______
۶_____
% DEFINICIÓN DE FORMATO DE IMÁGENES.
                        _____
    % Tamaño de la imagen (cm).
% FIG DX=7.20;
% FIG DY=4.5;
% FIG DX=14;
% FIG DY=6;
FIG DX=15;
FIG_DY=7;
% Nombre de la imagen.
IMG01='PMN_VS_K_Q_01_01';
IMG02='PMN VS K Q 01 02';
IMG03='PMN_VS_K_Q_01_03';
IMG04='PMN_VS_K_Q_01_04';
IMG05='PMN_VS_K_Q_01_05';
IMG06='PMN_VS_K_Q_01_06';
IMG07='PMN_VS_K_0_01_07';
IMG08='PMN VS K Q 01 08';
% Formato de la imagen.
 01) FORMATO==0 <--> '.emf'
2
% 02) FORMATO==1 <--> '.png'
% 03) FORMATO==2 <--> '.pdf'
FORMATO=0;
% Tamaño de marcadores en los ejes de la figura.
AXIS_FONT=0.07*FIG_DY;
% Tamaño de título en la figura.
TITLE FONT=0.08*FIG DY;
% Tamaño de etiquetas en la figura.
LABEL FONT=0.075*FIG DY;
% Tamaño de leyendas en la figura.
% LEYENDA FONT=10.5;
LEYENDA FONT=15;
% Tamaño de texto incluido en la figura.
TEXTO FONT=0.06*FIG DY;
o.
% GRÁFICA 01: POTENCIA TRANSMITIDA AL CIRCUITO RECEPTOR.
 -> CONFIGURACIÓN 01.
  -> FUENTE DE TENSIÓN.
8
  -> CAPACIDAD DE RESONANCIA EN SERIE.
8 ____
     _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG01;
```

% Número de gráficas a incluir en la figura.

```
GRAF NUM=length(K_TX_RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=Q TX MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y_DATA=[];
Y_DATA=P_MN_01*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF_NUM<=length(COLOR_LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1: GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
   LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN_TYPE=LIN_LIST(1:GRAF_NUM);
else
   LIN_TYPE=cell(1,GRAF NUM);
   LIN TYPE (1:end) = \{ '-' \};
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$T_{X}$$ resonante serie',...
    sprintf('$$Q_{L}~=~$$%g',QL),...
sprintf('$$V_{S}~=~$$%g~V',VS),...
    '$$P_{MN}~=~\eta _{link} \cdot P_{T_{X}}$$'};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=4;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:))));
LEYENDA_TEXTO=strcat('$ {T_{X}-R_{X}} $--~', LEYENDA_TEXTO);
LEYENDA_DATA=cellstr(LEYENDA_TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA_POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada al RX vs. ',...
     'y $$k {T {X}-R {X}}$$;;
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
```

```
XLABEL DATA='Factores de calidad, $$Q {T {X}}$$~=~$$Q {R {X}}$$;
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Potencia entregada al RX, $P {MN}$ (mW)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
% -> Función "FCN GRAFICAS 01":
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021(X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
    X SCALE, Y SCALE, ...
   FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
   LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
    LEYENDA DATA, LEYENDA_FONT, LEYENDA_POS, ...
    TITLE DATA, TITLE FONT, ...
   XLIM DATA, YLIM DATA, ...
   XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ...
    FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
& _____
% GRÁFICA 02: POTENCIA TRANSMITIDA AL CIRCUITO RECEPTOR.
8
  -> CONFIGURACIÓN 02.
   -> FUENTE DE TENSIÓN.
2
   -> CAPACIDAD DE RESONANCIA EN PARALELO.
§ _____
                                                       _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG02;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF_NUM=length(K_TX_RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X_DATA=Q_TX_MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=P MN 02*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN LIST)
   LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
```

LIN TYPE (1:end) = { '-' }; end % Grosor de líneas a utilizar en la representación. LIN WIDE=1.5; % Texto a añadir a la figura. TEXTO\_DATA={ ... 'Circuito \$\$T {X}\$\$ resonante paralelo',... sprintf('\$\$Q\_{L}~=~\$\$%g',QL),...
sprintf('\$\$V\_{S}~=~\$\$%g~V',VS),... % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=4; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:)))); LEYENDA\_TEXTO=strcat('\$ {T\_{X}-R\_{X}} \$ ~=~', LEYENDA\_TEXTO); LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)'; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE\_DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada al RX vs. ',... \_\_par\''ametros \$\$Q {T {X}}\$\$~=~\$\$Q {R {X}}\$\$ y \$\$k {T {X}-R {X}}\$\$'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Factores de calidad,  $\$Q {T {X}}$ % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Potencia entregada al RX, \$P {MN}\$ (mW)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 01": 2 [SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN\_COLOR, LIN\_TYPE, LIN\_WIDE, AXIS\_FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL\_DATA, YLABEL\_DATA, LABEL\_FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); 06 \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 03: POTENCIA TRANSMITIDA AL CIRCUITO RECEPTOR. -> CONFIGURACIÓN 03. -> FUENTE DE INTENSIDAD. 8

```
% -> CAPACIDAD DE RESONANCIA EN SERIE.
```

```
% -----
```

% Nombre de la figura.

FIG NAME=IMG03;

```
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=length(K TX RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X_DATA=Q_TX_MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=P MN 03*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR_LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1: GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K_TX_RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)</pre>
   LIN TYPE=LIN LIST (1:GRAF NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1,GRAF_NUM);
   LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$T {X}$$ resonante serie',...
    sprintf('\$Q_{L} \sim = \$ 
    sprintf('$$I_{S}~=~$$%g~A',IS),..
    '$$P_{MN}~=~\eta _{link} \cdot P_{T_{X}}$;'};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=4;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:))));
LEYENDA TEXTO=strcat('\$ {T {X}-R {X}}\$, LEYENDA TEXTO);
LEYENDA_DATA=cellstr(LEYENDA_TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE_DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada al RX vs. ',...
    'par\''ametros $$Q_{T_{X}}$$~=~$$Q_{R_{X}}$$ y $$k_{T_{X}-R_{X}}$$');
```

```
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Factores de calidad, \$Q {T {X}} 
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Potencia entregada al RX, $P {MN}$ (mW)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
   -> Función "FCN GRAFICAS_01":
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
   X SCALE, Y SCALE, ...
   FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
   LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
   TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
   LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
   TITLE DATA, TITLE FONT, ...
   XLIM DATA, YLIM DATA, ...
   XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, LABEL_FONT, ...
   FIG_DIB,FIG_SAVE,FORMATO);
<u>_____</u>
% GRÁFICA 04: POTENCIA TRANSMITIDA AL CIRCUITO RECEPTOR.
   -> CONFIGURACIÓN 04.
   -> FUENTE DE INTENSIDAD.
8
8
  -> CAPACIDAD DE RESONANCIA EN PARALELO.
8 -----
                                                 _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG04;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=length(K TX RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=Q TX MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=P MN 04*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y_SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN_COLOR=cell(1,length(K_TX_RX));
if GRAF_NUM<=length(COLOR_LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
   for i=1:length(K TX RX)
   LIN COLOR\{i\} = [rand(\overline{1}) rand(1) rand(1)];
   end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)
   LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
```

else LIN TYPE=cell(1,GRAF\_NUM); LIN TYPE  $(1:end) = \{ '-' \};$ end % Grosor de líneas a utilizar en la representación. LIN WIDE=1.5; % Texto a añadir a la figura. TEXTO DATA={... 'Circuito  $T {X} \ resonante paralelo',...$ sprintf('\$\$I\_{S}~=~\$\$%g~A',IS),.. '\$\$P\_{MN}~=~\eta \_{link} \cdot P\_{T\_{X}}\$;'}; % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=4; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:)))); LEYENDA TEXTO=strcat(' $\$k_{T_{X}}-R_{X}$ }  $\overline{x}$ , LEYENDA TEXTO); LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)'; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada al RX vs. ',... ' par\''ametros \$\$Q {T {X}}\$\$~=~\$\$Q {R {X}}\$\$ y \$\$k {T {X}-R {X}}\$\$'; % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Factores de calidad, \$\$Q {T {X}}\$\$~=~\$\$Q {R {X}}\$\$'; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Potencia entregada al RX, \$P {MN}\$ (mW)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG\_DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 2021": [SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ... X\_SCALE, Y\_SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE\_DATA, TITLE\_FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG\_DIB,FIG\_SAVE,FORMATO); % % GRÁFICA 05: POTENCIA ENTREGADA A LA BOBINA TX. 8 -> CONFIGURACIÓN 01. 8 -> FUENTE DE TENSIÓN. 8 -> CAPACIDAD DE RESONANCIA EN SERIE.

```
_____
8 _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG05;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=length(K TX RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X_DATA=Q_TX_MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y_DATA=P_TX_01*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y_SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF_NUM<=length(COLOR_LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K_TX_RX)
    LIN COLOR\{i\} = [rand(\overline{1}) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)
    LIN TYPE=LIN LIST (1:GRAF NUM);
else
    LIN_TYPE=cell(1,GRAF_NUM);
    LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$T {X}$$ resonante serie',...
    sprintf('$$Q_{L}~=~$$%g',QL),...
sprintf('$$V_{S}~=~$$%g~V',VS),...
    strcat('$$P_{T_{X}}~=~\frac{V_{S}^{2}/2}',...
'{R_{T_{X}} \cdot (k_{T_{X}-R_{X}}^{2} \cdot Q_{T_{X}}',...
    \cdot Q {R_{X}-L}+1) ;
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=4;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA_TEXTO=strtrim(char(num2str(K_TX_RX(:))));
LEYENDA TEXTO=strcat('\$ {T {X}-R {X}}\$, LEYENDA TEXTO);
LEYENDA_DATA=cellstr(LEYENDA_TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
```

```
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE_DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada a $$L_{T_{X}}$$ vs. ',...
     par\''ametros $$Q_{T_{X}}$$~=~$$Q_{R_{X}}$$ y $$k_{T {X}-R {X}}$;");
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Factores de calidad, $$Q {T {X}}$$~=~$$Q {R {X}}$;;
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Potencia entregada a $$L {T {X}}$$, $P {T {X}}$ (mW)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
% -> Función "FCN GRAFICAS 2021":
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
   X SCALE, Y SCALE, ...
   FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
   LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO_NUM, TEXTO_FONT, ...
    LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
    TITLE DATA, TITLE FONT, ...
   XLIM_DATA, YLIM_DATA, ...
   XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ...
   FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
% -----
% GRÁFICA 06: POTENCIA ENTREGADA A LA BOBINA TX.
% -> CONFIGURACIÓN 02.
2
   -> FUENTE DE TENSIÓN.
   -> CAPACIDAD DE RESONANCIA EN PARALELO.
2
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG06;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF_NUM=length(K_TX_RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=Q TX MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y_DATA=P_TX_02*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y_SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR\{i\}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
```

```
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
    LIN TYPE=LIN_LIST (1:GRAF_NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
    LIN TYPE (1:end) = \{ '-' \};
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$T_{X}$$ resonante paralelo',...
    sprintf('$$Q_{L}~=~$$%g',QL),...
    sprintf('$$V {S}~=~$$%g~V',VS),...
    strcat('$$P_{T_{X}}~=~\frac{V_{S}^{2}}{2 \cdot (wL_{T_{X}})^{2}}',...
'\cdot R_{T_{X}} \cdot (k_{T_{X}-R_{X}}^{2}',...
'\cdot Q_{T_{X}} \cdot Q_{R_{X}-L}+1) $$')};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=4;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA_TEXTO=strtrim(char(num2str(K_TX_RX(:))));
LEYENDA TEXTO=strcat('\$ {T {X}-R {X}} \$, LEYENDA TEXTO);
LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE_DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada a $$L_{T_{X}}$$ vs. ',...
      par\''ametros $$Q {T {X}}$$~=~$$Q {R {X}}$$ y $$k {T {X}-R {X}}$$');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Factores de calidad, $$Q {T {X}}$$~=~$$Q {R {X}}$$;
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Potencia entregada a $$L {T {X}}$$, $P {T {X}}$ (mW)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
   -> Función "FCN_GRAFICAS_2021":
2
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
    X SCALE, Y SCALE, ...
    FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
    LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
    LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
    TITLE DATA, TITLE FONT, ...
    XLIM DATA, YLIM DATA, ...
    XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ...
    FIG_DIB,FIG_SAVE,FORMATO);
```

8 \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 07: POTENCIA ENTREGADA A LA BOBINA TX. -> CONFIGURACIÓN 03. 8 8 -> FUENTE DE INTENSIDAD. 2 -> CAPACIDAD DE RESONANCIA EN SERIE. § \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG07; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF\_NUM=length(K\_TX\_RX); % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA=Q TX MATRIX; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y\_DATA=P\_TX\_03\*1E3; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 2D. X SCALE='linear'; Y SCALE='log'; % Relación de colores de líneas a representar. COLOR\_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'}; LIN\_COLOR=cell(1,length(K\_TX\_RX)); if GRAF\_NUM<=length(COLOR\_LIST)
 LIN\_COLOR=COLOR\_LIST(1:GRAF\_NUM);</pre> else for i=1:length(K TX RX) LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)]; end end % Tipos de líneas a utilizar en la representación. LIN\_LIST={'-', '--', ':', '-.'}; if GRAF\_NUM<=length(LIN\_LIST)</pre> LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM); else LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM); LIN TYPE (1:end) = { '-' }; end % Grosor de líneas a utilizar en la representación. LIN WIDE=1.5; % Texto a añadir a la figura. TEXTO DATA={... 'Circuito \$\$T {X}\$\$ resonante serie',... sprintf('\$\$Q\_{L}~=~\$\$%g',QL),... sprintf('\$\$I {S}~=~\$\$%g~A', IS),... strcat('\$\$P\_{T\_{X}}~=~\frac{I\_{S}^{2}}{2}',... '\cdot Q {T {X}} \cdot Q {R {X}-L}+1) \$\$')}; % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=4; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:)))); LEYENDA TEXTO=strcat('\$ {T {X}-R {X}}\$ ~=~', LEYENDA TEXTO); LEYENDA\_DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)'; % Posición de la leyenda en la figura.

LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE\_DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada a \$\$L\_{T\_{X}}\$\$ vs. ',... \_par\''ametros \$\$Q\_{T\_{X}}\$\$~=~\$\$Q\_{R\_{X}}\$\$\_y \$\$k\_{T\_{X}-R\_{X}}\$\$'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Factores de calidad,  $\$Q {T {X}}$ % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Potencia entregada a \$\$L {T {X}}\$\$, \$P\_{T\_{X}}\$ (mW)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN\_GRAFICAS\_2021": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2021(X\_DATA, Y\_DATA, GRAF\_NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG\_NAME,FIG\_DX,FIG\_DY,... LIN\_COLOR, LIN\_TYPE, LIN\_WIDE, AXIS\_FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 08: POTENCIA ENTREGADA A LA BOBINA TX. -> CONFIGURACIÓN 04. -> FUENTE DE INTENSIDAD. 2 -> CAPACIDAD DE RESONANCIA EN PARALELO. 2 8 \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG08; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=length(K TX RX); % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA=Q TX MATRIX; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y\_DATA=P\_TX\_04\*1E3; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 2D. X SCALE='linear'; Y\_SCALE='log'; % Relación de colores de líneas a representar. COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'}; LIN\_COLOR=cell(1,length(K\_TX\_RX)); if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)

```
LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN_TYPE=LIN_LIST(1:GRAF_NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM);
    LIN TYPE(1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$T {X}$$ resonante paralelo',...
    sprintf('$$Q_{L}~=~$$%g',QL),...
    sprintf('$$I_{S}~=~$$%g~A', IS),...
   '\cdot Q {R {X}-L}+1)}$$')};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=4;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:))));
LEYENDA TEXTO=strcat('\$ {T {X}-R {X}}$\sim=\sim', LEYENDA TEXTO);
LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada a $$L {T {X}}$$ vs. ',...
     _
par\''ametros $$Q_{T_{X}}$$~=~$$Q_{R_{X}}$$_y $$k_{T_{X}-R_{X}}$$');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Factores de calidad, $$Q {T {X}}$$~=~$$Q {R {X}}$;;
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Potencia entregada a $$L {T {X}}$$, $P {T {X}}$ (mW)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG_DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
% -> Función "FCN GRAFICAS 2021":
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
   X SCALE, Y SCALE, ...
   FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
    LIN_COLOR, LIN_TYPE, LIN_WIDE, AXIS_FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
```

LEYENDA\_DATA, LEYENDA\_FONT, LEYENDA\_POS, ... TITLE\_DATA, TITLE\_FONT, ... XLIM\_DATA, YLIM\_DATA, ... XLABEL\_DATA, YLABEL\_DATA, LABEL\_FONT, ... FIG\_DIB, FIG\_SAVE, FORMATO); 

## 7.4 Código "RESONANCIAS\_TX\_RX\_01".

```
% PROGRAMA "RESONANCIAS TX RX 01.m"
응 {
% Programa de estudio de la influencia de la resonancia en los subcircuitos
% transmisor (TX) y receptor (RX) de un sistema de Transmisión Inalámbrica
% de Potencia (WPT), sobre los parámetros:
  -> EFF LINK: eficiencia del enlace WPDT (-).
2
8
   -> PMN: potencia entregada al circuito receptor (W).
8
2
% El sistema WPDT está basado en una configuración de dos bobinas acopladas
% mediante enlace inductivo.
% -----
% Relación de parámetros de interés:
§ _____
                                -----
2
    -> w: frecuencia angular de resonancia del sistema WPDT (rad/s).
8
8
    -> QLX: factor de calidad de la bobina transmisora (-).
2
       * QLX = (w*LTX)/RLTX
8
          + LTX: autoinductancia de la bobina transmisora (H).
           + RLTX: resistencia parásita de la bobina transmisora (H).
8
8
    -> QRX: factor de calidad de la bobina receptora (-).
8
8
       * QRX = (w*LRX)/RLRX
8
           + LRX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
           + RLRX: resistencia parásita de la bobina receptora (H).
8
8
8
    -> QL: factor de calidad del circuito receptor (-).
       * QL = (w*LRX) /real{ZMN}
8
          + LRX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
           + ZMN: impedancia de circuito de adaptación de impedancias
8
2
                 del receptor.
8
       * Configuración serie: QL = (w*LRX)/RL
2
       * Configuración paralelo: QL = RL/(w*LRX)
8
8
    -> K TX RX: factor de acoplo entre las bobinas transmisora y receptora
8
       en el sistema de WPDT (-).
0
8
    -> EFF LINK: eficiencia del enlace WPDT (-).
8
    -> P TX: potencia entregada a la bobina transmisora (W).
8
8
    -> P MN: potencia entregada al circuito receptor (W).
2
2
% -
% Referencias bibliográficas
                             _____
% Las ecuaciones y modelos utilizados en este programa se han obtenido de
% las referencias seguientes:
% [1] P. Perez-Nicoli, "Inductive Links for Wireless Power Transfer:
8
     Fundamental Concepts for Designing High-efficiency Wireless Power
     Transfer Links", Springer Nature Switzerland AG, 2021.
Ŷ
2
% [2] G.B. Hmida, "Design of Wireless Power Data Transfer Circuits for
8
    Implantable Bio-Micro System", Biotechnology, vol. 6, num. 2,
     pp. 153-164, February 2007.
8
8
8}
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
```

```
% Universidad de Cantabria 2021.
                      ****
§ _____
% INICIALIZACIÓN DEL PROGRAMA.
§ _____
clc;
clear all;
close all;
ç
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL INICIO DEL PROGRAMA.
§ _____
disp('------');
disp('Ejecutando "RESONANCIAS TX RX 01.m"');
disp('=================================;;;;
% _____
% DEFINICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES.
§ _____
% Frecuencia de resonancia del enlace inductivo (Hz).
f0=13.56E6:
% Frecuencia angular de resonancia del enlace inductivo (rad/s).
w0=2*pi*f0;
% Resistencia de pérdidas de la bobina transmisora (Ohm).
R TX=5;
% Amplitud de fuente de señal de tensión (V).
VS=1;
% Factor de calidad del circuito receptor (-).
QL=50;
% Factores de calidad de las bobinas transmisora y receptora (-).
Q INI=0;
Q END=1000;
O PUNTOS=1000;
QTX=Q INI: (Q END-Q INI) /Q PUNTOS:Q END;
ORX=OTX:
% Relación de factores de acoplo a considerar en el análisis (-).
K TX RX=[0.005, 0.01, 0.5];
% Factor de calidad combinado de la bobina receptora y el circuito receptor
% del sistema WPDT (-).
  -> Q RX L = QL || QRX
Q RX L=QL.*QRX./(QL+QRX);
% _____
% FORMATO MATRICIAL DE DATOS PARA FACILITAR EL CÓMPUTO.
§_____
% Matriz de valores de factores de acoplo (-).
K MATRIX=K TX RX'*ones(1,length(QRX));
% Ajustar dimensiones de matrices de factores de calidad del transmisor y
% el receptor para faciliar la operación matricial.
Q TX MATRIX=ones(length(K TX RX),1)*QTX;
Q RX MATRIX=ones (length (K TX RX), 1) *QRX;
Q_RX_L_MATRIX=ones(length(K_TX_RX),1)*Q_RX_L;
```

```
۶. _____
% TOPOLOGÍA DE SISTEMA WPDT I.
<u>%</u>
% Configuración del sistema.
  -> Circuito TX: NO RESONANTE.
8
  -> Circuito RX: NO RESONANTE.
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
   -> ZREF = (w^2) * (M TX RX^2) / (RRX+jwLRX+RL)
   -> ZREF = (K TX RX<sup>-</sup>2) *QTX*QRX*RTX/(1+QRX*(j+1/QL))
2
ZREF 01=(K MATRIX.^2).*Q_TX_MATRIX.*Q_RX_MATRIX.*R_TX./...
   \overline{(1+Q RX} MATRIX* (1i+(\overline{1}./\overline{QL})));
% Eficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
   -> EFF LINK = EFF TX*EFF RX
2
   -> EFF TX = real(ZREF) / (RTX + real(ZREF))
00
   -> EFF RX = QRX/(QRX + QL)
EFF TX 01=real(ZREF 01)./(R TX+real(ZREF 01));
EFF
   RX_01=Q RX MATRIX./(Q RX MATRIX+QL);
EFF LINK 01=EFF TX 01.*EFF RX 01;
% Impedancia vista por la fuente de tensión de entrada (Ohm).
% -> ZS = RTX + j*w*LTX + ZREF
% -> ZS = RTX*(1 + j*QTX + ZREF/RTX)
ZS 01=R TX.*(1+1i.*Q TX MATRIX+(ZREF 01/R TX));
% Potencia suministrada a a bobina transmisora (W).
% -> PTX = (0.5*(VS^2)/(abs(ZS)^2))*real(ZS)
PTX_01=(0.5*(VS^2)./(abs(ZS_01).^2)).*real(ZS_01);
% Potencia acoplada al circuito receptor (W).
% → PMN = PTX*EFF LINK
PMN 01=PTX 01.*EFF LINK 01;
% _____
% TOPOLOGÍA DE SISTEMA WPDT II.
<u>%</u>
% Configuración del sistema.
   -> Circuito TX: NO RESONANTE.
-> Circuito RX: SÍ RESONANTE.
8
8
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
% -> ZREF = (w^2)*(M_TX_RX^2)/(RRX+RL)
% -> ZREF = (K TX_RX^2)*QTX*QRX L*RTX
ZREF 02=(K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX.*R TX;
% Eficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
% -> EFF LINK = EFF TX*EFF RX
8
   -> EFF_TX = (K_TX_RX^2) *QTX*QRX_L/((K_TX_RX^2) *QTX*QRX_L+1)
   -> EFF RX = QRX L/QL
EFF TX 02=(K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX./...
   ((K_MATRIX.^2).*Q_TX_MATRIX.*Q_RX_L_MATRIX+1);
EFF RX 02=Q RX L MATRIX./QL;
EFF_LINK_02=EFF_TX_02.*EFF_RX_02;
% Impedancia vista por la fuente de tensión de entrada (Ohm).
  -> ZS = RTX + j*w*LTX + ZREF
2
  -> ZS = RTX*(1 + j*QL + ZREF/RTX)
2
ZS 02=R TX.*(1+1i.*Q TX MATRIX+(ZREF 02/R TX));
% Potencia suministrada a a bobina transmisora (W).
  -> PTX = (0.5*(VS^2)/(abs(ZS)^2))*real(ZS)
PTX 02=(0.5*(VS^2)./(abs(ZS 02).^2)).*real(ZS 02);
% Potencia acoplada al circuito receptor (W).
```

```
% -> PMN = PTX*EFF_LINK
PMN 02=PTX 02.*EFF LINK 02;
```

```
%
% TOPOLOGÍA DE SISTEMA WPDT III.
% _____
% Configuración del sistema.
  -> Circuito TX: SÍ RESONANTE.
-> Circuito RX: SÍ RESONANTE.
8
00
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
  -> ZREF = (w^2) * (M_TX_RX^2) / (RRX+RL)
-> ZREF = (K_TX_RX^2) *QTX*QRX_L*RTX
00
2
ZREF 03=(K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX.*R TX;
% Eficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
   -> EFF_LINK = EFF_TX*EFF_RX
8
   -> EFF_TX = (K_TX_RX^2) *QTX*QRX_L/((K_TX_RX^2) *QTX*QRX_L+1)
-> EFF_RX = QRX_L/QL
2
EFF TX 03=(K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX./...
   ((K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX+1);
EFF_RX_03=Q_RX_L_MATRIX./QL;
EFF_LINK_03=EFF_TX_03.*EFF_RX_03;
% Impedancia vista por la fuente de tensión de entrada (Ohm).
% -> ZS = RTX + ZREF
% -> ZS = RTX + RREF
ZS 03=R TX+ZREF 03;
% Potencia suministrada a a bobina transmisora (W).
\% -> PTX = 0.5*(VS^2)/(RTX + RREF)
% -> PTX = 0.5*(VS^2)/(RTX*((K TX RX^2)*QTX*QRX L+1))
PTX 03=0.5*(VS^2)./(R TX*((K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX L MATRIX+1));
% Potencia acoplada al circuito receptor (W).
% −> PMN = PTX*EFF LINK
PMN 03=PTX 03.*EFF LINK 03;
§ _____
% TOPOLOGÍA DE SISTEMA WPDT IV.
& _____
% Configuración del sistema.
   -> Circuito TX: SÍ RESONANTE.
-> Circuito RX: NO RESONANTE.
8
8
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
% -> ZREF = (w^2) * (M TX RX^2) / (RRX+jwLRX+RL)
2
   -> ZREF = (K_TX_RX^2) *QTX*QRX*RTX/(1+QRX*(j+1/QL))
ZREF 04=(K MATRIX.^2).*Q TX MATRIX.*Q RX MATRIX.*R TX./...
   (1+Q RX MATRIX*(1i+(1./QL)));
% Eficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
   -> EFF_LINK = EFF_TX*EFF RX
2
   -> EFF_TX = real(ZREF)/(RTX + real(ZREF))
8
   -> EFF RX = QRX/(QRX + QL)
2
EFF TX 04=real(ZREF_04)./(R_TX+real(ZREF_04));
EFF RX 04=Q RX MATRIX./(Q RX MATRIX+QL);
EFF LINK 04=EFF TX 04.*EFF RX 04;
% Impedancia vista por la fuente de tensión de entrada (Ohm).
% -> ZS = RTX + ZREF
  -> ZS = RTX + RREF
ZS_04=R_TX+ZREF_04;
```

```
% Potencia suministrada a a bobina transmisora (W).
% -> PTX = (0.5*(VS^2)/(abs(ZS)^2))*real(ZS)
PTX 04=(0.5*(VS^2)./(abs(ZS 04).^2)).*real(ZS 04);
% Potencia acoplada al circuito receptor (W).
% −> PMN = PTX*EFF LINK
PMN 04=PTX 04.*EFF LINK 04;
§ _____
% PRESENTACIÓN DE DATOS POR PANTALLA.
۶ _____
% Indicación de valores de factor de calidad para los que se desea mostrar
% los resultados por pantalla.
Q TX 0=200;
% Impresión de resultados del programa por pantalla.
disp(' ');
disp('-----');
disp('PARÁMETROS INICIALES DEL PROGRAMA');
disp('-----
                                    .____!):
disp('');
fprintf('-> Relación de factores de acoplo evaluados. \n');
for i=1:length(K TX RX)
   fprintf('\t (%g) K_TX_RX = %g \n', i, K_TX_RX(i));
end
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad del TX y RX evaluados. \n');
fprintf(' \ -> min(QTX) = min(QRX) = %g \ n',QTX(1));
fprintf('\t -> max(QTX) = max(QRX) = %g \n',QTX(end));
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad de la carga evaluados. \n');
fprintf(' \ -> QL = %g \ n',QL);
disp(' ');
disp(' ');
disp('--
           -----') :
disp('RESUMEN DE PARÁMETROS DE SALIDA PROGRAMA');
disp('-----
                                           -----');
disp(' ');
disp('CONFIGURACIÓN 01:');
disp('-> Circuito TX: NO RESONANTE');
disp('-> Circuito RX: NO RESONANTE');
disp(' ');
disp('-> Datos iniciales:')
fprintf('t \rightarrow Q_TX = %g \n',Q_TX_0);
fprintf('t \rightarrow Q_{RX} = %g \n', Q_{TX}^{0};
fprintf(' \ -> QL = %g \ n',QL);
for i=1:length(K_TX_RX)
   disp(' ');
   fprintf('-> Evaluación para: K TX RX = %g \n',...
      K TX_RX(i));
   fprintf('\t -> Z RX_TX_REF = %g + j*(%g) mOhm\n',...
      real(interp1(QTX,ZREF 01(i,:),Q TX 0))*1E3,...
      imag(interp1(QTX,ZREF_01(i,:),Q_TX_0))*1E3);
   fprintf(' \ -> EFF TX = \$q \$\$ \ n',...
      interp1(QTX,EFF TX 01(i,:),Q TX 0)*100);
   fprintf('\t -> EFF_RX = %g %% \n',...
      interp1(QTX, EFF RX 01(i,:), Q TX 0)*100);
   fprintf('\t -> EFF LINK = %g %% \n'
      interp1(QTX, EFF_LINK_01(i,:), Q_TX_0)*100);
   fprintf(' t \rightarrow ZS = %g + j*(%g) mOhm n', ...
      real(interp1(QTX,ZS_01(i,:),Q_TX_0))*1E3,...
```

```
imag(interp1(QTX,ZS 01(i,:),Q TX 0))*1E3);
       fprintf('\t -> PTX = %g nW\n',..
              interp1(QTX,PTX_01(i,:),Q_TX_0)*1E9);
       fprintf('\t -> PMN = %g nW\n',...
              interp1(QTX,PMN 01(i,:),Q TX 0)*1E9);
end
disp(' ');
disp(' ');
disp('CONFIGURACIÓN 02:');
disp('-> Circuito TX: NO RESONANTE');
disp('-> Circuito RX: SÍ RESONANTE');
disp(' ');
disp('-> Datos iniciales:')
fprintf('t \rightarrow Q_TX = %g \n', Q_TX_0);
fprintf(' \to QRX = %g n', QTX_0);
fprintf(' \ -> Q_L = %g \ n',QL);
for i=1:length(K TX RX)
      disp(' ');
       fprintf('-> Evaluación para: K_TX_RX = %g \n',...
             K TX RX(i));
       fprintf('\t -> Z RX TX REF = %g + j*(%g) mOhm\n',...
              real(interp1(QTX,ZREF_02(i,:),Q_TX_0))*1E3,...
              imag(interp1(QTX,ZREF_02(i,:),Q_TX_0))*1E3);
       fprintf(' \ -> EFF TX = %g %% \ n',..
              interp1(QTX, EFF_TX_02(i,:),Q_TX_0)*100);
       fprintf(' \ -> EFF RX = %g %% \ n', ...
              interp1(QTX,EFF RX 02(i,:),Q TX 0)*100);
       fprintf('\t -> EFF_LINK = %g %% \n',..
              interp1(QTX,EFF_LINK_02(i,:),Q_TX_0)*100);
       fprintf(' \to ZS = %g + j*(%g) mOhm n',
              real(interp1(QTX,ZS 02(i,:),Q TX 0))*1E3,...
              imag(interp1(QTX,ZS_02(i,:),Q_TX_0))*1E3);
       fprintf('\t -> PTX = %g nW\n',..
              interp1(QTX,PTX_02(i,:),Q_TX_0)*1E9);
       fprintf('t \rightarrow PMN = %g nW \n',...
              interp1(QTX,PMN_02(i,:),Q_TX_0)*1E9);
end
disp(' ');
disp(' ');
disp('CONFIGURACIÓN 03:');
disp('-> Circuito TX: SÍ RESONANTE');
disp('-> Circuito RX: SÍ RESONANTE');
disp('****************
                                                              disp(' ');
disp('-> Datos iniciales:')
fprintf('t \rightarrow Q TX = %g (n', Q TX 0);
fprintf('t \rightarrow Q_{RX} = %g \ n', Q_{TX} = %g \ n
fprintf(' \ -> QL = %g \ n', QL);
for i=1:length(K_TX_RX)
       disp(' ');
       fprintf('-> Evaluación para: K_TX_RX = %g \n',...
             K TX RX(i));
       fprintf(' \to Z RX TX REF = \$g + j*(\$g) mOhm n',...
              real(interp1(QTX,ZREF_03(i,:),Q_TX_0))*1E3,...
              imag(interp1(QTX,ZREF_03(i,:),Q_TX_0))*1E3);
       fprintf(' \ -> EFF TX = %g %% \ n',..
              interp1(QTX,EFF_TX_03(i,:),Q_TX_0)*100);
       fprintf(' \ -> EFF RX = %g %% \ n', ...
              interp1(QTX,EFF RX 03(i,:),Q TX 0)*100);
       fprintf('\t -> EFF LINK = %g %% \n',...
             interp1(QTX,EFF_LINK_03(i,:),Q_TX_0)*100);
       fprintf(' \ -> ZS = \&g + j*(\&g) mOhm \ ),
              real(interp1(QTX,ZS 03(i,:),Q TX 0))*1E3,...
              imag(interp1(QTX,ZS_03(i,:),Q_TX_0))*1E3);
       fprintf('\t -> PTX = %g nW\n',...
```

```
interp1(QTX,PTX_03(i,:),Q_TX_0)*1E9);
   fprintf(' \ -> PMN = \&g nW \ ,
     interp1(QTX,PMN_03(i,:),Q_TX_0)*1E9);
end
disp(' ');
disp(' ');
disp('****
        disp('CONFIGURACIÓN 04:');
disp('-> Circuito TX: SÍ RESONANTE');
disp('-> Circuito RX: NO RESONANTE');
disp(' ');
disp('-> Datos iniciales:')
fprintf('\t -> Q_TX = %g \n',Q_TX_0);
fprintf('\t -> Q_RX = %g \n',Q_TX_0);
fprintf('\t -> Q_L = %g \n',QL);
for i=1:length(K TX RX)
  disp(' ');
  fprintf('-> Evaluación para: K TX RX = %g \n',...
     K TX RX(i));
   fprintf('\t -> Z RX TX REF = %g + j*(%g) mOhm\n',...
     real(interp1(QTX,ZREF 04(i,:),Q TX 0))*1E3,...
     imag(interp1(QTX,ZREF_04(i,:),Q_TX_0))*1E3);
   fprintf('t \rightarrow EFF_TX = %g %% \n',..
  interp1(QTX,EFF_TX_04(i,:),Q_TX_0)*100);
fprintf('\t -> EFF_RX = %g %% \n',...
     interp1(QTX,EFF_RX_04(i,:),Q_TX_0)*100);
   fprintf('\t -> EFF \overline{\text{LINK}} = %g %% \overline{\sqrt{n'}}...
     interp1(QTX,EFF_LINK_04(i,:),Q_TX_0)*100);
   fprintf(' \ -> ZS = \ g + j * (\ g) mOhm \ n', ...
     real(interp1(QTX,ZS 04(i,:),Q TX 0))*1E3,...
     imag(interp1(QTX,ZS_04(i,:),Q_TX_0))*1E3);
   fprintf(' \to PTX = \%g nW n', ...
     interp1(QTX,PTX_04(i,:),Q_TX_0)*1E9);
   fprintf('\t -> PMN = %g nW\n',..
     interp1(QTX,PMN 04(i,:),Q TX 0)*1E9);
end
disp(' ');
disp(' ');
§ _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL FINAL DEL PROGRAMA.
<u>%</u>
disp('------');
disp('"RESONANCIAS TX RX 01.m" terminado');
disp('------');
return;
     _____
$_____
% REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS.
% _____
ok
۶
۶
% DEFINICIÓN DE FORMATO DE IMÁGENES.
                         _____
§ _____
% Tamaño de la imagen (cm).
% FIG DX=7.20;
% FIG DY=4.5;
% FIG DX=14;
% FIG DY=6;
FIG DX=15;
FIG_DY=7;
```

% Nombre de la imagen.

```
IMG01='RESONANCIAS_TX_RX_01_01';
IMG02='RESONANCIAS_TX_RX_01_02';
IMG03='RESONANCIAS_TX_RX_01_03';
IMG04='RESONANCIAS_TX_RX_01_04';
IMG05='RESONANCIAS_TX_RX_01_05';
% Formato de la imagen.
  01) FORMATO==0 <--> '.emf'
% 02) FORMATO==1 <--> '.png'
% 03) FORMATO==2 <--> '.pdf'
FORMATO=0;
% Tamaño de marcadores en los ejes de la figura.
AXIS FONT=0.07*FIG DY;
% Tamaño de título en la figura.
TITLE FONT=0.08*FIG DY;
% Tamaño de etiquetas en la figura.
LABEL_FONT=0.075*FIG_DY;
% Tamaño de leyendas en la figura.
% LEYENDA FONT=10.5;
LEYENDA FONT=11;
% Tamaño de texto incluido en la figura.
TEXTO FONT=0.06*FIG DY;
06
                                                        _____
% PARÁMETROS DE SELECCIÓN DE DATOS PARA SU REPRESENTACIÓN.
8 -
      _____
% Selección de factor de acoplo para el que representar los resultados.
  -> Seleccionar factor de acoplo de entre los definidos para el
8
      análisis de las distintas configuraciones resonantes.
2
   -> K TX RX=[0.005, 0.01, 0.5];
K index=\overline{2};
§ _____
% GRÁFICA 01: EFICIENCIA DEL ENLACE.
  -> PARA UN FACTOR DE ACOPLO FIJO.
2
  -> FRENTE A LOS FACTORES DE CALIDAD DE LAS BOBINAS TX Y RX.
2
% _____
% Nombre de la figura.
FIG_NAME=IMG01;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=4;
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=[QTX; QTX; QTX; QTX];
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=[EFF LINK 01(K index,:);...
   EFF_LINK_02(K_index,:);...
EFF_LINK_03(K_index,:);...
    EFF LINK 04 (K index, :) ] *100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
```

```
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN_COLOR=cell(1,length(K_TX_RX));
if GRAF NUM<=length (COLOR LIST)
    LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
    LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM);
    LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    sprintf('\$Q_{L}~=~\$
    sprintf('$$k {T {X}-R {X}}~=~$$%g',K TX RX(K index))};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=2;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
\label{eq:leyenda_data{1}='$$T_{X}$$ no resonante & $$R_{X}$$ no resonante'; \\ \leyenda_data{2}='$$T_{X}$$ no resonante & $$R_{X}$$ s\''i resonante'; \\ \leyenda_data{2}='$$T_{X}$$ no resonante & $$R_{X}$$ s\''i resonante'; \\ \label{eq:leyenda_data}
LEYENDA DATA{3}='$$T {X}$$ s\''i resonante \& $$R {X}$$ s\''i resonante';
LEYENDA DATA{4}='T_{X} s\''i resonante \& $$R_{X}$$ no resonante';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del enlace vs.~',...
    'condiciones de resonancia');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Factores de calidad, $$Q {T {X}}$$~=~$$Q {R {X}}$$;;
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Eficiencia del enlace, $\eta {link}$ (\%)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG_DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
% -> Función "FCN GRAFICAS 01":
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
    X SCALE, Y SCALE, ...
    FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
    LIN_COLOR, LIN_TYPE, LIN_WIDE, AXIS_FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
```

```
LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
   TITLE DATA, TITLE FONT, ...
   XLIM DATA, YLIM DATA, ...
   XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ...
   FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
§ _____
                                       _____
% GRÁFICA 02: EFICIENCIA DEL TRANSMISOR.
  -> PARA UN FACTOR DE ACOPLO FIJO.
2
  -> FRENTE A LOS FACTORES DE CALIDAD DE LAS BOBINAS TX Y RX.
8
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG02;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=4;
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=[QTX; QTX; QTX; QTX];
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=[EFF TX 01(K index,:);...
   EFF_TX_02(K_index,:);...
   EFF TX 03(K index,:);...
   EFF TX 04(K index,:)]*100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y_SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN_COLOR=cell(1,length(K_TX_RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN_COLOR=COLOR_LIST (1:GRAF_NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
   LIN COLOR\{i\} = [rand(\overline{1}) rand(1) rand(1)];
   end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN TYPE=LIN LIST (1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
   LIN TYPE (1:end) = \{ '-' \};
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={..
   sprintf('$$Q {L}~=~$$%g',QL),...
   sprintf('$$k {T {X}-R {X}}~=~$$%g',K TX RX(K index))};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=2;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
\label{eq:leyenda_data{1}='$T_{X}$ no resonante & $R_{X}$ no resonante';
```

LEYENDA DATA{2}='\$\$T {X}\$\$ no resonante \& \$\$R {X}\$\$ s\''i resonante';  $\label{eq:leyenda_DATA{3}='$$T_{X}$$ s\''i resonante & $$R_{X}$$ s\''i resonante';$ LEYENDA DATA{4}=' $T_{X}$  s\''i resonante \& \$\$R\_{X}\$\$ no resonante'; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del transmisor vs.~',... 'condiciones de resonancia'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Factores de calidad,  $\$Q {T {X}}$ % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL\_DATA='Eficiencia del transmisor, \$\eta\_{L\_{T\_{X}}}\$ (\%)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG\_DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 01": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2021(X\_DATA, Y\_DATA, GRAF\_NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA\_DATA, LEYENDA\_FONT, LEYENDA\_POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL\_DATA, YLABEL\_DATA, LABEL FONT, ... FIG\_DIB, FIG\_SAVE, FORMATO); § \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 03: EFICIENCIA DEL RECEPTOR. % -> PARA UN FACTOR DE ACOPLO FIJO. 2 -> FRENTE A LOS FACTORES DE CALIDAD DE LAS BOBINAS TX Y RX. § \_\_\_\_\_ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG03; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=4; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA=[QTX; QTX; QTX; QTX]; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y DATA=[EFF RX 01(K index,:);... EFF\_RX\_02(K\_index,:);... EFF\_RX\_03(K\_index,:);... EFF\_RX\_04(K\_index,:)]\*100; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 2D.

```
X SCALE='linear';
Y SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF_NUM<=length(COLOR_LIST)
   LIN COLOR=COLOR_LIST (1:GRAF_NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR\{i\}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
    LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM);
    LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    sprintf('$$Q_{L}~=~$$%g',QL),...
    sprintf('$$k_{T_{X}-R_{X}}-R_{X}},K_TX_RX(K_index));
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=2;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA_DATA{1}='$$T_{X}$$ no resonante \& $$R_{X}$$ no resonante';
LEYENDA_DATA{2}='$$T_{X}$$ no resonante \& $$R_{X}$$ s\''i resonante';
LEYENDA_DATA{3}='$$T_{X}$$ s\''i resonante \& $$R_{X}$$ s\''i resonante';
LEYENDA DATA{4}='$$T {X}$$ s\''i resonante \& $$R {X}$$ no resonante';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del receptor vs.~',...
    'condiciones de resonancia');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL_DATA='Factores de calidad, $$Q_{T_{X}}$$~=~$$Q_{R_{X}}$;;
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Eficiencia del receptor, $\eta {L {R {X}}}$ (\%)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
% -> Función "FCN GRAFICAS 01":
[SALIDA] = FCN_GRAFICAS_2021(X_DATA, Y_DATA, GRAF_NUM, ...
```

```
X SCALE, Y SCALE, ...
    FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
    LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
   LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
   TITLE DATA, TITLE FONT, ...
   XLIM DATA, YLIM DATA, ...
    XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, LABEL_FONT, ...
    FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
%
% GRÁFICA 04: POTENCIA ENTREGADA A LA BOBINA TX.
   -> PARA UN FACTOR DE ACOPLO FIJO.
2
   -> FRENTE A LOS FACTORES DE CALIDAD DE LAS BOBINAS TX Y RX.
2
% _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG04;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF_NUM=4;
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=[QTX; QTX; QTX; QTX];
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=[PTX_01(K_index,:);...
   PTX_02(K_index,:);...
PTX_03(K_index,:);...
   PTX 04 (K index,:)]*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN_COLOR=COLOR_LIST(1:GRAF_NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN_TYPE=LIN_LIST(1:GRAF_NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM);
   LIN_TYPE(1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    sprintf('$$Q {L}~=~$$%g',QL),...
    sprintf('$$k {T {X}-R {X}}~=~$$%g',K TX RX(K index))};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
```

TEXTO\_NUM=2;

```
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
\label{eq:leyenda_data{1}='$$T_{X}$$ no resonante & $$R_{X}$$ no resonante'; \\ \label{eq:leyenda_data{2}='$$T_{X}$$ no resonante & $$R_{X}$$ s\''i resonante'; \\ \label{eq:leyenda_data}
LEYENDA DATA{3}='$$T {X}$$ s\''i resonante \& $$R {X}$$ s\''i resonante';
LEYENDA DATA{4}='$$T {X}$$ s\''i resonante \& $$R {X}$$ no resonante';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE_DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada a $$L_{T_{X}}$$ vs.~',...
     condiciones de resonancia');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Factores de calidad, \$Q {T {X}} 
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Potencia entregada a $$L {T {X}}$$, $$P {T {X}}$$ (mW)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
% -> Función "FCN GRAFICAS 01":
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
    X_SCALE,Y_SCALE,...
   FIG_NAME, FIG_DX, FIG_DY, ...
   LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
    LEYENDA_DATA, LEYENDA_FONT, LEYENDA_POS, ...
    TITLE DATA, TITLE FONT, ...
   XLIM DATA, YLIM DATA, ...
   XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ...
    FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
% -----
% GRÁFICA 05: POTENCIA ENTREGADA AL CIRCUITO RX.
   -> PARA UN FACTOR DE ACOPLO FIJO.
   -> FRENTE A LOS FACTORES DE CALIDAD DE LAS BOBINAS TX Y RX.
ok
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG05;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=4;
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=[QTX; QTX; QTX; QTX];
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=[PMN 01(K index,:);...
   PMN_02(K_index,:);...
```
```
PMN 03(K index,:);...
    PMN 04(K index,:)]*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='linear';
Y SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
    LIN COLOR=COLOR LIST(1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN LIST)</pre>
   LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
    LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    sprintf('$$Q {L}~=~$$%g',QL),...
    sprintf('$$k {T {X}-R {X}}~=~$$%g',K TX RX(K index))};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=2;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA_DATA{1}='$$T_{X}$$ no resonante \& $$R_{X}$$ no resonante';
LEYENDA_DATA{2}='$$T_{X}$$ no resonante \& $$R_{X}$$ s\''i resonante';
LEYENDA_DATA{3}='$$T_{X}$$ s\''i resonante \& $$R_{X}$$ s\''i resonante';
LEYENDA DATA{4}='T_{X} s\''i resonante \& $$R_{X}$$ no resonante';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada al RX vs.~',...
    'condiciones de resonancia');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Factores de calidad, \$ {T {X}}\$ {R {X}}\$;
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Potencia entregada al RX, $$P {MN}$$ (mW)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
```

FIG\_SAVE=1;

% Creación de la figura y dibujado de las gráficas. % -> Función "FCN\_GRAFICAS\_01": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2021(X\_DATA,Y\_DATA,GRAF\_NUM,... X\_SCALE,Y\_SCALE,... FIG\_NAME,FIG\_DX,FIG\_DY,... LIN\_COLOR,LIN\_TYPE,LIN\_WIDE,AXIS\_FONT,... TEXTO\_DATA,TEXTO\_NUM,TEXTO\_FONT,... LEYENDA\_DATA,LEYENDA\_FONT,LEYENDA\_POS,... TITLE\_DATA,TITLE\_FONT,... XLIM\_DATA,YLIM\_DATA,... XLABEL\_DATA,YLABEL\_DATA,LABEL\_FONT,... FIG\_DIB,FIG\_SAVE,FORMATO);

## 7.5 Código "EFICIENCIA\_PMN\_VS\_RL\_01".

```
% PROGRAMA "EFICIENCIA PMN VS RL 01.m"
                                        ******
응 {
% Programa de estudio de la influencia de la topología del circuito
% resonante del receptor (serie, paralelo) sobre la eficiencia del enlace
% y la potencia acoplada al receptor, para un sistema de Transmisión
% Inalámbrica de Potencia (WPT).
8
   -> Topología I: circuito RX resonante serie.
8
       * ZMN = RL + 1/(j*W*CRX)
2
8
   -> Topología I: circuito RX resonante paralelo.
2
      * ZMN = RL || 1/(j*W*CRX)
2
% En ambas configuraciones, el circuito transmisor presenta una resonancia
% de tipo serie, con señal de entrada de tensión.
% El sistema WPDT está basado en una configuración de dos bobinas acopladas
% mediante enlace inductivo.
% Relación de parámetros de interés:
                                _____
2
    -> w: frecuencia angular de resonancia del sistema WPDT (rad/s).
8
8
8
    -> QLX: factor de calidad de la bobina transmisora (-).
8
       * QLX = (w*LTX)/RLTX
           + LTX: autoinductancia de la bobina transmisora (H).
8
8
           + RLTX: resistencia parásita de la bobina transmisora (H).
8
    -> QRX: factor de calidad de la bobina receptora (-).
8
       * QRX = (w*LRX)/RLRX
8
8
          + LRX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
          + RLRX: resistencia parásita de la bobina receptora (H).
2
2
    -> QL: factor de calidad del circuito receptor (-).
8
8
       * QL = (w*LRX) / real{ZMN}
÷
          + LRX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
          + ZMN: impedancia de circuito de adaptación de impedancias
8
                del receptor.
8
       * Configuración serie: QL = (w*LRX)/RL
8
       * Configuración paralelo: QL = RL/(w*LRX)
8
8
    -> K TX RX: factor de acoplo entre las bobinas transmisora y receptora
      en el sistema de WPDT (-).
8
8
    -> EFF LINK: eficiencia del enlace WPDT (-).
8
2
8
    -> P TX: potencia entregada a la bobina transmisora (W).
2
2
    -> P MN: potencia entregada al circuito receptor (W).
% _____
                      _____
% Referencias bibliográficas
  _____
% Las ecuaciones y modelos utilizados en este programa se han obtenido de
% las referencias seguientes:
% [1] P. Perez-Nicoli, "Inductive Links for Wireless Power Transfer:
     Fundamental Concepts for Designing High-efficiency Wireless Power
     Transfer Links", Springer Nature Switzerland AG, 2021.
2
% [2] G.B. Hmida, "Design of Wireless Power Data Transfer Circuits for
     Implantable Bio-Micro System", Biotechnology, vol. 6, num. 2,
8
```

```
pp. 153-164, February 2007.
8
2
8}
2
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Universidad de Cantabria 2021.
۶ ******
§ _____
% INICIALIZACIÓN DEL PROGRAMA.
of ______
clc;
clear all;
close all;
§ _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL INICIO DEL PROGRAMA.
8 _____
disp('------');
disp('Ejecutando "EFICIENCIA PMN VS RL 01.m"');
disp('------');
ç
% DEFINICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES.
    % Frecuencia de resonancia del enlace inductivo (Hz).
f0=13.56E6;
% Frecuencia angular de resonancia del enlace inductivo (rad/s).
w0=2*pi*f0;
% Resistencia de pérdidas de la bobina transmisora (Ohm).
R TX=5;
% Resistencia de pérdidas de la bobina receptora (Ohm).
R RX=5;
% Factor de calidad de la bobina transmisora (-).
Q TX=200;
% Factor de calidad de la bobina receptora (-).
Q RX=200;
% Amplitud de fuente de señal de tensión (V).
VS=1;
% Resistencias de carga consideradas para el análisis (Ohm).
 -> Barrido logarítmico.
2
RL INI EXP=0;
RL END EXP=6;
RL_PTOS DEC=100;
RL=logspace(RL INI EXP, RL END EXP, RL PTOS DEC);
% Relación de factores de acoplo a considerar en el análisis (-).
K TX RX=[0.005, 0.01, 0.1, 0.5];
  % FORMATO MATRICIAL DE DATOS PARA FACILITAR EL CÓMPUTO.
% _____
% Matriz de valores de factores de acoplo (-).
K_MATRIX=K_TX_RX'*ones(1,length(RL));
```

```
% Ajustar dimensiones de la matriz de resistencia de carga para faciliar
% las operaciones en formato matricial.
RL MATRIX=ones(length(K TX RX),1)*RL;
<u>%</u>
% CÁLCULO DE VALORES DE INDUCTANCIAS DEL TRANSMISOR Y EL RECEPTOR.
§ _____
% Valor de autoinductancia de bobina del circuito transmisor (H).
  -> OTX = w*LTX/RTX
2
  -> LTX = QTX*RTX/w
2
L TX=Q TX*R TX/w0;
% Valor de autoinductancia de bobina del circuito receptor (H).
00
  -> ORX = w*LRX/RRX
  -> LRX = QRX*RRX/w
8
L RX=Q RX*R RX/w0;
۶ _____
% TOPOLOGÍA DE SISTEMA WPDT I.
%
% Configuración del sistema.
8
  -> Circuito TX resonante serie.
  -> Circuito RX resonante serie.
8
% Factor de calidad de la carga del receptor (-).
2
  \rightarrow ZMN = RL + 1/(j*w*CRX)
   -> QL = w*LRX/real{ZMN}
2
  -> QL = w*LRX/RL
QL_01=w0*L_RX./RL_MATRIX;
% Factor de calidad del circuito receptor (-).
\% -> Q RX L = QL || QRX
Q RX L 01=QL 01*Q RX./(QL 01+Q RX);
% Eficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
  -> EFF LINK = EFF TX*EFF RX
   -> EFF_TX = (K_TX_RX^2) *QTX*QRX_L/((K_TX_RX^2) *QTX*QRX_L+1)
8
   -> EFF_RX = Q_RX_L/QL
2
EFF TX 01=(K MATRIX.^2).*Q TX.*Q RX L 01./...
   ((K MATRIX.^2).*Q TX.*Q RX L 01+1);
EFF RX 01=Q RX L 01./QL 01;
EFF LINK 01=EFF TX 01.*EFF RX 01;
% Potencia suministrada a a bobina transmisora (W).
00
  -> PTX = 0.5*(VS^2)/(RTX + RREF)
% -> PTX = 0.5*(VS^2)/(RTX*((K_TX_RX^2)*QTX*QRX_L+1))
PTX 01=0.5*(VS^2)./(R TX*((K MATRIX.^2).*Q TX.*Q RX L 01+1));
% Potencia acoplada al circuito receptor (W).
% −> PMN = PTX*EFF LINK
PMN 01=PTX 01.*EFF LINK 01;
% _____
% TOPOLOGÍA DE SISTEMA WPDT II.
<u>%</u>
% Configuración del sistema.
% -> Circuito TX resonante serie.
  -> Circuito RX resonante paralelo.
8
% Factor de calidad de la carga del receptor (-).
\% -> ZMN = RL || 1/(j*w*CRX)
8
  -> real{ZMN} = RL/(1+(w*CRX*RL)^2)
00
  -> Suposición: 1 << (w*CRX*RL)^2
```

```
-> real{ZMN} ~= 1/(RL*(w*CRX)^2) = ((w*LRX)^2)/RL
8
% -> QL = w*LRX/real{ZMN}
% -> QL ~= w*LRX/[((w*LRX)^2)/RL] = RL/(w*LRX)
QL 02=RL MATRIX./(w0*L RX);
% Factor de calidad del circuito receptor (-).
  -> Q_RX_L = QL || QRX
8
Q_RX_L_02=QL_02*Q_RX./(QL_02+Q_RX);
% Eficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
  -> EFF LINK = EFF TX*EFF RX
2
   -> EFF TX = (K TX RX^2) *QTX*QRX L/((K TX RX^2) *QTX*QRX L+1)
8
2
  -> EFF RX = Q RX L/QL
EFF_TX_02=(K_MATRIX.^2).*Q_TX.*Q_RX_L_02./...
   ((K_MATRIX.^2).*Q_TX.*Q_RX_L_02+1);
EFF RX \overline{0}2=Q RX L 02./\overline{Q}L 02;
EFF LINK 02=EFF TX 02.*EFF RX 02;
% Potencia suministrada a a bobina transmisora (W).
  -> PTX = 0.5*(VS^2)/(RTX + RREF)
   -> PTX = 0.5*(VS^2)/(RTX*((K TX RX^2)*QTX*QRX L+1))
2
PTX_02=0.5*(VS^2)./(R_TX*((K_MATRIX.^2).*Q_TX.*Q_RX_L 02+1));
% Potencia acoplada al circuito receptor (W).
% −> PMN = PTX*EFF LINK
PMN 02=PTX 02.*EFF LINK 02;
<u>%</u> _____
% PRESENTACIÓN DE DATOS POR PANTALLA.
8 _____
% Impresión de resultados del programa por pantalla.
disp(' ');
disp('----
          -----');
disp('PARÁMETROS INICIALES DEL PROGRAMA');
                                   -----');
disp('-----
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de acoplo evaluados. \n');
for i=1:length(K TX RX)
   fprintf(' \ (\$g) \ K_TX_RX = \$g \ i, K_TX_RX(i));
end
disp(' ');
fprintf('-> Relación de resistencia de carga evaluadas. \n');
fprintf(' \to min(RL) = %g Ohm (n',RL(1));
fprintf('t \rightarrow max(RL) = %g Ohm \n', RL(end));
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad evaluados. \n');
fprintf('\t -> QTX = %g \n',Q_TX);
fprintf(' \ -> QRX = %g \ n', QRX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de pérdidas asociadas a las bobinas. \n');
fprintf('t \rightarrow RTX = %g Ohm \n', R_TX);
fprintf('\t -> RRX = %g Ohm \n', R RX);
disp(' ');
disp(' ');
* _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL FINAL DEL PROGRAMA.
ok
disp('------');
disp('"EFICIENCIA PMN VS RL 01.m" terminado');
§ _____
```

۶ \_\_\_\_\_

% REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

```
۶. _____
% _____
۶<u>۲</u>
% DEFINICIÓN DE FORMATO DE IMÁGENES.
                                _____
% -
         _____
% Tamaño de la imagen (cm).
% FIG DX=7.20;
% FIG DY=4.5;
% FIG DX=14;
% FIG DY=6;
FIG DX=15;
FIG_DY=7;
% Nombre de la imagen.
IMG01='EFICIENCIA PMN VS RL 01 01';
IMG02='EFICIENCIA PMN VS RL 01 02';
IMG03='EFICIENCIA_PMN_VS_RL_01_03';
IMG04='EFICIENCIA PMN_VS_RL_01
IMG05='EFICIENCIA_PMN_VS_RL_01
                           04';
                           05';
IMG06='EFICIENCIA PMN VS RL 01 06';
IMG07='EFICIENCIA_PMN_VS_RL_01_07';
IMG08='EFICIENCIA_PMN_VS_RL_01_08';
IMG09='EFICIENCIA PMN_VS_RL_01_09';
IMG10='EFICIENCIA PMN_VS_RL_01_10';
IMG11='EFICIENCIA_PMN_VS_RL_01_11';
IMG12='EFICIENCIA PMN VS RL 01 12';
% Formato de la imagen.
  01) FORMATO==0 <--> '.emf'
% 02) FORMATO==1 <--> '.png'
% 03) FORMATO==2 <--> '.pdf'
FORMATO=0;
% Tamaño de marcadores en los ejes de la figura.
AXIS_FONT=0.07*FIG DY;
% Tamaño de título en la figura.
TITLE FONT=0.08*FIG DY;
% Tamaño de etiquetas en la figura.
LABEL FONT=0.075*FIG DY;
% Tamaño de leyendas en la figura.
% LEYENDA FONT=10.5;
LEYENDA FONT=11;
% Tamaño de texto incluido en la figura.
TEXTO FONT=0.06*FIG DY;
              _____
                                                        _____
% GRÁFICA 01: CIRCUITO RX RESONANTE SERIE - EFICIENCIA DEL ENLACE.
% -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE.
% -----
                                                 _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG01;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=length(K TX RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=RL MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y_DATA=[];
```

Y DATA=EFF LINK 01\*100;

```
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K_TX_RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN_TYPE=LIN_LIST(1:GRAF_NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1,GRAF_NUM);
    LIN TYPE(1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$R {X}$$ resonante serie',...
    sprintf('$$R {T {X}}~=~R {R {X}}~=~$$%g~$$\\Omega$$',R TX),...
    sprintf('$$Q {T {X}}~=~Q {R {X}}~=~$$%g',Q TX)};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=3;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:))));
LEYENDA_TEXTO=strcat('$ \{T_{X} - R_{\overline{X}}\} \{\overline{x} - \overline{x}\}, LEYENDA TEXTO);
LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del enlace vs.~',...
    'resistencia de carga');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Resistencia de carga, $$R {L}$$ ($$\Omega$$)';
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Eficiencia del enlace, $\eta {link}$ (\%)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
```

```
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
  -> Función "FCN GRAFICAS 01":
8
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
   X SCALE, Y SCALE, ...
   FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
    LIN_COLOR, LIN_TYPE, LIN_WIDE, AXIS_FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO_NUM, TEXTO_FONT, ...
    LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
   TITLE DATA, TITLE FONT, ...
   XLIM_DATA, YLIM_DATA, ...
    XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ...
    FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
ofc ______
% GRÁFICA 02: CIRCUITO RX RESONANTE PARALELO - EFICIENCIA DEL ENLACE.
% -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE.
% _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG02;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF_NUM=length(K_TX_RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=RL MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=EFF LINK 02*100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1: GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K_TX_RX)
   LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM);
    LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$R_{X}$$ resonante paralelo',...
    sprintf('$$R_{T_{X}}~=~R_{R_{X}}~=~$$%g~$$\\Omega$$',R_TX),...
```

sprintf('\$\$Q {T {X}}~=~Q {R {X}}~=~\$\$%g',Q TX)}; % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=3; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA\_TEXTO=strtrim(char(num2str(K\_TX\_RX(:))));  $\label{eq:leyenda_text} \texttt{Leyenda_text} = \texttt{strcat}(\texttt{`$$k_{T_{X} - R_{X} }} \texttt{`$} = \texttt{`, Leyenda_text});$ LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)'; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del enlace vs.~',... 'resistencia de carga'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Resistencia de carga, \$\$R {L}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)'; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Eficiencia del enlace, \$\eta {link}\$ (\%)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 01": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2021(X\_DATA, Y\_DATA, GRAF\_NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG\_NAME, FIG\_DX, FIG\_DY, ... LIN\_COLOR, LIN\_TYPE, LIN\_WIDE, AXIS\_FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL\_DATA, YLABEL\_DATA, LABEL\_FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); 8 \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 03: CIRCUITO RX RESONANTE SERIE - POTENCIA EN LA CARGA. -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE. 8 \_\_\_\_\_ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG03; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=length(K TX RX); % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA=RL MATRIX; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y DATA=PMN 01\*1E3;

```
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN_COLOR=cell(1,length(K_TX_RX));
if GRAF_NUM<=length(COLOR_LIST)
   LIN COLOR=COLOR_LIST (1:GRAF_NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN TYPE=LIN LIST (1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
    LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$R {X}$$ resonante serie',...
    sprintf('$$R_{T_{X}}~=~R_{R_{X}}~=~$$$g~$$\\Omega$$',R_TX),...
sprintf('$$Q_{T_{X}}~=~Q_{R_{X}}~=~$$$g',Q_TX)};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=3;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:))));
LEYENDA_TEXTO=strcat('\$k_{T_{X}-R_{X}}', LEYENDA_TEXTO);
LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA_POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada al $$R {X}$$ vs.~',...
    'resistencia de carga');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL_DATA='Resistencia de carga, $$R_{L}$$ ($$\Omega$$)';
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Potencia entregada al $$R_{X}$$, $P_{MN}$ (mW)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
```

```
-> Función "FCN GRAFICAS 01":
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
    X SCALE, Y SCALE, ...
    FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
    LIN COLOR, LIN_TYPE, LIN_WIDE, AXIS_FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
    LEYENDA_DATA, LEYENDA_FONT, LEYENDA_POS, ...
    TITLE_DATA, TITLE_FONT, ...
    XLIM DATA, YLIM DATA, ...
    XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, LABEL_FONT, ...
    FIG_DIB, FIG_SAVE, FORMATO);
8 _____
% GRÁFICA 04: CIRCUITO RX RESONANTE PARALELO - POTENCIA EN LA CARGA.
% -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE.
8 --
                                                           _____
                          _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG04;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=length(K TX RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=RL MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=PMN 02*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN_COLOR=cell(1,length(K_TX_RX));
if GRAF_NUM<=length(COLOR_LIST)
    LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN_TYPE=LIN_LIST(1:GRAF_NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
    LIN_TYPE(1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$R {X}$$ resonante paralelo',...
    sprintf('$$R_{T_{X}}~=~R_{R_{X}}~=~$$%g~$$\\Omega$$',R_TX),...
sprintf('$$Q_{T_{X}}~=~Q_{R_{X}}~=~$$%g',Q_TX)};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=3;
```

% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.

LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:)))); LEYENDA TEXTO=strcat('\$ {T {X}-R {X}} $$\sim=\sim'$ , LEYENDA TEXTO); LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)'; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada al \$\$R {X}\$\$ vs.~',... 'resistencia de carga'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Resistencia de carga, \$\$R {L}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)'; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL\_DATA='Potencia entregada al \$\$R\_{X}\$\$, \$P\_{MN}\$ (mW)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 01": [SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN\_COLOR, LIN\_TYPE, LIN\_WIDE, AXIS\_FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM\_DATA, YLIM\_DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); ≗ \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 05: COMPARATIVA RX SERIE Y PARALELO - EFICIENCIA DEL ENLACE. % -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE. % \_\_\_\_ \_\_\_\_\_ % Selección de factor de acoplo para el que comparar los resultados de % eficiencia entre las topologías de receptor. K INDEX=find(K TX RX==0.01); % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG05; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=2; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA(1,:) =RL; X DATA(2,:) =RL; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[];

```
Y DATA(1,:)=EFF LINK 01(K INDEX,:)*100;
Y DATA(2,:)=EFF LINK 02(K INDEX,:)*100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST(1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
   LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
    LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    sprintf('$$k_{T_{X}-R_{X}}~=~$$%g',K_TX_RX(K_INDEX)),...
    sprintf('$$R_{T_{X}}~=~R_{R_{X}}~=~$$%g~$$\\Omega$$',R_TX),...
    sprintf('$$Q {T {X}}~=~Q {R {X}}~=~$$%g',Q TX)};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=3;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA DATA=[];
LEYENDA DATA{1}='$$R {X}$$ resonante serie';
LEYENDA DATA{2}='$$R {X}$$ resonante paralelo';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del enlace vs.~',...
    'resistencia de carga');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Resistencia de carga, $$R {L}$$ ($$\Omega$$)';
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Eficiencia del enlace, $\eta {link}$ (\%)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
```

FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 01": 2 [SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG\_NAME,FIG\_DX,FIG\_DY,... LIN\_COLOR, LIN\_TYPE, LIN\_WIDE, AXIS\_FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA\_DATA, LEYENDA\_FONT, LEYENDA\_POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL\_DATA, YLABEL\_DATA, LABEL\_FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); § \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 06: COMPARATIVA RX SERIE Y PARALELO - POTENCIA EN RX. % -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE. oc % Selección de factor de acoplo para el que comparar los resultados de % potencia en el RX entre las topologías de receptor. K INDEX=find(K TX RX==0.01); % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG06; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=2; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA(1,:)=RL; X\_DATA(2,:)=RL; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y\_DATA(1,:)=PMN\_01(K\_INDEX,:)\*1E3; Y DATA(2,:)=PMN 02(K INDEX,:)\*1E3; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 2D. X SCALE='log'; Y SCALE='linear'; % Relación de colores de líneas a representar. COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'}; LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX)); if GRAF\_NUM<=length(COLOR\_LIST) LIN COLOR=COLOR LIST (1: GRAF NUM); else for i=1:length(K TX RX) LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)]; end end % Tipos de líneas a utilizar en la representación. LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'}; if GRAF NUM<=length(LIN LIST) LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM); else LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM); LIN TYPE  $(1:end) = \{ '-' \};$ 

```
end
```

% Grosor de líneas a utilizar en la representación. LIN WIDE=1.5; % Texto a añadir a la figura. TEXTO DATA={... sprintf('\$\$k {T {X}-R {X}}~=~\$\$%g',K TX RX(K INDEX)),...  $\label{eq:sprintf('$$R_{T_{X}}^==R_{R_{X}}^==-$$$g-$$\Omega$$',R_TX),...$printf('$$Q_{T_{X}}^==2_{R_{X}}^=,Q_TX);$$ % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=3; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA DATA=[]; LEYENDA DATA{1}='\$\$R {X}\$\$ resonante serie'; LEYENDA DATA{2}='\$\$R {X}\$\$ resonante paralelo'; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM\_DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada al \$\$R {X}\$\$ vs.~',... 'resistencia de carga'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Resistencia de carga, \$\$R {L}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)'; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Potencia entregada al \$\$R\_{X}\$\$, \$P\_{MN}\$ (mW)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. % -> Función "FCN GRAFICAS 01": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2021(X\_DATA, Y\_DATA, GRAF\_NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM\_DATA, YLIM\_DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); ≗ \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 07: CIRCUITO RX RESONANTE SERIE - EFICIENCIA DEL TX. % -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE.

% ------% Nombre de la figura.

```
FIG_NAME=IMG07;
```

% Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF\_NUM=length(K\_TX\_RX);

```
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=RL MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=EFF TX 01*100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN_COLOR=cell(1,length(K_TX_RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR_LIST)
    LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN_COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)
    LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
    LIN_TYPE=cell(1,GRAF_NUM);
    LIN TYPE (1:end) = \{ '-' \};
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$R {X}$$ resonante serie',...
    sprintf('$$R_{T_{X}}~=~R_{R_{X}}~=~$$%g~$$\\Omega$$',R_TX),...
    sprintf('$$Q_{T_{X}}~=~Q_{R_{X}}~=~$$%g',Q_TX);
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=3;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:))));
LEYENDA TEXTO=strcat('\$ {T {X}-R {X}}\$, LEYENDA TEXTO);
LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA_POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del transmisor vs.~',...
    'resistencia de carga');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Resistencia de carga, $$R {L}$$ ($$\Omega$$)';
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL_DATA='Eficiencia del transmisor, $\eta_{L_{T_{X}}}$ (\%)';
```

```
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
  -> Función "FCN GRAFICAS 2021":
[SALIDA] = FCN_GRAFICAS_2021(X_DATA, Y_DATA, GRAF_NUM, ...
   X_SCALE,Y_SCALE,...
   FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
   LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
   TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
   LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
   TITLE DATA, TITLE FONT, ...
   XLIM DATA, YLIM DATA, ...
   XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, LABEL FONT, ...
   FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
oc
% GRÁFICA 08: CIRCUITO RX RESONANTE PARALELO - EFICIENCIA DEL TX.
℅ -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE.
٥٤
                                                       _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG08;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=length(K TX RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=RL MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=EFF TX 02*100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X_SCALE='log';
Y_SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN_COLOR=cell(1,length(K_TX_RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR_LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
   for i=1:length(K TX RX)
   LIN COLOR{i}=[rand(\overline{1}) rand(1) rand(1)];
   end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)</pre>
   LIN TYPE=LIN LIST (1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
   LIN TYPE (1:end) = \{ '-' \};
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
```

% Texto a añadir a la figura. TEXTO DATA={... 'Circuito \$\$R\_{X}\$\$ resonante paralelo',... sprintf('\$\$R\_{T\_{X}}~=~R\_{R\_{X}}~=~\$\$\$g~\$\$\\Omega\$\$',R\_TX),...
sprintf('\$\$Q\_{T\_{X}}~=~Q\_{R\_{X}}~=~\$\$\$g',Q\_TX)}; % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=3; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA\_TEXTO=strtrim(char(num2str(K\_TX\_RX(:)))); LEYENDA\_TEXTO=strcat(' $\$k_{T_{X}-R_{X}}$ ', LEYENDA\_TEXTO); LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)'; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM\_DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del transmisor vs.~',... 'resistencia de carga'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Resistencia de carga, \$\$R {L}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)'; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Eficiencia del transmisor, \$\eta {L {T {X}}}\$ (\%)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. % -> Función "FCN\_GRAFICAS\_2021": [SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); § \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 09: CIRCUITO RX RESONANTE SERIE - EFICIENCIA DEL RX. % -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE. % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG09; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=length(K TX RX); % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[];

X\_DATA=RL\_MATRIX;

```
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=EFF RX 01*100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y_SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN_COLOR=cell(1,length(K_TX_RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN_COLOR=COLOR_LIST(1:GRAF_NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
   LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN_LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)
    LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM);
    LIN TYPE(1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$R_{X}$$ resonante serie',...
    sprintf('$$R_{T_{X}}~=~R_{R_{X}}~=~$$%g~$$\\Omega$$',R_TX),...
    sprintf('$$Q_{T_{X}}~=~Q_{R_{X}}~=~$$%g',Q_TX)};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=3;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:))));
LEYENDA TEXTO=strcat('$ {T {X}-R {X}} {$ ~=~', LEYENDA TEXTO};
LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del receptor vs.~',...
    'resistencia de carga');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Resistencia de carga, $$R {L}$$ ($$\Omega$$)';
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Eficiencia del receptor, $\eta {L {T {X}}}$ (\%)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
```

```
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
   -> Función "FCN GRAFICAS 2021":
[SALIDA] = FCN_GRAFICAS_2021(X_DATA, Y_DATA, GRAF_NUM, ...
   X_SCALE, Y_SCALE, ...
   FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
   LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
   TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
   LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
   TITLE DATA, TITLE FONT, ...
   XLIM DATA, YLIM DATA, ...
   XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ...
   FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
%
% GRÁFICA 10: CIRCUITO RX RESONANTE PARALELO - EFICIENCIA DEL RX.
% -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE.
_____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG10;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=length(K TX RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=RL MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=EFF RX 02*100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X_SCALE='log';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN_COLOR=cell(1,length(K_TX_RX));
if GRAF_NUM<=length(COLOR_LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST(1:GRAF NUM);
else
   for i=1:length(K TX RX)
   LIN COLOR\{i\} = [rand(\overline{1}) rand(1) rand(1)];
   end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={ '-', '--', ':', '-.' };
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)
   LIN_TYPE=LIN_LIST(1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
   LIN TYPE (1:end) = \{ '-' \};
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO_DATA={...
```

'Circuito \$\$R {X}\$\$ resonante paralelo',... sprintf('\$\$R\_{T\_{X}}~=~R\_{R\_{X}}~=~\$\$%g~\$\$\\Omega\$\$',R\_TX),... sprintf('\$\$Q\_{T\_{X}}~=~Q\_{R\_{X}}~=~\$\$%g',Q\_TX); % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=3; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:)))); LEYENDA TEXTO=strcat( $\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1$ LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)'; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del receptor vs.~',... 'resistencia de carga'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL\_DATA='Resistencia de carga, \$\$R\_{L}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)'; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Eficiencia del receptor,  $\left\{L_{T_{X}}\right\}$  (\%)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 2021": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2021(X\_DATA,Y\_DATA,GRAF\_NUM,... X\_SCALE, Y\_SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL\_DATA, YLABEL\_DATA, LABEL FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); % % GRÁFICA 11: CIRCUITO RX RESONANTE SERIE - POTENCIA ENTREGADA A LTX. % -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE. <u></u>. % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG11; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=length(K TX RX); % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA=RL MATRIX;

% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.

```
Y DATA=[];
Y DATA=PTX 01*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST(1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
   LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1,GRAF NUM);
    LIN TYPE (1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$R {X}$$ resonante serie',...
    sprintf('$$R_{T_{X}}~=~R_{R_{X}}~=~$$%g~$$\\Omega$$',R_TX),...
    sprintf('$$Q {T {X}}~=~Q {R {X}}~=~$$%g',Q TX)};
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=3;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:))));
LEYENDA TEXTO=strcat('\$ {T {X}-R {X}}\$, LEYENDA TEXTO);
LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)';
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Límites de representación en el eje de abscisas de la figura.
XLIM DATA=[];
% Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura.
YLIM DATA=[];
% Título de la gráfica incluida en la figura.
TITLE DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada a $$L {T {X}}$$ vs.~',...
    'resistencia de carga');
% Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.
XLABEL DATA='Resistencia de carga, $$R {L}$$ ($$\Omega$$)';
% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.
YLABEL DATA='Potencia entregada a $$L {T {X}}$$, $$P {T {X}}$$ (mW)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
```

```
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
   -> Función "FCN GRAFICAS_2021":
[SALIDA] = FCN GRAFICAS 2021 (X DATA, Y DATA, GRAF NUM, ...
    X SCALE, Y SCALE, ...
    FIG_NAME,FIG_DX,FIG_DY,...
    LIN_COLOR, LIN_TYPE, LIN_WIDE, AXIS_FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
    LEYENDA_DATA, LEYENDA_FONT, LEYENDA_POS, ...
    TITLE DATA, TITLE FONT, ...
    XLIM DATA, YLIM DATA, ...
    XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, LABEL_FONT, ...
    FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
8 _____
% GRÁFICA 12: CIRCUITO RX RESONANTE PARALELO - POTENCIA ENTREGADA A LTX.
  -> FRENTE A UNA RESISTENCIA DE CARGA VARIABLE.
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG12;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
GRAF NUM=length(K TX RX);
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=RL MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=PTX 02*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX));
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST(1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF NUM<=length(LIN LIST)
   LIN_TYPE=LIN_LIST(1:GRAF_NUM);
else
   LIN TYPE=cell(1,GRAF_NUM);
    LIN TYPE (1:end) = \{ '-' \};
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA={...
    'Circuito $$R {X}$$ resonante paralelo',...
    sprintf('\$R_{T_{X}} = R_{R_{X}} - ...
    sprintf('$$Q_{T_{X}}~=~Q_{R_{X}}~=~$$%g',Q_TX);
```

% Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=3; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA TEXTO=strtrim(char(num2str(K TX RX(:)))); LEYENDA\_TEXTO=strcat(' $\$k_{T_{X}}-R_{\overline{X}}$ }  $\overline{\$} \sim = \sim$ ', LEYENDA TEXTO); LEYENDA DATA=cellstr(LEYENDA TEXTO)'; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA\_POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada a \$\$L {T {X}}\$\$ vs.~',... 'resistencia de carga'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL\_DATA='Resistencia de carga, \$\$R\_{L}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)'; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL\_DATA='Potencia entregada a \$\$L\_{T\_{X}}\$\$, \$\$P\_{T\_{X}}\$\$ (mW)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG\_DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 2021": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2021(X\_DATA, Y\_DATA, GRAF\_NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN\_COLOR, LIN\_TYPE, LIN\_WIDE, AXIS\_FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);

## 7.6 Código "FREQUENCY\_SPLITTING\_01".

```
% PROGRAMA "FREQUENCY SPLITTING 01.m"
****
8{
% Programa para la demostración del fenómeno de "frequency Splitting",
% producido para sistema de acoplo inductivo con sobreacoplamiento.
   -> El fenómeno de "Frequency Splitting" afecta a los valores
8
      frecuenciales para los que se obtiene la máxima entrega de potencia
2
÷
      al circuito receptor (PMN); los cuales están desplazados respecto
8
      a la frecuencia de resonancia original del sistema.
0
8
   -> El fenómeno de "Frequency Splitting", sin embargo, no afecta a la
      eficiencia del enlace, la cual siempre es máxima para la frecuencia
8
      de resonancia original del sistema.
8
8
90
   -> Topología del sistema:
2
       * Alimentación: Fuente de tensión "VS".
       * Circuito TX: resonancia serie.
8
       * Circuito RX: resonancia serie.
2
8
8
   -> Para simplificar el análisis, se va a suponer que los factores de
      calidad de las bobinas transmisora (Q_TX) y receptora (Q_RX), así
2
8
      como el factor de calidad de la carga (Q_L), mantienen su valor
      constante en la frecuencia.
2
8
% Para este análisis se han supuesto condiciones de resonancia tanto para
% el circuitos transmisor como para el circuito receptor, de forma que:
   -> Resonancia en el transimisor.
8
8
       * j*w0*L TX = -1/(j/w0*C TX).
8
%
   -> Resonancia en el receptor.
00
       * j*w0*L RX = -j*imag{ZMN}
8
   -> Topología del sistema:
8
0
       * Alimentación: Fuente de tensión "VS".
%
       * Circuito TX: resonancia serie.
00
       * Circuito RX: resonancia serie.
÷
% El sistema WPDT está basado en una configuración de dos bobinas acopladas
% mediante enlace inductivo.
2
% -
% Relación de parámetros de interés:
                                  _____
00
    -> w0: frecuencia angular de resonancia del sistema WPDT (rad/s).
8
2
8
     -> QLX: factor de calidad de la bobina transmisora (-).
        * QLX = (w*L TX)/R TX
2
0
           + L TX: autoinductancia de la bobina transmisora (H).
8
           + R TX: resistencia parásita de la bobina transmisora (H).
8
8
    -> QRX: factor de calidad de la bobina receptora (-).
        * QRX = (w*L RX)/R RX
8
           + L RX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
8
           + R RX: resistencia parásita de la bobina receptora (H).
%
8
    -> QL: factor de calidad del circuito receptor (-).
        * QL = (w*L RX) / real{ZMN}
8
8
           + L RX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
           + ZMN: impedancia de entrada del circuito receptor.
8
8
    -> K TX RX: factor de acoplo entre las bobinas transmisora y receptora
8
```

```
en el sistema de WPDT (-).
8
2
8
   -> EFF LINK: eficiencia del enlace WPDT (-).
2
   -> EFF LTX: eficiencia de la bobina transmisora (-).
8
÷
   -> EFF LRX: eficiencia de la bobina receptora (-).
8
8
8
   -> PMN OBJ: potencia objetivo que transmistir al circuito RX (W).
2
%
% Referencias bibliográficas
% Las ecuaciones y modelos utilizados en este programa se han obtenido de
% las referencias seguientes:
% [1] P. Perez-Nicoli, "Inductive Links for Wireless Power Transfer:
2
   Fundamental Concepts for Designing High-efficiency Wireless Power
   Transfer Links", Springer Nature Switzerland AG, 2021.
8
% [2] G.B. Hmida, "Design of Wireless Power Data Transfer Circuits for
   Implantable Bio-Micro System", Biotechnology, vol. 6, num. 2,
8
%
   pp. 153-164, February 2007.
8
8}
2
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Universidad de Cantabria 2021.
<u>%</u>
% INICIALIZACIÓN DEL PROGRAMA.
<u>%</u>
clc;
clear all;
close all;
§ _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL INICIO DEL PROGRAMA.
§ _____
disp('==================================;;;;
disp('Ejecutando "FREQUENCY SPLITTING 01.m"');
disp('------');
* _____
% DEFINICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES.
   % Frecuencia de resonancia del enlace inductivo (Hz).
f0=13.56E6;
% Frecuencia angular de resonancia del enlace inductivo (rad/s).
w0=2*pi*f0;
% Amplitud de fuente de señal de tensión (V).
VS=1:
% Resistencia de pérdidas de la bobina transmisora (Ohm).
R TX=5;
% Resistencia de pérdidas de la bobina receptora (Ohm).
R RX=5;
```

```
% Factor de calidad de la bobina transmisora (-).
Q_TX=200;
% Factor de calidad de la bobina receptora (-).
Q RX=200;
% Factor de calidad del circuito receptor (-).
Q L=50;
§ _____
% CÁLCULO DE VALORES DE AUTOINDUCTANCIAS DEL TRANSMISOR Y RECEPTOR.
§ _____
8{
   -> Para simplificar el análisis, se va a suponer que los factores de
8
     calidad de las bobinas transmisora (Q TX) y receptora (Q RX), así
2
     como el factor de calidad de la carga (Q L), mantienen su valor
8
00
     constante en la frecuencia.
8}
% Autoinductancia de la bobina transmisora (H).
  -> Q_TX = (w0*L_TX)/R_TX
L_TX=Q_TX*R_TX/w0;
% Autoinductancia de la bobina receptora (H).
  -> Q RX = (w0*L RX)/R RX
2
L RX=Q RX*R RX/w0;
۶. _____
% CÁLCULO DEL VALOR DE LA RESISTENCIA DE ENTRADA DEL CIRCUITO RECEPTOR.
<u>%</u> _____
% Resistencia de entrada del bloque de adaptación de impedancias o bloque
% receptor del sistema (Ohm).
8 {
   -> Q L = (w0*L RX)/real{ZMN}
8
2
8
   -> Considerando sistema resonante serie en el receptor.
8
     -> ZMN = -j/(w*C RX) + RL
     -> Q L = (w0*L RX)/RL
8
8}
RL=(w0*L RX)/Q L;
& _____
% DEFINICIÓN DE RELACIÓN DE VALORES DE PARÁMETROS "K" y "FREC".
% _____
% Factor de acoplo entre las bobinas del sistema (-).
K MAX=0.05;
K MIN=0;
K PUNTOS=100;
K_PASO=(K_MAX-K_MIN)/K_PUNTOS;
% Frecuencias de funcionamiento del sistema (Hz).
F MAX=14.5E6;
F MIN=12.5E6;
F_PUNTOS=100;
F PASO=(F MAX-F MIN)/F PUNTOS;
% Creación de malla de coordenadas de puntos de factores de acoplo y
% frecuencias de funcionamiento, para los que realizar el análisis de
% operación del sistema.
8{
   -> Eje "X": facor de acoplo.
8
   -> Eje "Y": frecuencia de operación.
8
8}
[K_COORD,F_COORD]=meshgrid(K_MIN:K_PASO:K_MAX,F_MIN:F_PASO:F_MAX);
W COORD=2*pi*F COORD;
```

```
۶. _____
% CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA BOBINA RECEPTORA.
% _____
<u>%</u>
% Eficiencia de la bobina receptora (-).
8{
8
   -> EFF_RX = P_ZMN/(P_ZMN + P_RX)
8
  -> P ZMN = (1/2) *real{V MN*I MN'}
8
90
         = (1/2) *real{(I RX*ZMN) *I RX'}
8
         = (1/2)*(I RX^2)*real{ZMN}
8
%
  -> P RRX = (1/2) *real{V RRX*I RRX'}
         = (1/2) * real { (I RX*R RX) * I RX' }
8
         = (1/2) * (I RX^2) * R RX
8
%
8
  -> Circuito serie receptor:
     -> ZMN = -j/(w*C RX) + RL
8
8
  -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
8
         = real{ZMN}/(R_RX+real{ZMN})
8
          = RL/(R RX+RL)
8
          = Q RX/(Q RX+Q L)
8}
     _____
% _____
EFF_RX=Q_RX/(Q_RX+Q_L);
```

```
% _____
% CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA REFLEJADA POR EL RECEPTOR EN EL TRANSMISOR.
<u>%</u>
 _____
8
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
8{
8
   -> ZREF = ((w*M)^2) / (R RX + j*w*L RX + ZMN)
        = ((w^2)*(k^2)*L_TX*L_RX)/(R_RX + j*w*L_RX - j/(w*C_RX)+ RL)
8
        = ((w^2) * (k^2) * L_TX*L_RX) / (R_RX + RL + j*w*L_RX*(1-(w0/w)^2))
8
8
          ((k^2)*Q_TX*Q_RX*Q_L*R_TX/...
          (Q_RX + Q_L + j*Q_RX*Q_L*(1-(w0/w)^2))
0
  -> Condición de resonancia original del sistema:
8
8
     -> w0 = 2*pi*f0
응}
                               _____
% -
ZREF=((K_COORD.^2)*Q_TX*Q_RX*Q_L*R_TX)./...
   (Q RX + Q L +...
   1i*Q RX.*Q L.*(1-(w0./W COORD).^2));
```

```
<u>%</u>
% CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA BOBINA TRANSMISORA.
<u>%</u> _____
∞
% Eficiencia de la bobina transmisora (-).
8{
8
  -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
8
8
  -> P_ZREF = (1/2) *real{V_ZREF*I_ZREF'}
= (1/2) *real{(I_TX*ZREF)*I_TX'}
8
%
8
         = (1/2)*(I TX^2)*real{ZREF}
Ŷ
8
  -> P_RTX = (1/2) *real{V_RTX*I_RTX'}
```

```
= (1/2) *real{ (I TX*R TX) *I TX' }
8
2
        = (1/2) * (I TX^{2}) * R TX
÷
  -> EFF_TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
Ŷ
        = real{ZREF}/(R RX+real{ZREF})
8
÷
응}
  _____
% _
EFF TX=real(ZREF)./(real(ZREF)+R TX);
§ _____
% CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA VISTA POR LA FUENTE DE ENTRADA.
ç
۶
۶
% Impedancia vista por la fuente de entrada del circuito (Ohm).
8{
90
  -> ZS = 1/(j*w*C TX) + R TX + j*w*L TX + ZREF
      = R_{TX} + j^{*}w^{*}L_{TX} (1 - (1/(L_{TX}^{*}C_{TX}^{*}w^{2}))) + ZREF
= R_{TX} + j^{*}w^{*}L_{TX} (1 - (w0/w)^{2}) + ZREF
8
8
      = R_TX + j*R_TX*Q_TX*(1 - (w0/w)^2) + ZREF
8
8}
%
ZS=R_TX+ZREF+1i*R_TX*Q_TX.*(1-(w0./W_COORD).^2);
<u>%</u> _____
% CÁLCULO DE LA POTENCIA ENTREGADA AL CIRCUITO TRANSMISOR.
  ۶<u>۲</u>
% Potencia entregada al circuito transmisor (W).
8{
  -> Considerando la condición impuesta de tensión "VS" dada.
8
8
    -> PTX @ VS
8
    -> PTX = (1/2) *real{VS*IS'}
         = (1/2) *real{VS*VS'/ZS'}
0
8
         = (1/2) *real {VS*VS'*ZS/(ZS*ZS') }
         = (1/2) * (abs(VS)^2) *real{ZS}/(abs(ZS)^2)
8
8}
PTX=(1/2) * (abs(VS)^2) *real(ZS)./(abs(ZS).^2);
§ _____
% CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL TRANSFERENCIA DE POTENCIA DEL SISTEMA.
8 _____
8 -----
% Eficiencia de transmisión de potencia del circuito (-).
8{
  -> Definición de eficiencia de transmisión de potencia del enlace.
8
    -> EFF_LINK = EFF_TX*EFF_RX
8
8
8}
۰
۹
EFF LINK=EFF RX.*EFF TX;
<u>%</u> _____
% CÁLCULO DE LA POTENCIA ENTREGADA AL CIRCUITO RECEPTOR.
  ۶<u>۲</u>
% Potencia entregada al circuito receptor (W).
8{
 -> Definición de potencia entregada al circuito receptor.
8
```

```
§ _____
% VALORES DE INTERÉS PARA EL CASO DE SUBACOPLO.
     _____
% =
% Definición del valor de subacoplo a analizar (-).
K SUB=0.01;
% Control de valor de subacoplo incluido dentro de valores considerados.
응 {
   -> El valor de subacoplo a analizar debe estar incluido dentro del
2
8
     rango de valores del factor de acoplo considerados en el programa.
8}
if K SUB<K MIN || K SUB>K MAX
   error(strcat('Error:',...
       sprintf(' el valor de K_SUB = %g',K_SUB),...
       ' está fuera de',...
       sprintf(' los límites de K_TX_RX = [%g, %g].',K_MIN,K_MAX)));
end
% Interpolación del valor de eficiencia del enlace para el factor de
% subacoplo indicado.
EFF LINK SUB=interp2(K COORD, F COORD, EFF LINK, ...
   K_SUB*ones(1,length(F_COORD(:,1))),F_COORD(:,1)');
% Interpolación del valor de potencia entregada al receptor para el factor
% de subacoplo indicado.
PMN_SUB=interp2(K_COORD,F_COORD,PMN,...
   K SUB*ones(1,length(F COORD(:,1))),F COORD(:,1)');
% Identificación de valores máximos locales para la eficiencia del enlace
% calculada para el factor de subacoplo indicado.
[EFF LINK SUB MAX, EFF LINK SUB MAX INDEX]=findpeaks(EFF LINK SUB);
% Identificación de valores máximos locales para la potencia entregada
% al receptor para el factor de subacoplo indicado.
[PMN SUB MAX, PMN SUB MAX INDEX]=findpeaks(PMN SUB);
% Búsqueda de valores de frecuencia para los que se obtienen los máximos
% de eficiencia del enlace, para el factor de subacoplo indicado.
F EFF SUB=F COORD(EFF LINK SUB MAX INDEX,1)';
% Búsqueda de valores de frecuencia para los que se obtienen los máximos
% de potencia entregada al receptor, para el factor de subacoplo indicado.
F PMN SUB=F COORD(PMN SUB MAX INDEX,1)';
% Interpolación del valor de impedancia vista por la fuente de tensión para
% el factor de subacoplo indicado.
ZS_SUB=interp2(K_COORD,F_COORD,ZS,...
   K SUB, F PMN SUB);
% _____
% VALORES DE INTERÉS PARA EL CASO DE SOBREACOPLO.
_____
% Definición del valor de sobreacoplo a analizar (-).
```

```
K_SOB=0.05;
```

```
\ Control de valor de sobreacoplo incluido dentro de valores considerados. \
```

```
-> El valor de sobreacoplo a analizar debe estar incluido dentro del
8
8
      rango de valores del factor de acoplo considerados en el programa.
8}
if K SOB<K MIN || K SOB>K MAX
    error(strcat('Error:',...
       sprintf(' el valor de K_SOB = %g',K_SOB),...
       ' está fuera de',...
       sprintf(' los límites de K TX RX = [%g, %g].',K MIN,K MAX)));
end
% Interpolación del valor de eficiencia del enlace para el factor de
% sobreacoplo indicado.
EFF LINK SOB=interp2(K COORD, F COORD, EFF LINK, ...
   K SOB*ones(1,length(F COORD(:,1))),F COORD(:,1)');
% Interpolación del valor de potencia entregada al receptor para el factor
% de sobreacoplo indicado.
PMN_SOB=interp2(K_COORD, F_COORD, PMN, ...
   K SOB*ones(1,length(F COORD(:,1))),F COORD(:,1)');
% Identificación de valores máximos locales para la eficiencia del enlace
% calculada para el factor de sobreacoplo indicado.
[EFF_LINK_SOB_MAX, EFF_LINK_SOB_MAX_INDEX] = findpeaks (EFF_LINK_SOB);
% Identificación de valores máximos locales para la potencia entregada
% al receptor para el factor de sobreacoplo indicado.
[PMN SOB MAX, PMN SOB MAX INDEX]=findpeaks(PMN SOB);
% Búsqueda de valores de frecuencia para los que se obtienen los máximos
% de eficiencia del enlace, para el factor de sobreacoplo indicado.
F_EFF_SOB=F_COORD(EFF_LINK_SOB MAX INDEX,1)';
% Búsqueda de valores de frecuencia para los que se obtienen los máximos
% de potencia entregada al receptor, para el factor de sobreacoplo indicado.
F PMN SOB=F COORD (PMN SOB MAX INDEX, 1) ';
% Interpolación del valor de eficiencia del enlace para la frecuencia de
% resonancia original del sistema.
EFF LINK SOB FRES=interp2(K COORD, F COORD, EFF LINK, ...
   K SOB, f0);
% Interpolación del valor de la potencia entregada al circuito receptor
% para la frecuencia de resonancia original del sistema.
PMN SOB FRES=interp2(K COORD, F COORD, PMN, ...
   K SOB, f0);
% Interpolación del valor de impedancia vista por la fuente de tensión para
% el factor de subacoplo indicado.
ZS SOB=interp2(K COORD,F COORD,ZS,...
   K SOB, F PMN SOB);
% Interpolación del valor de impedancia vista por la fuente de tensión para
% el factor de subacoplo indicado; a la frecuencia de resonancia original
% del sistema.
ZS_SOB_FRES=interp2 (K_COORD, F_COORD, ZS, ...
   K SOB, f0);
% _____
% PRESENTACIÓN DE DATOS POR PANTALLA.
8 _____
% Impresión de resultados del programa por pantalla.
disp(' ');
disp('----
                                                -----');
```

disp('-----');

disp('PARÁMETROS INICIALES DEL PROGRAMA');

```
disp(' ');
fprintf('-> Topología de circuito transmisor. \n');
fprintf('\t -> Circuito resonante serie. \n');
disp(' ');
fprintf('-> Topología de circuito receptor. \n');
fprintf('\t -> Circuito resonante serie. \n');
disp(' ');
fprintf('-> Condición de resonancia en el circuito transmisor. \n');
fprintf(' t -> j*w0*LTX = -1/(j*w0*CTX) n');
disp(' ');
fprintf('-> Condición de resonancia en el circuito receptor. \n');
fprintf(' \ -> j*w0*LRX = -j*imag{ZMN} \ n');
disp(' ');
fprintf('-> Relación de frecuencias de operación evaluadas. \n');
fprintf(' \to f = [\&g, \&g] MHz \setminus n', F MIN*1E-6, F MAX*1E-6);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de acoplo evaluados. \n');
fprintf('\t -> K TX RX = [%g, %g] \n', K MIN, K MAX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad evaluados. \n');
fprintf(' \ -> QTX = %g \ n', Q TX);
fprintf(' \ -> QRX = %g \ n', QRX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de pérdidas asociadas a las bobinas. \n');
fprintf('\t -> RTX = %g Ohm \n',R_TX);
fprintf('\t -> RRX = %g Ohm \n', R RX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de autoinductancias de las bobinas. \n');
fprintf('\t -> LTX = %g uH \n',L_TX*1E6);
fprintf('\t -> LRX = %g uH \n',L_RX*1E6);
disp(' ');
fprintf('-> Tensión de entrada del circuito transmisor. \n');
fprintf(' \mid -> VS = \&g V \mid n', VS);
disp(' ');
disp(' ');
disp('----
                                                        -----');
disp('ESTUDIO DEL CIRCUITO EN CONDICIONES DE SUBACOPLO');
disp('-----');
disp(' ');
fprintf('-> Condición de subacoplo entre bobinas. \n');
fprintf('\t -> K SUB = %g \n',K SUB);
disp(' ');
fprintf('-> Impedancia vista por la fuente de tensión. \n');
for i=1:length(F PMN SUB)
   fprintf(' \ -> f = \ g MHz \ n', F PMN SUB(i) *1E-6);
   fprintf('\t \t -> real{ZS} = %g Ohm \n', real(ZS_SUB(i)));
   fprintf('\t \t -> imag{ZS} = %g Ohm \n', imag(ZS SUB(i)));
   disp(' ');
end
fprintf('-> Máximos locales identificados para la eficiencia. \n');
fprintf('\t -> max(EFF) = %g %% @ f = %g MHz \n',...
   [EFF_LINK_SUB_MAX*100;F_EFF_SUB*1E-6]);
disp(' ');
fprintf('-> Máximos locales identificados de potencia entregada. \n');
fprintf('\t -> max(PMN) = %g mW @ f = %g MHz \n',...
   [PMN_SUB_MAX*1E3;F_PMN_SUB*1E-6]);
disp(' ');
disp(' ');
disp('-----
                   -----');
disp('ESTUDIO DE CIRCUITO EN CONDICIONES DE SOBREACOPLO');
                                                         -----'):
disp('-----
disp(' ');
fprintf('-> Condición de sobreacoplo entre bobinas. \n');
fprintf('t \rightarrow K SOB = %g \n', K SOB);
disp(' ');
for i=1:length(F PMN SOB)
   fprintf(' \to f = %g MHz \ N', F_PMN_SOB(i) *1E-6);
   fprintf('\t \t -> real{ZS} = %g Ohm \n', real(ZS_SOB(i)));
```

```
fprintf('\t \t -> imag{ZS} = %g Ohm \n', imag(ZS SOB(i)));
   disp(' ');
end
fprintf('-> Máximos locales identificados para la eficiencia. \n');
fprintf('\t -> max(EFF) = %g %% @ f = %g MHz \n',...
   [EFF LINK SOB MAX*100;F_EFF_SOB*1E-6]);
disp(' ');
fprintf('-> Máximos locales identificados de potencia entregada. \n');
fprintf(' \to max(PMN) = %g mW @ f = %g MHz \n',...
   [PMN_SOB_MAX*1E3;F_PMN_SOB*1E-6]);
disp(' ');
fprintf('-> Rendimiento a la frecuencia de resonancia original. \n');
fprintf(' \ -> f0 = %g MHz \ n', f0*1E-6);
fprintf('\t -> real{ZS} = %g Ohm \n', real(ZS_SOB_FRES));
fprintf('\t -> imag{ZS} = %g Ohm \n', imag(ZS_SOB_FRES));
fprintf('\t -> EFF = %g %% \n',EFF LINK SOB FRES*100);
fprintf('\t -> PMN = %g mW \n', PMN SOB FRES*1E3);
disp(' ');
disp(' ');
disp(' ');
8 _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL FINAL DEL PROGRAMA.
§ _____
disp('------');
disp('"FREQUENCY_SPLITTING_01.m" terminado');
disp('-----');
<u>%</u> _____
% _____
% REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS.
<u>%</u>
% _____
ok
% DEFINICIÓN DE FORMATO DE IMÁGENES.
% ----
    _____
                           _____
% Tamaño de la imagen (cm).
% FIG DX=7.20;
% FIG DY=4.5;
% FIG DX=14;
% FIG DY=6;
FIG DX=15;
FIG DY=7;
% Nombre de la imagen.
IMG01='FREQUENCY SPLITTING 01 01';
IMG02='FREQUENCY SPLITTING 01 02';
IMG03='FREQUENCY_SPLITTING_01_03';
IMG04='FREQUENCY_SPLITTING_01_04';
% Formato de la imagen.
% 01) FORMATO==0 <--> '.emf'
% 02) FORMATO==1 <--> '.png'
 03) FORMATO==2 <--> '.pdf'
2
FORMATO=1;
% Tamaño de marcadores en los ejes de la figura.
AXIS FONT=0.07*FIG DY;
% Tamaño de título en la figura.
TITLE FONT=0.08*FIG DY;
% Tamaño de etiquetas en la figura.
LABEL FONT=0.075*FIG DY;
```

% Tamaño de leyendas en la figura. % LEYENDA FONT=10.5; LEYENDA FONT=13; % Tamaño de texto incluido en la figura. TEXTO FONT=0.06\*FIG DY; <u>%</u> % GRÁFICA 01: EFICIENCIA DEL ENLACE VS. FRECUENCIA Y FACTOR DE ACOPLO % -> EFICIENCIA DEL ENLACE. 2 -> FRENTE AL FACTOR DE ACOPLO ENTRE LAS BOBINAS. 2 -> FRENTE A LA FRECUENCIA DE OPERACIÓN DEL SISTEMA. -> EFICIENCIA SIN EFECTO DE "FREQUENCY SPLITTING" PARA SOBREACOPLO. 9 ۶ \_\_\_\_\_۶ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG01; % Número de gráficas a incluir en la figura. % -> Curvas correspondientes al primer eje de ordenadas. GRAF NUM 01=1; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA=K COORD; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y DATA=F COORD\*1E-6; % Coordenadas del eje de cotas de los datos a representar. Z DATA=[];Z DATA=EFF LINK\*100; % Color de gráfica de superficie 3D. SURF COLOR='interp'; % Tipo de línea de gráfica de superficie 3D. SURF LINE=':'; % Vista para ejes de representación de gráfica 3D. % SURF VIEW=[1 -1 1]; % SURF VIEW=[-130 35]; SURF VIEW=[135 45]; % Número de puntos de interés a incluir en la figura. POINT NUM=0; % Coordenadas de puntos a resaltar en la gráfica 3D. POINT X=[]; POINT\_Y=[]; POINT Z=[]; % Tipos de marcadores para representar los puntos de interés en la gráfica % de superficie 3D. POINT\_TYPE=[]; % Colores de marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D. POINT COLOR=[]; % Tamaño de marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D. POINT SIZE=[]; % Texto sobre los marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D.

POINT TEXT=[];

% Tamaño de fuente de texto para los marcadores con los que representar % los puntos de interés en la gráfica de superficie 3D. POINT FONT=TEXTO\_FONT; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 3D. X SCALE='linear'; Y SCALE='linear'; Z SCALE='linear'; % Indicadción de representación de barra de colores en la figura. BAR USE=1; % Título de barra de colores en la figura. BAR TITLE='\eta {link} (%)'; % Tamaño de fuente de texto para el título y marcadores de la barra de % colores de la figura. BAR FONT=0.8\*LEYENDA FONT; % Posición de barra de colores en la figura. BAR POS='eastoutside'; % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=0; % Texto a añadir a la figura. TEXTO DATA=[]; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA DATA=[]; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de cotas de la figura. ZLIM DATA=[ ]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencia del enlace vs. ',... 'par\''ametros \$\$k {T {X}-R {X}}\$\$ y \$\$frec.\$\$'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura.  $XLABEL_DATA='$$k_{T_{X}}-R_{X} }$$';$ % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL\_DATA='\$f\$ (MHz)'; % Etiqueta a añadir al eje de cotas de la figura. ZLABEL DATA='Eficiencia, \$\eta\_{link}\$ (\%)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. % -> Función "FCN GRAFICAS\_SURF\_2021": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_SURF\_2021(X\_DATA,Y\_DATA,Z\_DATA,POINT\_NUM,...
FIG NAME, 1.5\*FIG DX, 1.5\*FIG DY, ... SURF\_COLOR, SURF\_LINE, SURF\_VIEW, ... POINT\_X, POINT\_Y, POINT\_Z, ... POINT\_TYPE, POINT\_COLOR, POINT\_SIZE, POINT\_TEXT, POINT\_FONT, AXIS\_FONT, .... X SCALE, Y SCALE, Z SCALE, ... BAR USE, BAR TITLE, BAR POS, BAR FONT, ... TEXTO\_DATA, TEXTO\_NUM, TEXTO\_FONT, ... LEYENDA\_DATA, LEYENDA\_FONT, LEYENDA\_POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ZLIM DATA, ... XLABEL\_DATA, YLABEL\_DATA, ZLABEL\_DATA, LABEL\_FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); 8 ----% GRÁFICA 02: POTENCIA ENTREGADA AL RX VS. FRECUENCIA Y FACTOR DE ACOPLO -> POTENCIA ENTREGADA AL RECEPTOR. -> FRENTE AL FACTOR DE ACOPLO ENTRE LAS BOBINAS. 2 -> FRENTE A LA FRECUENCIA DE OPERACIÓN DEL SISTEMA. 8 -> APARICIÓN DEL EFECTO DE "FREQUENCY SPLITTING" PARA SOBREACOPLO. 8 ۶. \_\_\_\_\_ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG02; % Número de gráficas a incluir en la figura. % -> Curvas correspondientes al primer eje de ordenadas. GRAF NUM 01=1; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA=K COORD; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y DATA=[]; Y\_DATA=F\_COORD\*1E-6; % Coordenadas del eje de cotas de los datos a representar. Z\_DATA=[]; Z DATA=PMN\*1E3; % Color de gráfica de superficie 3D. SURF COLOR='interp'; % Tipo de línea de gráfica de superficie 3D. SURF LINE=':'; % Vista para ejes de representación de gráfica 3D. % SURF VIEW=[1 -1 1]; % SURF\_VIEW=[-130 35]; SURF VIEW=[135 45]; % Número de puntos de interés a incluir en la figura. POINT NUM=0; % Coordenadas de puntos a resaltar en la gráfica 3D. POINT X=[]; POINT Y=[]; POINT\_Z=[]; % Tipos de marcadores para representar los puntos de interés en la gráfica % de superficie 3D. POINT TYPE=[]; % Colores de marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D.

POINT COLOR=[];

% Tamaño de marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D. POINT SIZE=[]; % Texto sobre los marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D. POINT TEXT=[]; % Tamaño de fuente de texto para los marcadores con los que representar % los puntos de interés en la gráfica de superficie 3D. POINT FONT=TEXTO FONT; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 3D. X SCALE='linear'; Y SCALE='linear'; Z\_SCALE='linear'; % Indicadción de representación de barra de colores en la figura. BAR\_USE=1; % Título de barra de colores en la figura. BAR\_TITLE='P\_{MN} (mW)'; % Tamaño de fuente de texto para el título y marcadores de la barra de % colores de la figura. BAR FONT=0.8\*LEYENDA FONT; % Posición de barra de colores en la figura. BAR POS='eastoutside'; % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=0; % Texto a añadir a la figura. TEXTO DATA=[]; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA\_DATA=[]; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de cotas de la figura. ZLIM DATA=[ ]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Potencia entregada al \$\$R {X}\$\$ vs. ',... ' par\''ametros \$\$k\_{T\_{X}-R\_{X}}\$\$ y \$\$frec.\$\$'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='\$k {T {X}-R {X}}\$;; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='\$f\$ (MHz)'; % Etiqueta a añadir al eje de cotas de la figura. ZLABEL DATA='Potencia, \$P {MN}\$ (mW)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla.

FIG\_DIB=1;

% Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. % -> Función "FCN\_GRAFICAS\_SURF\_2021": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_SURF\_2021(X\_DATA,Y\_DATA,Z\_DATA,POINT\_NUM,... FIG\_NAME, 1.5\*FIG\_DX, 1.5\*FIG\_DY, ... SURF\_COLOR, SURF\_LINE, SURF\_VIEW, ... POINT\_X, POINT\_Y, POINT\_Z, ... POINT TYPE, POINT\_COLOR, POINT\_SIZE, POINT\_TEXT, POINT\_FONT, AXIS\_FONT, ... X\_SCALE, Y\_SCALE, Z\_SCALE, ... BAR\_USE, BAR\_TITLE, BAR\_POS, BAR\_FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ZLIM DATA, ... XLABEL\_DATA, YLABEL\_DATA, ZLABEL\_DATA, LABEL\_FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);

## 7.7 Código "EFICIENCIA\_PMN\_VS\_ZMN\_01".

```
****
% PROGRAMA "EFICIENCIA PMN VS ZMN 01.m"
응 {
% Programa de estudio de la influencia de la impedancia de entrada del
% circuito receptor (ZMN) sobre la eficiencia del enlace y la potencia
% acoplada al receptor, para un sistema de Transmisión Inalámbrica de
% Potencia (WPT).
8
   -> Topología del sistema:
       * Alimentación: Fuente de tensión "VS".
8
       * Circuito TX: resonancia serie.
2
8
       * Circuito RX: resonancia serie.
2
2
% El sistema WPDT está basado en una configuración de dos bobinas acopladas
% mediante enlace inductivo.
2
% Relación de parámetros de interés:
2
2
    -> w: frecuencia angular de resonancia del sistema WPDT (rad/s).
8
    -> QLX: factor de calidad de la bobina transmisora (-).
8
%
       * QLX = (w*L TX)/R TX
           + L TX: autoinductancia de la bobina transmisora (H).
8
8
           + R TX: resistencia parásita de la bobina transmisora (H).
8
÷
    -> QRX: factor de calidad de la bobina receptora (-).
90
       * QRX = (w*L RX)/R RX
8
           + L RX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
           + R RX: resistencia parásita de la bobina receptora (H).
8
8
    -> QL: factor de calidad del circuito receptor (-).
       * QL = (w*L RX) / real{ZMN}
2
8
           + L RX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
           + ZMN: impedancia de entrada del circuito receptor.
8
8
    -> K TX RX: factor de acoplo entre las bobinas transmisora y receptora
8
       en el sistema de WPDT (-).
÷
8
    -> EFF LINK: eficiencia del enlace WPDT (-).
8
8
    -> P TX: potencia entregada a la bobina transmisora (W).
8
    -> P MN: potencia entregada al circuito receptor (W).
2
2
8 -
% Referencias bibliográficas
  _____
% Las ecuaciones y modelos utilizados en este programa se han obtenido de
% las referencias seguientes:
% [1] P. Perez-Nicoli, "Inductive Links for Wireless Power Transfer:
8
     Fundamental Concepts for Designing High-efficiency Wireless Power
     Transfer Links", Springer Nature Switzerland AG, 2021.
Ŷ
2
% [2] G.B. Hmida, "Design of Wireless Power Data Transfer Circuits for
8
     Implantable Bio-Micro System", Biotechnology, vol. 6, num. 2,
     pp. 153-164, February 2007.
8
8
8}
2
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
```

```
% Universidad de Cantabria 2021.
                    ****
<u>%</u>
% INICIALIZACIÓN DEL PROGRAMA.
§ _____
clc;
clear all;
close all;
ç
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL INICIO DEL PROGRAMA.
§ _____
disp('------');
disp('Ejecutando "EFICIENCIA PMN VS ZMN 01.m"');
disp('=================================;');
% _____
% DEFINICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES.
§ _____
% Frecuencia de resonancia del enlace inductivo (Hz).
f0=13.56E6:
% Frecuencia angular de resonancia del enlace inductivo (rad/s).
w0=2*pi*f0;
% Resistencia de pérdidas de la bobina transmisora (Ohm).
R TX=5;
% Resistencia de pérdidas de la bobina receptora (Ohm).
R RX=5;
% Factor de calidad de la bobina transmisora (-).
Q TX=200;
% Factor de calidad de la bobina receptora (-).
Q RX=200;
% Amplitud de fuente de señal de tensión (V).
VS=1;
% Factor de acoplo entre las bobinas del sistema (-).
K TX RX=0.01;
§ _____
% CÁLCULO DE VALORES DE INDUCTANCIAS DEL TRANSMISOR Y DEL RECEPTOR.
% =
  % Autoinductancia de la bobina transmisora (H).
2
 -> QTX = (w*LTX)/RTX
L_TX=Q_TX*R_TX/w0;
% Autoinductancia de la bobina receptora (H).
 -> QRX = (w*LRX)/RRX
2
L RX=Q RX*R RX/w0;
% Inductancia mútua debida al acoplo entre las bobinas (H).
  -> K TX RX = M TX RX/sqrt(LTX*LRX)
M_TX_RX=K_TX_RX*sqrt(L_TX*L_RX);
```

```
% _____
% DEFINICIÓN DE VALORES DE IMPEDANCIA DE ENTRADA DEL CIRCUITO RX.
% _____
% Parte real de la impedancia de entrada del circuit RX (Ohm).
% -> ZMN= real{ZMN} + j*imag{ZMN}.
realZMN INI=0.5;
realZMN END=60;
realZMN_PTOS=100;
realZMN=linspace(realZMN INI,realZMN END,realZMN PTOS);
% Parte imaginaria de la impedancia de entrada del circuit RX (Ohm).
% -> ZMN= real{ZMN} + j*imag{ZMN}.
imagZMN_INI=-1050;
imagZMN END=-950;
imagZMN PTOS=100;
imagZMN=linspace(imagZMN INI,imagZMN END,imagZMN PTOS);
§_____
% FORMATO MATRICIAL DE DATOS PARA FACILITAR EL CÓMPUTO.
% _____
% Estructura de datos a utilizar en el programa.
% -> Columnas de matriz de resultados: real{ZMN}.
  -> Filas de matriz de resultados: imag{ZMN}.
8
% Matriz de valores de parte real de impedancia ZMN (Ohm).
realZMN MATRIX=realZMN'*ones(1,length(imagZMN));
realZMN MATRIX=realZMN MATRIX';
% Matriz de valores de parte imaginaria de impedancia ZMN (Ohm).
imagZMN MATRIX=imagZMN'*ones(1,length(realZMN));
۶. _____
% CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE TRANMISIÓN DE POTENCIA DEL SISTEMA.
% _____
% Configuración del sistema.
  -> Circuito TX resonante serie.
2
8
  -> Circuito RX resonante serie.
  -> EFF_LINK = EFF_TX*EFF_RX
8
%
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
8{
   -> ZREF = ((w0*M)^2) / (R RX + j*w0*L RX + ZMN)
8
8}
% _____
ZREF=((w0*M TX RX)^2)./...
  (R_RX+1i*w0*L_RX+realZMN_MATRIX+1i*imagZMN_MATRIX);
%
% Eficiencia de la bobina receptora (-).
8{
  -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
8
8
   -> P ZMN = (1/2) *real{V MN*I MN'}
         = (1/2) *real{(I RX*ZMN)*I RX'}
0
         = (1/2) * (I RX^2) * real {ZMN}
8
8
8
  -> P RRX = (1/2) *real{V RRX*I RRX'}
         = (1/2) *real{(I_RX*R RX) *I RX'}
Ŷ
         = (1/2) * (I RX^{2}) * R RX
%
÷
8
  \rightarrow EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
          = real{ZMN}/(R RX+real{ZMN})
```

```
8}
       _____
& ____
EFF_RX=realZMN_MATRIX./(R_RX+realZMN_MATRIX);
ç.
% Eficiencia de la bobina transmisora (-).
8{
8
8
  -> EFF_TX = P_ZREF/(P_ZREF + P_TX)
8
  -> P ZREF = (1/2) *real{V ZREF*I ZREF'}
8
        = (1/2) *real{ (I TX*ZREF) *I TX'}
8
8
        = (1/2) * (I TX^2) * real{ZREF}
8
%
  -> P_RTX = (1/2) *real{V_RTX*I_RTX'}
%
        = (1/2) *real{(I TX*R TX)*I TX'}
        = (1/2) * (I TX^{2}) * R TX
8
8
  -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
8
8
         = real{ZREF}/(R RX+real{ZREF})
2
8}
∞
EFF_TX=real(ZREF)./(R_TX+real(ZREF));
%
\% Eficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
8{
  -> EFF_LINK = EFF_TX*EFF_RX
8
응 }
% -----
EFF LINK=EFF TX.*EFF RX;
% _____
% CÁLCULO DE LA POTENCIA SUMINISTRADA AL CIRCUITO RECEPTOR.
% _____
ole ______
% Capacidad del circuito transmisor (F).
응 {
8
  -> Suponiendo resonancia en el transmisor.
  -> 1/(j*w0*C TX) = -j*w0*L TX
8
  -> C_TX = 1/((w0^2) * L_TX)
8
8}
ok
C TX=1/((w0^2) L TX);
%
% Impedancia vista por la fuente de tensión (Ohm).
8 {
00
  -> ZS = 1/(j*w0*C_TX) + R_TX + j*W0*L_TX + ZREF
8}
of _____
ZS=(1/(1i*w0*C_TX))+R_TX+1i*w0*L_TX+ZREF;
ବ୍ଲ _____
                                 _____
% Potencia suministrada a a bobina transmisora (W).
8{
00
  -> PTX = (1/2) *real{VS*IS'}
  -> PTX = (1/2) *real {VS* (VS/ZS) ' }
8
  -> PTX = (1/2) * (VS^2) * real { 1/ZS' }
8
  -> PTX = (1/2) * (VS^2) * real { ZS/ (ZS*ZS') }
8
  -> PTX = (1/2) * (VS^2) * (1/(abs(ZS)^2)) * real{ZS}
8
8}
8
                                  _____
```

```
PÁGINA 259 DE 323
```

PTX=0.5\*(VS^2).\*(1./(abs(ZS)).^2).\*real(ZS);

```
%
% Potencia acoplada al circuito receptor (W).
8{
   -> PMN = PTX*EFF LINK
8
응}
                     _____
% _____
PMN=PTX.*EFF LINK;
§ _____
% IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO OOP (I) - PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA (MEP).
§ _____
% Valor máximo de eficiencia del enlace (-).
[EFF LINK MAX, INDICE] = max(EFF LINK(:));
% Identificación de la impedancia de entrada del receptor que maximiza la
% eficiencia de transmisión de potencia (MEP).
[imagZM MEP INDEX, realZM MEP INDEX] = ...
   ind2sub(size(EFF LINK), INDICE);
realZMN MEP=realZMN (realZM MEP INDEX);
imagZMN MEP=imagZMN (imagZM MEP INDEX);
$_____
% IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO OOP (II) - PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPP).
% Valor máximo de potencia transmitida al receptor por el enlace (-).
[PMN MAX, INDICE] = max(PMN(:));
% Identificación de la impedancia de entrada del receptor que maximiza la
% potencia transmitida al circuito receptor (MPP).
[imagZM MPP INDEX, realZM MPP INDEX] = ...
   ind2sub(size(PMN), INDICE);
realZMN MPP=realZMN(realZM MPP INDEX);
imagZMN_MPP=imagZMN(imagZM_MPP_INDEX);
§ _____
% PRESENTACIÓN DE DATOS POR PANTALLA.
۶ _____
% Impresión de resultados del programa por pantalla.
disp(' ');
disp('------');
disp('PARÁMETROS INICIALES DEL PROGRAMA');
disp('-----
                                -----');
disp(' ');
fprintf('-> Relación de frecuencias de operación evaluadas. \n');
fprintf(' \ -> f0 = %g MHz \ n', f0*1E-6);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de acoplo evaluados. \n');
fprintf('t \rightarrow K_TX_RX = %g \n', K_TX_RX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad evaluados. \n');
fprintf('t \rightarrow QTX = %g \n',Q_TX);
fprintf(' \ -> QRX = %g \ n', QRX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de pérdidas asociadas a las bobinas. \n');
fprintf(' \to RTX = %g Ohm \n', R TX);
fprintf('\t -> RRX = %g Ohm \n', R RX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de autoinductancias de las bobinas. \n');
fprintf('\t -> LTX = %g uH \n',L TX*1E6);
fprintf('\t -> LRX = %g uH \n',L RX*1E6);
disp(' ');
fprintf('-> Relación impedancias del circuit RX evaluadas. \n');
```

```
fprintf('\t -> real{ZMN} = [%g, %g] Ohm \n', realZMN(1), realZMN(end));
fprintf('\t -> imag{ZMN} = [%g, %g] Ohm \n', imagZMN(1), imagZMN(end));
disp(' ');
disp(' ');
disp('-----
            -----');
disp('PUNTO DE OPERACIÓN ÓPTIMO (I) - PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA (MEP)');
disp('-----');
disp(' ');
fprintf('-> Valor de máxima eficiencia de transferencia de potencia. \n');
fprintf('\t -> EFF_MAX = %g %% \n',EFF_LINK_MAX*100);
disp(' ');
fprintf('-> Valor de potencia entregada al receptor. \n');
fprintf('\t -> PMN = %g mW \n',...
  PMN(realZM MEP INDEX,imagZM MEP INDEX)*1E3);
disp(' ');
fprintf('-> Valor de impedancia para máxima eficiencia. \n');
fprintf('\t -> real{ZMN} = %g Ohm \n', realZMN MEP);
fprintf('\t -> imag{ZMN} = %g Ohm \n', imagZMN MEP);
disp(' ');
disp(' ');
disp('----
             -----');
disp('PUNTO DE OPERACIÓN ÓPTIMO (II) - PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPP)');
disp('-----');
disp(' ');
fprintf('-> Valor de máxima potencia entregada al receptor. \n');
fprintf('\t -> PMN MAX = %g mW \n', PMN MAX*1E3);
disp(' ');
fprintf('-> Valor de eficiencia de transferencia de potencia. \n');
fprintf('\t -> EFF = %g %% \n',...
  EFF_LINK(realZM_MPP_INDEX,imagZM MPP INDEX)*100);
disp(' ');
fprintf('-> Valor de impedancia para máxima potencia. \n');
fprintf('\t -> real{ZMN} = %g Ohm \n', realZMN_MPP);
fprintf('\t -> imag{ZMN} = %g Ohm \n', imagZMN MPP);
disp(' ');
disp(' ');
•
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL FINAL DEL PROGRAMA.
<u>%</u> _____
disp('-----');
disp('"EFICIENCIA_PMN_VS_ZMN_01.m" terminado');
disp('------');
return;
8 _____
§ _____
% REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS.
$_____
§ _____
% DEFINICIÓN DE FORMATO DE IMÁGENES.
o.
% Tamaño de la imagen (cm).
% FIG DX=7.20;
% FIG DY=4.5;
% FIG DX=14;
% FIG DY=6;
```

% Nombre de la imagen. IMG01='EFICIENCIA\_PMN\_VS\_ZMN\_01\_01';

FIG\_DX=15;
FIG\_DY=7;

```
IMG02='EFICIENCIA PMN VS ZMN 01 02';
IMG03='EFICIENCIA_PMN_VS_ZMN_01_03';
IMG04='EFICIENCIA PMN_VS_ZMN_01_04';
IMG05='EFICIENCIA_PMN_VS_ZMN_01_05';
% Formato de la imagen.
% 01) FORMATO==0 <--> '.emf'
% 02) FORMATO==1 <--> '.png'
  03) FORMATO==2 <--> '.pdf'
8
FORMATO=1;
% Tamaño de marcadores en los ejes de la figura.
AXIS FONT=0.07*FIG DY;
% Tamaño de título en la figura.
TITLE FONT=0.08*FIG_DY;
% Tamaño de etiquetas en la figura.
LABEL FONT=0.075*FIG DY;
% Tamaño de leyendas en la figura.
% LEYENDA FONT=10.5;
LEYENDA FONT=11;
% Tamaño de texto incluido en la figura.
TEXTO FONT=0.06*FIG DY;
§ _____
                                     _____
                                                           _____
% GRÁFICA 01: EFICIENCIA DEL ENLACE.
   -> FRENTE A IMPEDANCIA DE ENTRADA DE CIRCCUITO RECEPTOR.
   -> IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA.
8
8 _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG01;
% Número de puntos de interés a incluir en la figura.
POINT NUM=1;
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=realZMN MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=imagZMN MATRIX;
% Coordenadas del eje de cotas de los datos a representar.
Z DATA=[];
Z DATA=EFF LINK*100;
% Color de gráfica de superficie 3D.
SURF COLOR='interp';
% Tipo de línea de gráfica de superficie 3D.
% SURF LINE='none';
SURF LINE=':';
% Vista para ejes de representación de gráfica 3D.
% SURF VIEW=[1 -1 1];
% SURF VIEW=[-130 35];
SURF VIEW=[-40 30];
% Coordenadas de puntos a resaltar en la gráfica 3D.
POINT X=realZMN_MEP;
POINT Y=imagZMN MEP;
POINT_Z=EFF_LINK_MAX*100;
```

% Tipos de marcadores para representar los puntos de interés en la gráfica % de superficie 3D. POINT TYPE={ 'o' }; % Colores de marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D. POINT COLOR={'r'}; % Tamaño de marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D. POINT SIZE=6; % Texto sobre los marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D. POINT TEXT={ 'MEP' }; % Tamaño de fuente de texto para los marcadores con los que representar % los puntos de interés en la gráfica de superficie 3D. POINT FONT=TEXTO FONT; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 3D. X SCALE='linear'; Y\_SCALE='linear'; Z SCALE='linear'; % Indicadción de representación de barra de colores en la figura. BAR USE=1; % Título de barra de colores en la figura. BAR TITLE='\eta {link} (%)'; % Tamaño de fuente de texto para el título y marcadores de la barra de % colores de la figura. BAR FONT=0.95\*LEYENDA FONT; % Posición de barra de colores en la figura. BAR POS='eastoutside'; % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=0; % Texto a añadir a la figura. TEXTO DATA=[]; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA DATA=[]; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de cotas de la figura. ZLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('Punto de M\''axima Eficiencia (MEP) vs. \$\$Z {MN}\$\$'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='\$\$real\left \{ Z {MN} \right \}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)'; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.

YLABEL\_DATA='\$\$imag\left \{ Z\_{MN} \right \}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)';

```
% Etiqueta a añadir al eje de cotas de la figura.
ZLABEL DATA='$$\eta {link}$$ (\%)';
% Selección de dibujado de la figura en pantalla.
FIG DIB=1;
% Selección de guardado de la figura en disco.
FIG SAVE=1;
% Creación de la figura y dibujado de las gráficas.
% -> Función "FCN GRAFICAS SURF 2021":
[SALIDA] = FCN_GRAFICAS_SURF_2021(X_DATA,Y_DATA,Z_DATA,POINT_NUM,...
    FIG_NAME,1.5*FIG_DX,2*FIG_DY,...
    SURF COLOR, SURF LINE, SURF VIEW, ...
    POINT X, POINT Y, POINT Z, ...
    POINT TYPE, POINT COLOR, POINT SIZE, POINT TEXT, POINT FONT, AXIS FONT, ...
   X SCALE, Y SCALE, Z SCALE, ...
    BAR USE, BAR TITLE, BAR_POS, BAR_FONT, ...
    TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
   LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
   TITLE DATA, TITLE FONT, ...
   XLIM DATA, YLIM DATA, ZLIM DATA, ...
   XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, ZLABEL_DATA, LABEL_FONT, ...
    FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);
% GRÁFICA 01: POTENCIA ENTREGADA AL RECEPTOR.
   -> FRENTE A IMPEDANCIA DE ENTRADA DE CIRCCUITO RECEPTOR.
8
8
   -> IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA.
8 -----
                                                            _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG02;
% Número de puntos de interés a incluir en la figura.
POINT NUM=1;
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
X DATA=[];
X DATA=realZMN MATRIX;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA=imagZMN MATRIX;
% Coordenadas del eje de cotas de los datos a representar.
Z DATA=[];
Z DATA=PMN*1E3;
% Color de gráfica de superficie 3D.
SURF COLOR='interp';
% Tipo de línea de gráfica de superficie 3D.
% SURF LINE='none';
SURF LINE=':';
% Vista para ejes de representación de gráfica 3D.
% SURF VIEW=[1 -1 1];
% SURF VIEW=[-130 35];
SURF VIEW=[-40 30];
% Coordenadas de puntos a resaltar en la gráfica 3D.
POINT X=realZMN MPP;
POINT_Y=imagZMN_MPP;
POINT_Z=PMN_MAX*1E3;
```

% Tipos de marcadores para representar los puntos de interés en la gráfica % de superficie 3D. POINT TYPE={ 'o' }; % Colores de marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D. POINT COLOR={'r'}; % Tamaño de marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D. POINT SIZE=6; % Texto sobre los marcadores para representar los puntos de interés en la % gráfica de superficie 3D. POINT TEXT={ 'MPP' }; % Tamaño de fuente de texto para los marcadores con los que representar % los puntos de interés en la gráfica de superficie 3D. POINT FONT=TEXTO FONT; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 3D. X SCALE='linear'; Y\_SCALE='linear'; Z SCALE='linear'; % Indicadción de representación de barra de colores en la figura. BAR USE=1; % Título de barra de colores en la figura. BAR TITLE='P {MN} (mW)'; % Tamaño de fuente de texto para el título y marcadores de la barra de % colores de la figura. BAR FONT=0.95\*LEYENDA FONT; % Posición de barra de colores en la figura. BAR POS='eastoutside'; % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=0; % Texto a añadir a la figura. TEXTO DATA=[]; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA DATA=[]; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de cotas de la figura. ZLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('Punto de M\''axima Potencia (MPP) vs. \$\$Z {MN}\$\$'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL\_DATA='\$\$real\left \{ Z\_{MN} \right \}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)';

% Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura.

% Etiqueta a añadir al eje de cotas de la figura.  $ZLABEL_DATA='\$\$P_{MN}\$\$ (mW)';$ % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG\_DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG\_SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. % -> Función "FCN\_GRAFICAS\_SURF\_2021": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_SURF\_2021(X\_DATA,Y\_DATA,Z\_DATA,POINT\_NUM,... FIG\_NAME,1.5\*FIG\_DX,2\*FIG\_DY,... SURF COLOR, SURF LINE, SURF VIEW, ... POINT X, POINT Y, POINT Z, ... POINT TYPE, POINT COLOR, POINT SIZE, POINT TEXT, POINT FONT, AXIS FONT, ... X\_SCALE, Y\_SCALE, Z\_SCALE, ... BAR USE, BAR TITLE, BAR POS, BAR FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA\_DATA, LEYENDA\_FONT, LEYENDA\_POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM\_DATA, YLIM\_DATA, ZLIM\_DATA, ... XLABEL\_DATA, YLABEL\_DATA, ZLABEL\_DATA, LABEL\_FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);

## 7.8 Código "EFICIENCIA\_VS\_REALZMN\_01".

```
% PROGRAMA "EFICIENCIA VS REALZMN 01.m"
응 {
% Programa de estudio de la influencia de la impedancia de entrada del
% circuito receptor (ZMN) sobre la eficiencia del enlace, la eficiencia de
% la bobina transmisora y la eficiencia de la bobina receptora, para un
% sistema de Transmisión Inalámbrica de Potencia (WPT).
% Para este análisis se han supuesto condiciones de resonancia tanto para
% el circuitos transmisor como para el circuito receptor.
   -> Topología del sistema:
8
      * Alimentación: Fuente de tensión "VS".
       * Circuito TX: resonancia serie.
2
      * Circuito RX: resonancia serie.
8
2
% El sistema WPDT está basado en una configuración de dos bobinas acopladas
% mediante enlace inductivo.
% Relación de parámetros de interés:
                                _____
2
    -> w0: frecuencia angular de resonancia del sistema WPDT (rad/s).
8
8
8
    -> QLX: factor de calidad de la bobina transmisora (-).
8
       * QLX = (w*L TX)/R TX
           + L TX: autoinductancia de la bobina transmisora (H).
8
8
           + R TX: resistencia parásita de la bobina transmisora (H).
8
    -> QRX: factor de calidad de la bobina receptora (-).
8
       * QRX = (w*L RX)/R RX
8
8
          + L RX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
          + R RX: resistencia parásita de la bobina receptora (H).
2
2
    -> QL: factor de calidad del circuito receptor (-).
8
8
       * QL = (w*L RX)/real{ZMN}
÷
          + L RX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
          + ZMN: impedancia de entrada del circuito receptor.
÷
8
    -> K TX RX: factor de acoplo entre las bobinas transmisora y receptora
8
      en el sistema de WPDT (-).
8
8
    -> EFF LINK: eficiencia del enlace WPDT (-).
2
    -> EFF LTX: eficiencia de la bobina transmisora (-).
2
8
    \makebox{-> EFF}_LRX: eficiencia de la bobina receptora (-).
2
۶
۶
% Referencias bibliográficas
                           _____
% Las ecuaciones y modelos utilizados en este programa se han obtenido de
% las referencias seguientes:
% [1] P. Perez-Nicoli, "Inductive Links for Wireless Power Transfer:
     Fundamental Concepts for Designing High-efficiency Wireless Power
8
8
     Transfer Links", Springer Nature Switzerland AG, 2021.
2
% [2] G.B. Hmida, "Design of Wireless Power Data Transfer Circuits for
00
     Implantable Bio-Micro System", Biotechnology, vol. 6, num. 2,
     pp. 153-164, February 2007.
8
8
8}
```

```
8
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Universidad de Cantabria 2021.
۶. _____
% INICIALIZACIÓN DEL PROGRAMA.
<u>%</u>
clc;
clear all;
close all;
% _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL INICIO DEL PROGRAMA.
8 _____
disp('==========');
disp('Ejecutando "EFICIENCIA_VS_REALZMN_01.m"');
disp('------');
§ _____
% DEFINICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES.
* _____
% Frecuencia de resonancia del enlace inductivo (Hz).
f0=13.56E6:
% Frecuencia angular de resonancia del enlace inductivo (rad/s).
w0=2*pi*f0;
% Resistencia de pérdidas de la bobina transmisora (Ohm).
R TX=5;
% Resistencia de pérdidas de la bobina receptora (Ohm).
R RX=5;
% Factor de calidad de la bobina transmisora (-).
Q TX=200;
% Factor de calidad de la bobina receptora (-).
Q RX=200;
% Amplitud de fuente de señal de tensión (V).
VS=1:
% Factor de acoplo entre las bobinas del sistema (-).
K TX RX=0.01;
§ _____
% CÁLCULO DE VALORES DE INDUCTANCIAS DEL TRANSMISOR Y DEL RECEPTOR.
%
% Autoinductancia de la bobina transmisora (H).
 -> QTX = (w*LTX)/RTX
8
L TX=Q TX*R TX/w0;
% Autoinductancia de la bobina receptora (H).
% \rightarrow QRX = (w*LRX)/RRX
L_RX=Q_RX*R RX/w0;
% Inductancia mútua debida al acoplo entre las bobinas (H).
 -> K TX RX = M TX RX/sqrt(LTX*LRX)
M_TX_RX=K_TX_RX*sqrt(L_TX*L_RX);
```

```
% _____
% DEFINICIÓN DE VALORES REALES DE IMPEDANCIA DE ENTRADA DEL CIRCUITO RX.
<u>%</u> _____
% Parte real de la impedancia de entrada del circuit RX (Ohm).
  -> ZMN= real{ZMN} + j*imag{ZMN}.
8
realZMN INI=0.5;
realZMN_END=100;
realZMN PTOS=200;
realZMN=linspace(realZMN INI,realZMN END,realZMN PTOS);
۶. _____
% CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE TRANMISIÓN DE POTENCIA DEL SISTEMA.
§ _____
% Configuración del sistema.
  -> Circuito TX resonante serie.
2
  -> Circuito RX resonante serie.
2
  -> Condiciones de resonancia para ambos circuitos.
  -> EFF_LINK = EFF_TX*EFF_RX
8
06
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
8{
2
   -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R_RX + j*w0*L_RX + ZMN)
   -> Condición de resonancia:
8
     \rightarrow j*w0*L_RX = -j*imag{ZMN}
8
     -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R_RX + real{ZMN})
2
응 }
ok
ZREF=((w0*M_TX_RX)^2)./(R_RX+realZMN);
%
% Eficiencia de la bobina receptora (-).
8{
8
   -> EFF_RX = P_ZMN/(P_ZMN + P_RX)
8
  -> P_ZMN = (1/2) *real{V_MN*I_MN'}
8
8
         = (1/2) *real{(I_RX*ZMN) *I_RX'}
8
         = (1/2)*(I_RX^2)*real{ZMN}
2
8
  -> P RRX = (1/2) *real{V RRX*I RRX'}
00
         = (1/2) *real{(I RX*R RX) *I RX'}
2
         = (1/2) * (I RX^2) * R RX
8
  -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
          = real{ZMN}/(R RX+real{ZMN})
2
8}
%
EFF_RX=realZMN./(R_RX+realZMN);
ok
% Eficiencia de la bobina transmisora (-).
8{
8
8
   -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
2
   -> P ZREF = (1/2) *real{V ZREF*I ZREF'}
%
          = (1/2) *real { (I TX*ZREF) *I TX' }
8
          = (1/2) * (I TX^2) * real {ZREF}
%
÷
   -> P_RTX = (1/2) *real{V_RTX*I_RTX'}
8
         = (1/2) *real{(I TX*R TX)*I TX'}
%
8
         = (1/2) * (I TX^2) * R TX
Ŷ
8
  -> EFF_TX = P_ZREF/(P_ZREF + P_TX)
```

```
% = real{ZREF}/(R_RX+real{ZREF})
%
%
EFF_TX=real(ZREF)./(R_TX+real(ZREF));
%
Efficiencia del enlace por acoplo inductivo WPDT (-).
%
{
% -> EFF_LINK = EFF_TX*EFF_RX
%
%
```

EFF\_LINK=EFF\_TX.\*EFF\_RX;

```
EFF_LINK_MAX=interp1(realZMN,EFF_LINK,realZMN_MEP);
```

```
§ _____
% PRESENTACIÓN DE DATOS POR PANTALLA.
% _____
% Impresión de resultados del programa por pantalla.
disp(' ');
disp('--
                                             -----');
disp('PARÁMETROS INICIALES DEL PROGRAMA');
disp('-----');
disp(' ');
fprintf('-> Topología de circuito transmisor. \n');
fprintf('\t -> Circuito resonante serie. \n');
disp(' ');
fprintf('-> Topología de circuito receptor. \n');
fprintf('\t -> Circuito resonante serie. \n');
disp(' ');
fprintf('-> Condición de resonancia en el circuito transmisor. \n');
fprintf(' \ -> \ j*w0*LTX = -1/(j*w0*CTX) \ \n');
disp(' ');
fprintf('-> Condición de resonancia en el circuito receptor. \n');
fprintf(' \mid -> j*w0*LRX = -j*imaq{ZMN} \mid n');
disp(' ');
fprintf('-> Relación de frecuencias de operación evaluadas. \n');
fprintf(' \to f0 = %g MHz \ n', f0*1E-6);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de acoplo evaluados. \n');
fprintf('\t -> K TX RX = %g \n',K TX RX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad evaluados. \n');
fprintf('t \rightarrow QTX = %g \n', Q_TX);
fprintf(' \ -> QRX = %g \ n', QRX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de pérdidas asociadas a las bobinas. \n');
fprintf(' \to RTX = %g Ohm \n', R_TX);
fprintf('\t -> RRX = %g Ohm \n', R RX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de autoinductancias de las bobinas. \n');
fprintf('\t -> LTX = %g uH \n',L_TX*1E6);
fprintf('t \rightarrow LRX = %g uH \n', LRX*1E6);
```

```
disp(' ');
fprintf('-> Relación impedancias del circuit RX evaluadas. \n');
fprintf('\t -> real{ZMN} = [%g, %g] Ohm \n', realZMN(1), realZMN(end));
disp(' ');
disp(' ');
disp('----
                 -----');
disp('PUNTO DE OPERACIÓN ÓPTIMO - PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA (MEP)');
disp('-----');
disp(' ');
fprintf('-> Valor de máxima eficiencia de transferencia de potencia. \n');
fprintf('\t -> EFF_MAX = %g %% \n',EFF_LINK_MAX*100);
disp(' ');
fprintf('-> Valor de impedancia para máxima eficiencia. \n');
fprintf('\t -> real{ZMN} = %g Ohm \n', realZMN_MEP);
disp(' ');
disp(' ');
* _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL FINAL DEL PROGRAMA.
§ _____
disp('------');
disp('"EFICIENCIA VS REALZMN 01.m" terminado');
disp('-----');
× _____
8 _____
% REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS.
% _____
о́к _____
% _____
% DEFINICIÓN DE FORMATO DE IMÁGENES.
%
% Tamaño de la imagen (cm).
% FIG DX=7.20;
% FIG DY=4.5;
% FIG DX=14;
% FIG DY=6;
FIG_DX=15;
FIG_DY=7;
% Nombre de la imagen.
IMG01='EFICIENCIA VS REALZMN 01 01';
IMG02='EFICIENCIA VS REALZMN 01 02';
% Formato de la imagen.
% 01) FORMATO==0 <--> '.emf'
% 02) FORMATO==1 <--> '.png'
% 03) FORMATO==2 <--> '.pdf'
FORMATO=0;
% Tamaño de marcadores en los ejes de la figura.
AXIS_FONT=0.07*FIG_DY;
% Tamaño de título en la figura.
TITLE FONT=0.08*FIG DY;
% Tamaño de etiquetas en la figura.
LABEL FONT=0.075*FIG DY;
% Tamaño de leyendas en la figura.
% LEYENDA FONT=10.5;
LEYENDA FONT=12;
% Tamaño de texto incluido en la figura.
TEXTO FONT=0.06*FIG DY;
```

8 \_\_\_\_\_ % GRÁFICA 01: EFICIENCIAS DEL SISTEMA. 8 -> EFICIENCIA DEL ENLACE. 8 -> EFICIENCIA DE LA BOBINA TRANSMISORA. -> EFICIENCIA DE LA BOBINA RECEPTORA. 8 -> FRENTE A IMPEDANCIA DE ENTRADA DE CIRCCUITO RECEPTOR. 2 -> IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA. ۶ \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG01; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=3; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X DATA(1,:)=realZMN; X DATA(2,:)=realZMN; X DATA(3,:)=realZMN; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. Y\_DATA=[]; Y\_DATA(1,:)=EFF\_TX\*100; Y\_DATA(2,:)=EFF\_RX\*100; Y\_DATA(3,:)=EFF\_LINK\*100; % Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas % del espacio de representación 2D. X SCALE='linear'; Y SCALE='linear'; % Relación de colores de líneas a representar. COLOR\_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'}; LIN COLOR=cell(1,length(K TX RX)); if GRAF\_NUM<=length(COLOR\_LIST) LIN\_COLOR=COLOR\_LIST(1:GRAF\_NUM); else for i=1:length(K TX RX)  $LIN_COLOR{i} = [rand(1) rand(1) rand(1)];$ end end % Tipos de líneas a utilizar en la representación. LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'}; if GRAF NUM<=length(LIN LIST) LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM); else LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM); LIN TYPE(1:end) = { '-' }; end % Grosor de líneas a utilizar en la representación. LIN\_WIDE=1.5; % Número de puntos o marcaradores a incluir en la figura. POINT NUM=1; % Coordenadas del eje de abscisas de los marcadores a representar. POINT X=[]; POINT X=realZMN MEP; % Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar. POINT Y=[]; POINT Y=EFF LINK MAX\*100; % Tipo de símbolos para la representación de marcadores.

POINT TYPE='x'; % Color de símbolos para la representación de marcadores. POINT COLOR={ 'k' }; % Tamaño de símbolos para la representación de marcadores. POINT SIZE=6; % Textos asociados a los marcadores representados. POINT TEXT={'MEP'}; % Tamaño de fuente de extos asociados a los marcadores representados. POINT FONT=TEXTO\_FONT; % Texto a añadir a la figura. TEXTO DATA={... sprintf('\$\$R {T {X}}~=~R {R {X}}~=~\$\$%g~\$\$\\Omega\$\$',R TX),... sprintf('\$\$Q {T {X}}~=~Q {R {X}}~=~\$\$%q',Q TX)}; % Número de elementos de texto a añadir a la figura. TEXTO NUM=2; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura.  $\texttt{LEYENDA\_DATA(1) = \{ '\$\$ \ \texttt{L} \{ \texttt{TX} \} } \$\$' \};$ LEYENDA\_DATA(2) = { '\$\eta\_{L\_{RX}} } ; LEYENDA DATA(3) = { '\$\$\eta {link} \$\$'}; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Eficiencias del sistema vs.~',... 'impendancia real del \$\$R {X}\$\$'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Impedancia real del \$\$R {X}\$\$, \$\$real\left \{ Z {MN} \right \}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)'; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Eficiencia, \$\eta\$ (\%)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 2D 2021": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2D\_2021(X\_DATA, Y\_DATA, GRAF\_NUM, ... X\_SCALE, Y\_SCALE, ... FIG\_NAME, FIG\_DX, FIG DY, ... LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ... POINT NUM, POINT X, POINT\_Y, ... POINT TYPE, POINT COLOR, POINT SIZE, POINT TEXT, POINT FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG\_DIB,FIG\_SAVE,FORMATO);

## 7.9 Código "COMPARATIVA\_MEP\_VS\_MPP\_01".

```
% PROGRAMA "COMPARATIVA MEP VS MPP 01.m"
응 {
% Programa para la comparativa de rendimiento entre circuitos diseñados
% considerando la Máxima Eficiencia de Potencia (MEP) y la Máxima
% Transferencia de Potencia (MPP).
% Ambos circuitos a comparar presentan idéntica topología, siendo la parte
% real de la impedancia de entrada del circuito RX el parámetro diferente
% entre ellos.
2
Ŷ
   -> Topología del sistema:
8
       * Alimentación: Fuente de tensión "VS".
       * Circuito TX: resonancia serie.
8
Ŷ
       * Circuito RX: resonancia serie.
2
% Para este análisis se han supuesto condiciones de resonancia tanto para
% el circuitos transmisor como para el circuito receptor, de forma que:
2
%
   -> Resonancia en el transimisor.
8
       * j*w0*L TX = -1/(j/w0*C TX).
2
8
   -> Resonancia en el receptor.
       * j*w0*L RX = -j*imag{ZMN}
8
8
   -> Topología del sistema:
8
8
       * Alimentación: Fuente de tensión "VS".
8
       * Circuito TX: resonancia serie.
       * Circuito RX: resonancia serie.
8
2
% El sistema WPDT está basado en una configuración de dos bobinas acopladas
% mediante enlace inductivo.
2 -
                                 _____
% Relación de parámetros de interés:
%
8
8
    -> w0: frecuencia angular de resonancia del sistema WPDT (rad/s).
2
90
    -> QLX: factor de calidad de la bobina transmisora (-).
8
       * QLX = (w*L TX)/R TX
8
           + L TX: autoinductancia de la bobina transmisora (H).
8
           + R_TX: resistencia parásita de la bobina transmisora (H).
8
    -> QRX: factor de calidad de la bobina receptora (-).
8
8
       * QRX = (w*L RX)/R RX
           + L RX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
2
           + R RX: resistencia parásita de la bobina receptora (H).
8
8
    -> QL: factor de calidad del circuito receptor (-).
2
       * QL = (w*L RX) / real{ZMN}
           + L RX: autoinductancia de la bobina receptora (H).
8
8
           + ZMN: impedancia de entrada del circuito receptor.
8
    -> K TX RX: factor de acoplo entre las bobinas transmisora y receptora
8
       en el sistema de WPDT (-).
8
8
%
    -> EFF LINK: eficiencia del enlace WPDT (-).
8
8
    -> EFF LTX: eficiencia de la bobina transmisora (-).
2
8
    -> EFF LRX: eficiencia de la bobina receptora (-).
8
    -> PMN OBJ: potencia objetivo que transmistir al circuito RX (W).
8
```

8

\_\_\_\_\_ % \_\_\_\_ % Referencias bibliográficas <u>ې</u> % Las ecuaciones y modelos utilizados en este programa se han obtenido de % las referencias seguientes: 2 % [1] P. Perez-Nicoli, "Inductive Links for Wireless Power Transfer: Fundamental Concepts for Designing High-efficiency Wireless Power 2 Transfer Links", Springer Nature Switzerland AG, 2021. 2 % [2] G.B. Hmida, "Design of Wireless Power Data Transfer Circuits for Implantable Bio-Micro System", Biotechnology, vol. 6, num. 2, 2 8 pp. 153-164, February 2007. 2 응} % % Víctor López Pérez. % Jose Ángel Miguel Díaz. % Universidad de Cantabria 2021. ۶ ۲ § \_\_\_\_\_ % INICIALIZACIÓN DEL PROGRAMA. 8 \_\_\_\_\_ clc; clear all; close all; <u>%</u> % SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL INICIO DEL PROGRAMA. % \_\_\_\_\_ disp('-----'); disp('Ejecutando "COMPARATIVA\_MEP\_VS\_MPP\_01.m"'); disp('=========='); <u>%</u> % OBJETIVOS DE DISEÑO. 8 \_\_\_\_\_ % Potencia objetivo que transmistir al circuito receptor (W). PMN OBJ=500E-3; х \_\_\_\_\_ % DEFINICIÓN DE PARÁMETROS INICIALES. % = \_\_\_\_\_ % Frecuencia de resonancia del enlace inductivo (Hz). f0=13.56E6; % Frecuencia angular de resonancia del enlace inductivo (rad/s). w0=2\*pi\*f0; % Resistencia de pérdidas de la bobina transmisora (Ohm). R TX=5; % Resistencia de pérdidas de la bobina receptora (Ohm). R RX=5; % Factor de calidad de la bobina transmisora (-). Q TX=200; % Factor de calidad de la bobina receptora (-). Q RX=200;

```
% Amplitud de fuente de señal de tensión (V).
VS=5;
% Factor de acoplo entre las bobinas del sistema (-).
K TX RX=0.05;
۶. _____
% CÁLCULO DE VALORES DE INDUCTANCIAS DEL TRANSMISOR Y DEL RECEPTOR.
§ _____
% Autoinductancia de la bobina transmisora (H).
\% -> QTX = (w*LTX)/RTX
L TX=Q TX*R TX/w0;
% Autoinductancia de la bobina receptora (H).
% \rightarrow QRX = (w*LRX)/RRX
L RX=Q RX*R RX/w0;
% Inductancia mútua debida al acoplo entre las bobinas (H).
 -> K TX RX = M TX RX/sqrt(LTX*LRX)
M_TX_RX=K_TX_RX*sqrt(L_TX*L_RX);
٥<u>٢</u>
% DISEÑO DE CIRCUITO PARA OBTENER EL PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA (MEP).
ç
%
% Factor de calidad óptimo de la carga (-).
8{
  -> Maximizar la eficiencia de transferencia de potencia del sistema.
8
      -> der(EFF_LINK)/der(QL) = 0 <---> QL_MEP
8
8
8
   -> QL_MEP = Q_RX/sqrt(((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX+1)
응 }
∞
QL_MEP=Q_RX/sqrt(((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX+1);
2
% Resistencia de entrada óptima del circuito receptor (Ohm).
응 {
   -> Definición del factor de calidad de la carga.
8
00
      -> QL = w0*L RX/real{ZMN}
      -> real{ZMN} = w0*L RX/QL
8
8
  -> real{ZMN} MEP = R RX*sqrt(((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX+1)
8
8}
de _____
\label{eq:meal_matrix} \texttt{realZMN}\_\texttt{MEP=R}\_\texttt{RX*sqrt(((K}\_\texttt{TX}\_\texttt{RX})^2)*\texttt{Q}\_\texttt{TX*Q}\_\texttt{RX+1});
%
% Eficiencia de transmisión de potencia del circuito (-).
8{
   -> Definición de eficiencia de transmisión de potencia del enlace.
8
      -> EFF LINK = (Q RX/(Q RX+QL))*((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX*QL/...
8
                 (((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX*QL+Q RX+QL)
2
2
   -> Analizando la eficiencia para el punto MEP.
8
      -> EFF LINK MEP @ QL MEP
8
8
      -> EFF LINK MEP = ((K TX RX^2)*Q TX*Q RX)/...
8
                    (sqrt(((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX+1)+1)^2
8}
8 -
EFF_LINK_MEP=((K_TX_RX^2)*Q_TX*Q_RX)/...
   (sqrt(((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX+1)+1)^2;
```

```
۶۶ _____
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
8{
2
   -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + j*w0*L RX + ZMN)
8
8
   -> Condición de resonancia:
      \rightarrow j*w0*L_RX = -j*imag{ZMN}
8
8
      \rightarrow ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + real{ZMN})
8}
% -----
ZREF_MEP=((w0*M_TX_RX)^2)./(R_RX+realZMN_MEP);
8 ------
% Impedancia vista por la fuente de entrada del circuito (Ohm).
8{
   -> ZS = 1/(j*w0*C TX) + R TX + j*w0*L RX + ZREF
8
8
  -> Condición de resonancia:
8
8
     -> j*w0*L TX = -1/(j*w0*C TX)
      -> ZS = R TX + ZREF
2
8}
8 -----
ZS_MEP=R_TX+ZREF_MEP;
∞ _____
% Eficiencia de la bobina receptora (-).
8{
   -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
8
   -> P_ZMN = (1/2)*real{V_MN*I_MN'}
= (1/2)*real{(I_RX*ZMN)*I_RX'}
8
8
          = (1/2) * (I RX^{2}) * real {ZMN}
8
8
00
   -> P RRX = (1/2) *real{V RRX*I RRX'}
          = (1/2) *real{(I RX*R RX)*I RX'}
8
          = (1/2) * (I_RX^2) * R_RX
%
%
   -> EFF_RX = P_ZMN/(P ZMN + P RX)
8
8
           = real{ZMN}/(R_RX+real{ZMN})
응 }
EFF_RX_MEP=realZMN_MEP./(R_RX+realZMN_MEP);
%
\% Eficiencia de la bobina transmisora (-).
8{
8
8
   -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
8
   -> P ZREF = (1/2) *real{V ZREF*I ZREF'}
8
           = (1/2) *real{(I_TX*ZREF) *I_TX'}
8
8
           = (1/2)*(I TX^2)*real{ZREF}
8
÷
   \rightarrow P RTX = (1/2) *real{V RTX*I RTX'}
8
          = (1/2) *real{ (I TX*R TX) *I TX'}
8
          = (1/2) * (I_TX^2) *R_TX
8
   -> EFF_TX = P_ZREF/(P_ZREF + P TX)
%
           = real{ZREF}/(R RX+real{ZREF})
2
8
8}
8 -
       _____
EFF TX MEP=real(ZREF MEP)./(R TX+real(ZREF MEP));
8 --
% Potencia entregada al circuito receptor (W).
응 {
```

```
-> Considerando la condición impuesta de tensión "VS" dada.
8
      -> PMN MEP @ QL MEP, VS
8
8
      -> PMN_MEP = ((VS^2)/2*R_TX)*((K_TX_RX^2)*Q_TX*(Q_RX^2)*QL_MEP)/...
8
                ((K TX RX^2)*Q TX*Q RX*QL MEP+Q RX+QL MEP)^2
응}
8 -
PMN_MEP=((VS^2)/(2*R_TX))*((K_TX_RX^2)*Q_TX*(Q_RX^2)*QL_MEP)/...
   (((K_TX_RX^2)*Q_TX*Q_RX*QL_MEP+Q_RX+QL_MEP)^2);
<u>&</u>
% Potencia entregada al circuito transmisor (W).
8{
90
   -> Considerando la condición impuesta de tensión "VS" dada.
2
      -> PTX MEP @ QL MEP, VS
      \rightarrow PTX MEP = (1/2) *real{VS*IS'}
8
               = (1/2) *real {VS*VS'/ZS'}
2
               = (1/2) *real {VS*VS'*ZS/(ZS*ZS') }
8
               = (1/2) * (VS^2) * real { ZS } / (abs (ZS)^2)
8
응}
8 _____
      _____
PTX MEP=(1/2)*(abs(VS)^2)*(1/(abs(ZS MEP)^2))*real(ZS MEP);
8 -----
% Tensión de entrada mínima para satisfacer condición de "PMN" (V).
8{
8
   -> Considerando la condición impuesta de "PMN" objetivo.
90
      -> VS @ QL MEP, PMN OBJ
      -> VS OBJ MEP = sqrt (2*R TX*PMN OBJ*...
8
                   (((K_TX_RX^2)*Q_TX*Q_RX*QL_MEP+Q_RX+QL_MEP)^2)/...
8
                   ((K_TX_RX^2)*Q_TX*(Q_RX^2)*QL_MEP))
8
8
응}
8.
VS OBJ MEP=sqrt(2*R TX*PMN OBJ*...
   (((K_TX_RX^2)*Q_TX*Q_RX*QL_MEP+Q_RX+QL_MEP)^2)/...
   ((K_TX_RX^2)*Q_TX*(Q_RX^2)*QL MEP));
8 -----
% DISEÑO DE CIRCUITO PARA OBTENER EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPP).
% _____
% Factor de calidad óptimo de la carga (-).
8{
8
   -> Maximizar la potencia entregada al circuito receptor.
     -> der(PMN)/der(QL) = 0 <---> QL_MPP
8
8
8
   -> QL MPP = Q RX/(((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX+1)
8}
8
 _____
QL_MPP=Q_RX/(((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX+1);
ok _____
% Resistencia de entrada óptima del circuito receptor (Ohm).
8{
8
   -> Definición del factor de calidad del circuito receptor.
     \rightarrow QL = w0*L RX/real{ZMN}
00
      -> real{ZMN} = w0*L RX/QL
8
8
8
   -> real{ZMN} MPP = R RX*(((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX+1)
8}
\label{eq:main_mp} \texttt{realZMN}_\texttt{MPP=R}_\texttt{RX*} (((\texttt{K}_\texttt{TX}_\texttt{RX})^2)*\texttt{Q}_\texttt{TX*}\texttt{Q}_\texttt{RX+}1);
%
```

```
% Eficiencia de transmisión de potencia del circuito (-).
8 {
8
   -> Definición de eficiencia de transmisión de potencia del enlace.
      -> EFF LINK = (Q RX/(Q RX+QL))*((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX*QL/...
8
                  (((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX*QL+Q RX+QL)
00
÷
8
   -> Analizando la eficiencia para el punto MPP.
      -> EFF_LINK_MPP @ QL_MPP
8
응}
ç_____
EFF_LINK_MPP=(Q_RX/(Q_RX+QL_MPP))*((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX*QL_MPP/...
   (((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX*QL_MPP+Q_RX+QL_MPP);
% ____
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
8{
   -> ZREF = ((w0*M)^2) / (R RX + j*w0*L RX + ZMN)
8
8
8
   -> Condición de resonancia:
8
      \rightarrow j*w0*L RX = -j*imag{ZMN}
      -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R_RX + real{ZMN})
2
8}
% _____
                                     _____
ZREF_MPP=((w0*M_TX_RX)^2)./(R_RX+realZMN_MPP);
de _____
% Impedancia vista por la fuente de entrada del circuito (Ohm).
8{
   -> ZS = 1/(j*w0*C TX) + R TX + j*w0*L RX + ZREF
8
8
8
   -> Condición de resonancia:
      -> j*w0*L TX = -1/(j*w0*C TX)
8
      -> ZS = R TX + ZREF
8
8}
%
ZS MPP=R TX+ZREF MPP;
٥٤ _____
% Eficiencia de la bobina receptora (-).
8 {
   -> EFF RX = P_ZMN/(P_ZMN + P_RX)
8
8
   -> P ZMN = (1/2) *real{V MN*I MN'}
8
           = (1/2) *real{ (I RX*ZMN) *I RX'}
8
%
           = (1/2)*(I RX^2)*real{ZMN}
2
   -> P RRX = (1/2) *real{V RRX*I RRX'}
8
           = (1/2) *real { (I RX*R RX) * I RX' }
2
           = (1/2) * (I RX^2) * R RX
8
8
  -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
8
           = real{ZMN}/(R_RX+real{ZMN})
8}
%
EFF_RX_MPP=realZMN_MPP./(R_RX+realZMN_MPP);
§ _____
% Eficiencia de la bobina transmisora (-).
8{
8
8
   -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
8
8
   -> P_ZREF = (1/2) *real{V_ZREF*I_ZREF'}
8
           = (1/2) *real{(I TX*ZREF) *I TX'}
           = (1/2) * (I TX^{2}) * real {ZREF}
%
÷
8
   -> P_RTX = (1/2) *real{V_RTX*I_RTX'}
8
           = (1/2) *real{(I_TX*R_TX) *I_TX'}
```

```
8
          = (1/2) * (I TX^2) *R TX
8
8
   -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
%
          = real{ZREF}/(R RX+real{ZREF})
8
8}
%
EFF_TX_MPP=real(ZREF_MPP)./(R_TX+real(ZREF_MPP));
& _____
                                      _____
% Potencia entregada al circuito receptor (W).
81
2
   -> Considerando la condición impuesta de tensión "VS" dada.
2
      -> PMN MPP @ QL MPP, VS
      -> PMN MPP = ((VS^2)/2*R TX)*((K TX RX^2)*Q TX*(Q RX^2)*QL MPP)/...
8
2
                ((K TX RX^2)*Q TX*Q RX*QL MPP+Q RX+QL MPP)^2
응}
% _____
PMN MPP=((VS^2)/(2*R TX))*((K TX RX^2)*Q TX*(Q RX^2)*QL MPP)/...
   (((K TX RX^2)*Q TX*Q RX*QL MPP+Q RX+QL MPP)^2);
§ _____
% Potencia entregada al circuito transmisor (W).
응 {
8
   -> Considerando la condición impuesta de tensión "VS" dada.
      -> PTX MPP @ QL MPP, VS
8
00
      \rightarrow PTX MPP = (1/2) *real{VS*IS'}
               = (1/2) *real{VS*VS'/ZS MPP'}
8
               = (1/2) *real{VS*VS'*ZS MPP/(ZS MPP*ZS MPP')}
8
               = (1/2) * (VS^2) * real {ZS_MPP} / (abs (ZS_MPP)^2)
2
8}
  _____
8 -
PTX MPP=(1/2) * (abs(VS)^2) * (1/(abs(ZS MPP)^2)) * real(ZS MPP);
%
% Tensión de entrada mínima para satisfacer condición de "PMN" (V).
응 {
   -> Considerando la condición impuesta de "PMN" objetivo.
8
8
      -> VS @ QL MPP, PMN OBJ
      -> VS OBJ MPP = sqrt(2*R TX*PMN OBJ*...
8
                   (((K_TX_RX^2)*Q_TX*Q_RX*QL_MPP+Q_RX+QL_MPP)^2)/...
8
                   ((K TX RX^2)*Q TX*(Q RX^2)*QL MPP))
8
2
8}
      _____
2 -
VS OBJ MPP=sqrt(2*R TX*PMN OBJ*...
   (((K_TX_RX^2)*Q_TX*Q_RX*QL_MPP+Q_RX+QL_MPP)^2)/...
((K_TX_RX^2)*Q_TX*(Q_RX^2)*QL_MPP));
8 -----
% COMPARATIVA MEP VS. MPP.
<u>%</u>
% Análisis de la influencia del valor de la parte real de la impedancia de
% entrada del circuito receptor sobre los valores de eficiencia y potencia
% máxima transmitida al receptor por parte del sistema.
```

% puede considerarse independiente de la impedancia reflejada por el % receptor en el transmisor; siendo así no influenciado por el valor

```
de la parte real de la impedancia del receptor.
8
2
8
   -> Por tanto:
Ŷ
        -> K TX RX << 1
        -> ZREF = (w0^2)*(k^2)*L TX*L RX/(R RX + real{ZMN})
%
        \rightarrow ZS = R TX + ZREF \sim = RTX
÷
        -> R TX >> ZREF <---> ZS ~= RTX
8
        -> PTX = (1/2) *real{VS*IS'}
8
8
              = (1/2) *real {VS*VS'/ZS'}
              = (1/2) (abs(VS)^2)/R TX
8
2
8}
%
% Barrido de valores de parte real de impedancia de entrada del circuito
\% receptor a considerar en la comparativa (Ohm).
% ____
      _____
                                     _____
realZMN INI=min(realZMN MEP, realZMN MPP)-...
  min(realZMN MEP,realZMN MPP)*(75/100);
realZMN END=max(realZMN MEP, realZMN MPP)+...
  max(realZMN MEP, realZMN_MPP)*(10/100);
realZMN PTOS=50\overline{0};
realZMN VECTOR=linspace(realZMN INI,realZMN END,realZMN PTOS);
                                           _____
% Factor de calidad del circuito receptor (-).
응 {
   -> Definición del factor de calidad del circuito receptor.
8
8
      \rightarrow QL = w0*L RX/real{ZMN}
8}
%
QL VECTOR=w0*L RX./realZMN VECTOR;
%
% Valor de la eficiencia de transferencia de potencia (-).
8 {
8
   -> Definición de eficiencia de transmisión de potencia del enlace.
      -> EFF LINK = (Q RX/(Q RX+QL))*((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX*QL/...
8
                 (((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX*QL+Q_RX+QL)
8
응}
9
EFF_LINK_VECTOR=(Q_RX./(Q_RX+QL_VECTOR))*((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX.*...
   QL VECTOR./...
   (((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX*QL_VECTOR+Q_RX+QL_VECTOR);
_____
% Valor de la potencia transmitida al circuito receptor (-).
8{
8
   -> Definición de potencia entregada al circuito receptor.
     -> PMN = ((VS^2)/2*R TX)*((K TX RX^2)*Q TX*(Q RX^2)*QL)/...
8
8
             ((K_TX_RX^2)*Q_TX*Q_RX*QL+Q_RX+QL)^2
8}
×
PMN VECTOR=((VS^2)/(2*R TX))*((K TX RX^2)*Q TX*(Q RX^2)*QL VECTOR)./...
   (((K TX RX^2)*Q TX*Q RX*QL VECTOR+Q RX+QL VECTOR).^2);
% _____
% ESTUDIO DE INFLUENCIA DEL FACTOR DE ACOPLO SOBRE EL PUNTO DE MEP.
% _____
```

% Análisis de la influencia del valor del factor de acoplo entre las % bobinas sobre el punto de máxima eficiencia (MEP), representando por su % valor óptimo correspondiente de la parte real de la impedancia de

% entrada del circuito receptor.

```
%
% Barrido de valores del factor de acoplo entre bobinas (-).
K TX RX INI=-5;
K TX RX END=-1;
K TX RX PTOS=100;
K_TX_RX_VECTOR=logspace(K_TX_RX_INI,K_TX_RX_END,K_TX_RX_PTOS);
% Inductancia mútua debida al acoplo entre las bobinas (H).
06
                                         _____
8{
2
  -> K TX RX = M TX RX/sqrt(LTX*LRX)
8}
M TX RX VECTOR=K TX RX VECTOR*sqrt(L TX*L RX);
olo
% Factor de calidad óptimo de la carga (-).
8 {
8
   -> Maximizar la eficiencia de transferencia de potencia del sistema.
     -> der(EFF LINK)/der(QL) = 0 <---> QL MEP
8
8
 -> QL_MEP = Q_RX/sqrt(((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX+1)
8
8}
8.
QL MEP K=Q RX./sqrt(((K TX RX VECTOR).^2)*Q TX*Q RX+1);
%
% Resistencia de entrada óptima del circuito receptor (Ohm).
응 {
00
   -> Definición del factor de calidad de la carga.
     -> QL = w0*L RX/real{ZMN}
8
8
     -> real{ZMN} = w0*L RX/QL
8
8
  -> real{ZMN} MEP = R RX*sqrt(((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX+1)
8}
%
realZMN_MEP_K=R_RX*sqrt(((K_TX_RX_VECTOR).^2)*Q_TX*Q_RX+1);
<u>§</u>
% Eficiencia de transmisión de potencia del circuito (-).
81
   -> Definición de eficiencia de transmisión de potencia del enlace.
2
     -> EFF LINK = (Q RX/(Q RX+QL))*((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX*QL/...
8
               (((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX*QL+Q_RX+QL)
8
90
8
  -> Analizando la eficiencia para el punto MEP.
     -> EFF LINK MEP @ QL MEP
8
     -> EFF LINK MEP = ((K TX RX^2)*Q TX*Q RX)/...
8
                  (sqrt(((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX+1)+1)^2
8
8}
% -
      _____
EFF LINK MEP K=((K TX RX VECTOR.^2)*Q TX*Q RX)./...
   (sqrt(((K_TX_RX_VECTOR).^2)*Q_TX*Q_RX+1)+1).^2;
op
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
응 {
8
   -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + j*w0*L RX + ZMN)
2
 -> Condición de resonancia:
8
    \rightarrow j*w0*L RX = -j*imag{ZMN}
8
8
     \rightarrow ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + real{ZMN})
8}
ç.
ZREF MEP K=((w0*M TX RX VECTOR).^2)./(R RX+realZMN MEP K);
%
```

```
% Impedancia vista por la fuente de entrada del circuito (Ohm).
8 {
   -> ZS = 1/(j*w0*C TX) + R TX + j*w0*L RX + ZREF
8
8
8
   -> Condición de resonancia:
      -> j*w0*L TX = -1/(j*w0*C TX)
8
2
       -> ZS = R_TX + ZREF
8}
% -
                              _____
ZS_MEP_K=R_TX+ZREF_MEP_K;
8 -
                                   _____
% Eficiencia de la bobina receptora (-).
8{
8
   -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
%
   -> P ZMN = (1/2) *real{V MN*I MN'}
8
           = (1/2) *real{(I_RX*ZMN) *I_RX'}
8
            = (1/2) * (I RX^{2}) * real {ZMN}
8
8
   -> P RRX = (1/2) *real{V RRX*I RRX'}
8
            = (1/2) *real{(I RX*R RX) *I RX'}
8
8
            = (1/2) * (I RX^2) * R RX
8
8
  -> EFF_RX = P_ZMN/(P_ZMN + P_RX)
            = real{ZMN}/(R RX+real{ZMN})
8
8}
∞
EFF_RX_MEP_K=realZMN_MEP_K./(R_RX+realZMN_MEP_K);
8
                                     _____
% Eficiencia de la bobina transmisora (-).
8{
8
8
   -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
8
   -> P_ZREF = (1/2) *real{V_ZREF*I_ZREF'}
8
            = (1/2) *real{(I TX*ZREF) *I TX'}
÷
            = (1/2)*(I TX^2)*real{ZREF}
8
   -> P_RTX = (1/2) *real{V_RTX*I_RTX'}
= (1/2) *real{(I_TX*R_TX)*I_TX'}
8
8
            = (1/2)*(I_TX^2)*R_TX
2
8
  \rightarrow EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
8
2
            = real{ZREF}/(R RX+real{ZREF})
8
응}
% -
                                                _____
        _____
EFF TX MEP K=real(ZREF MEP K)./(R TX+real(ZREF MEP K));
% --
% Potencia entregada al circuito receptor (W).
8 {
8
   -> Considerando la condición impuesta de tensión "VS" dada.
%
      -> PMN MEP @ QL MEP, VS
       -> PMN_MEP = ((VS^2)/2*R_TX)*((K_TX_RX^2)*Q_TX*(Q_RX^2)*QL_MEP)/...
8
                   ((K_TX_RX^2)*Q_TX*Q_RX*QL_MEP+Q_RX+QL_MEP)^2
8
응}
2
PMN MEP K=((VS^2)/(2*R TX))*((K TX RX VECTOR.^2)*Q TX*...
    (Q RX^2).*QL MEP K)./...
    (((K_TX_RX_VECTOR.^2)*Q_TX*Q_RX.*QL_MEP_K+Q_RX+QL_MEP_K).^2);
%
% Potencia entregada al circuito transmisor (W).
응 {
8
  -> Considerando la condición impuesta de tensión "VS" dada.
```

```
PÁGINA 283 DE 323
```

```
-> PTX MEP @ QL MEP, VS
8
2
      -> PTX MEP = (1/2) *real{VS*IS'}
8
              = (1/2) *real {VS*VS'/ZS'}
              = (1/2) *real {VS*VS'*ZS/(ZS*ZS') }
%
               = (1/2) * (VS^2) * real {ZS} / (abs (ZS)^2)
8
8}
% -
                                                    _____
PTX_MEP_K=(1/2)*(abs(VS)^2)*(1./(abs(ZS_MEP_K).^2)).*real(ZS_MEP_K);
<u>%</u>
% ESTUDIO DE INFLUENCIA DEL FACTOR DE ACOPLO SOBRE EL PUNTO DE MPP.
8 _____
% Análisis de la influencia del valor del factor de acoplo entre las
% bobinas sobre el punto de máxima potencia (MPP), representando por su
% valor óptimo correspondiente de la parte real de la impedancia de
% entrada del circuito receptor.
% Barrido de valores del factor de acoplo entre bobinas (-).
8 --
K TX RX INI=-5;
K_TX_RX_END=-1;
K_TX_RX_PTOS=100;
K TX RX VECTOR=logspace(K TX RX INI,K TX RX END,K TX RX PTOS);
%
% Inductancia mútua debida al acoplo entre las bobinas (H).
2 -
81
   -> K TX RX = M TX RX/sqrt(LTX*LRX)
8
8}
M TX RX VECTOR=K TX RX VECTOR*sqrt(L TX*L RX);
% _____
                                   _____
% Factor de calidad óptimo de la carga (-).
응 {
8
   -> Maximizar la potencia entregada al circuito receptor.
8
      -> der(PMN)/der(QL) = 0 <---> QL MPP
%
8
   -> QL MPP = Q RX/(((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX+1)
8}
% _
        _____
QL_MPP_K=Q_RX./(((K_TX_RX_VECTOR).^2)*Q_TX*Q_RX+1);
∞
% Resistencia de entrada óptima del circuito receptor (Ohm).
8{
   -> Definición del factor de calidad del circuito receptor.
8
8
     -> QL = w0*L RX/real{ZMN}
8
      -> real{ZMN} = w0*L_RX/QL
8
   -> real{ZMN}_MPP = R_RX*(((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX+1)
2
8}
8 -----
realZMN_MPP_K=R_RX*(((K_TX_RX_VECTOR).^2)*Q_TX*Q_RX+1);
%
% Eficiencia de transmisión de potencia del circuito (-).
81
   -> Definición de eficiencia de transmisión de potencia del enlace.
8
      -> EFF_LINK = (Q_RX/(Q_RX+QL))*((K_TX_RX)^2)*Q_TX*Q_RX*QL/...
8
                 (((K TX RX)^2)*Q TX*Q RX*QL+Q RX+QL)
8
8
8
  -> Analizando la eficiencia para el punto MPP.
8
      -> EFF_LINK_MPP @ QL_MPP
8}
```

```
% _____
                     _____
EFF_LINK_MPP_K=(Q_RX./(Q_RX+QL_MPP_K)).*((K_TX_RX_VECTOR).^2)*...
   Q TX*Q RX.*QL MPP K./...
   (((K TX RX VECTOR).^2)*Q TX*Q RX.*QL MPP K+Q RX+QL MPP K);
ofe
% Impedancia reflejada por el circuito receptor en el transmisor (Ohm).
응 {
8
   -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + j*w0*L RX + ZMN)
8
   -> Condición de resonancia:
8
     \rightarrow j*w0*L RX = -j*imag{ZMN}
8
2
      -> ZREF = ((w0*M)^2)/(R RX + real{ZMN})
8}
2 -
ZREF MPP K=((w0*M TX RX VECTOR).^2)./(R RX+realZMN MPP K);
op
% Impedancia vista por la fuente de entrada del circuito (Ohm).
8{
   -> ZS = 1/(j*w0*C TX) + R TX + j*w0*L RX + ZREF
00
8
  -> Condición de resonancia:
8
      -> j*w0*L_TX = -1/(j*w0*C_TX)
2
8
      -> ZS = R TX + ZREF
8}
                        _____
2 -
                                            _____
ZS_MPP_K=R_TX+ZREF_MPP_K;
2 -
% Eficiencia de la bobina receptora (-).
8{
   -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
8
8
   -> P ZMN = (1/2) *real{V MN*I MN'}
          = (1/2) *real{ (I RX*ZMN) *I RX'}
8
           = (1/2) * (I RX^{2}) * real {ZMN}
2
0
   -> P RRX = (1/2) *real{V RRX*I RRX'}
8
8
           = (1/2) *real{(I_RX*R_RX)*I_RX'}
           = (1/2) * (I_RX^2) * R_RX
8
8
  -> EFF RX = P ZMN/(P ZMN + P RX)
8
8
          = real{ZMN}/(R_RX+real{ZMN})
응 }
ok
EFF_RX_MPP_K=realZMN_MPP_K./(R_RX+realZMN_MPP_K);
§ _____
                                    _____
% Eficiencia de la bobina transmisora (-).
응 {
8
90
   -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
8
8
   -> P ZREF = (1/2) *real{V ZREF*I ZREF'}
8
           = (1/2) *real{(I TX*ZREF) *I TX'}
           = (1/2)*(I_TX^2)*real{ZREF}
8
8
   -> P RTX = (1/2) *real{V RTX*I RTX'}
8
           = (1/2) *real{(I TX*R TX)*I TX'}
8
           = (1/2) * (I TX^{2}) * R TX
8
8
8
   -> EFF TX = P ZREF/(P ZREF + P TX)
           = real{ZREF}/(R RX+real{ZREF})
8
8
8}
% _
      _____
EFF_TX_MPP_K=real(ZREF_MPP_K)./(R_TX+real(ZREF_MPP_K));
```

```
۶۶ _____
% Potencia entregada al circuito receptor (W).
8{
8
   -> Considerando la condición impuesta de tensión "VS" dada.
8
      -> PMN MPP @ QL MPP, VS
      -> PMN_MPP = ((VS^2)/2*R_TX)*((K_TX_RX^2)*Q_TX*(Q_RX^2)*QL_MPP)/...
2
                 ((K_TX_RX^2)*Q_TX*Q_RX*QL_MPP+Q_RX+QL_MPP)^2
2
8}
ç_____
PMN_MPP_K=((VS^2)/(2*R_TX))*((K_TX_RX_VECTOR.^2)*Q_TX*...
   (Q RX^2).*QL MPP K)./...
   (((K_TX_RX_VECTOR.^2)*Q_TX*Q_RX.*QL_MPP_K+Q_RX+QL_MPP_K).^2);
% ____
                                               _____
% Potencia entregada al circuito transmisor (W).
8{
8
   -> Considerando la condición impuesta de tensión "VS" dada.
8
      -> PTX MPP @ QL MPP, VS
8
      \rightarrow PTX MPP = (1/2) *real{VS*IS'}
               = (1/2) *real{VS*VS'/ZS MPP'}
8
               = (1/2) *real {VS*VS'*ZS MPP/(ZS MPP*ZS MPP') }
8
               = (1/2)*(VS^2)*real{ZS_MPP}/(abs(ZS_MPP)^2)
8
8}
8 -
        _____
PTX MPP K=(1/2)*(abs(VS)^2)*(1./(abs(ZS MPP K).^2)).*real(ZS MPP K);
```

```
§ _____
% PRESENTACIÓN DE DATOS POR PANTALLA.
% _____
% Impresión de resultados del programa por pantalla.
disp(' ');
disp('---
                                             -----');
disp('PARÁMETROS INICIALES DEL PROGRAMA');
disp('-----');
disp(' ');
fprintf('-> Topología de circuito transmisor. \n');
fprintf('\t -> Circuito resonante serie. \n');
disp(' ');
fprintf('-> Topología de circuito receptor. \n');
fprintf('\t -> Circuito resonante serie. \n');
disp(' ');
fprintf('-> Condición de resonancia en el circuito transmisor. \n');
fprintf(' \mid -> j*w0*LTX = -1/(j*w0*CTX) \mid n');
disp(' ');
fprintf('-> Condición de resonancia en el circuito receptor. \n');
fprintf(' \mid -> j*w0*LRX = -j*imag{ZMN} \mid n');
disp(' ');
fprintf('-> Relación de frecuencias de operación evaluadas. \n');
fprintf('t \rightarrow f0 = %g MHz \n', f0*1E-6);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de acoplo evaluados. \n');
fprintf('\t -> K TX RX = %g \n',K TX RX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de factores de calidad evaluados. \n');
fprintf('t \rightarrow QTX = %g \n', Q_TX);
fprintf(' \ -> QRX = %g \ n', QRX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de pérdidas asociadas a las bobinas. \n');
fprintf(' \to RTX = %g Ohm \n', R_TX);
fprintf('\t -> RRX = %g Ohm \n', R RX);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de autoinductancias de las bobinas. \n');
fprintf('\t -> LTX = %g uH \n',L_TX*1E6);
fprintf('t \rightarrow LRX = %g uH \n', LRX*1E6);
```

```
disp(' ');
fprintf('-> Tensión de entrada del circuito transmisor. \n');
fprintf(' \ -> VS = \&q V \ n', VS);
disp(' ');
fprintf('-> Relación de potencias objetivo en el circuito receptor. \n');
fprintf('\t -> PMN OBJ = %g mW \n', PMN OBJ*1E3);
disp(' ');
disp(' ');
disp('----
           -----');
disp('DISEÑO PARA ALCANZAR EL PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA (MEP)');
disp('-----');
disp(' ');
fprintf('-> Eficiencia de la bobina transmisora. \n');
fprintf('t \rightarrow EFF LTX = %g %% \n', EFF TX MEP*100);
disp(' ');
fprintf('-> Eficiencia de la bobina receptora. \n');
fprintf('t \rightarrow EFF LRX = %g %% n', EFF RX MEP*100);
disp(' ');
fprintf('-> Eficiencia de transferencia de potencia. \n');
fprintf('\t -> EFF LINK = %q %% \n',EFF LINK MEP*100);
disp(' ');
fprintf('-> Impedancia del circuito receptor para máxima eficiencia. \n');
fprintf('\t -> real{ZMN} = %g Ohm \n', realZMN MEP);
disp(' ');
fprintf('-> Factor de calidad del circuito receptor. \n');
fprintf('\t -> QL = %g \n',QL_MEP);
disp(' ');
fprintf('-> Impedancia reflejada por el receptor al transmisor. \n');
fprintf('\t -> R RX TX = %g Ohm \n',ZREF MEP);
disp(' ');
fprintf('-> Impedancia de entrada del circuito transmisor. \n');
fprintf('\t -> ZS = %g Ohm \n',ZS_MEP);
disp(' ');
fprintf(strcat('-> Potencia entregada al circuito receptor para',32,...
   'una tensión de entrada dada. \n'));
fprintf('\t -> VS = %g V \n',VS);
fprintf('\t -> PMN = %g mW \n', PMN MEP*1E3);
disp(' ');
fprintf(strcat('-> Potencia entregada al circuito transmisor para', 32,...
    'una tensión de entrada dada. \n'));
fprintf('t \rightarrow VS = %g V (n',VS);
fprintf('\t -> PTX = %g mW \n',PTX MEP*1E3);
disp(' ');
fprintf(strcat('-> Tensión de entrada mínima para alcanzar la',32,...
   'potencia objetivo entregada al receptor. \n'));
fprintf('\t -> PMN_OBJ = %g mW \n', PMN_OBJ*1E3);
fprintf(' \to VS MIN = %q V \ N', VS OBJ MEP);
disp(' ');
disp(' ');
disp('-----
               -----');
disp('DISEÑO PARA ALCANZAR EL PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA (MPP)');
disp('-----
                                                               ----'):
disp(' ');
fprintf('-> Eficiencia de la bobina transmisora. \n');
fprintf('\t -> EFF_LTX = %g %% \n',EFF_TX_MPP*100);
disp(' ');
fprintf('-> Eficiencia de la bobina receptora. \n');
fprintf('\t -> EFF LRX = %g %% \n',EFF RX MPP*100);
disp(' ');
fprintf('-> Eficiencia de transferencia de potencia. \n');
fprintf('\t -> EFF LINK = %q %% \n',EFF LINK MPP*100);
disp('');
fprintf('-> Impedancia del circuito receptor para máxima eficiencia. \n');
fprintf('\t -> real{ZMN} = %g Ohm \n', realZMN MPP);
disp(' ');
fprintf('-> Factor de calidad del circuito receptor. \n');
fprintf('\t -> QL = %g \n',QL_MPP);
disp(' ');
```

```
fprintf('-> Impedancia reflejada por el receptor al transmisor. \n');
fprintf('\t -> R RX TX = %g Ohm \n',ZREF MPP);
disp(' ');
fprintf('-> Impedancia de entrada del circuito transmisor. \n');
fprintf(' \to ZS = %g Ohm \n', ZS MPP);
disp(' ');
fprintf(strcat('-> Potencia entregada al circuito receptor para', 32,...
   'una tensión de entrada dada. n');
fprintf(' \ -> VS = \&g V \ n', VS);
fprintf('\t -> PMN = %g mW \n', PMN MPP*1E3);
disp(' ');
fprintf(strcat('-> Potencia entregada al circuito transmisor para', 32,...
   'una tensión de entrada dada. \n'));
fprintf('t \rightarrow VS = %g V (n',VS);
fprintf('\t -> PTX = %g mW \n',PTX MPP*1E3);
disp(' ');
fprintf(strcat('-> Tensión de entrada mínima para alcanzar la',32,...
   'potencia objetivo entregada al receptor. \n'));
fprintf('\t -> PMN_OBJ = %g mW \n', PMN OBJ*1E3);
fprintf('\t -> VS MIN = %g V \n',VS OBJ MPP);
disp(' ');
disp(' ');
§ _____
% SEÑALIZACIÓN POR PANTALLA DEL FINAL DEL PROGRAMA.
disp('-------');
disp('"COMPARATIVA_MEP_VS_MPP_01.m" terminado');
-----'):
% _____
<u>%</u>
% REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS.
۶. _____
$_____
% DEFINICIÓN DE FORMATO DE IMÁGENES.
% Tamaño de la imagen (cm).
% FIG DX=7.20;
% FIG DY=4.5;
% FIG_DX=14;
% FIG DY=6;
FIG DX=15;
FIG DY=7;
% Nombre de la imagen.
IMG01='COMPARATIVA_MEP_VS_MPP_01_01';
IMG02='COMPARATIVA_MEP_VS_MPP_01_02';
IMG03='COMPARATIVA_MEP_VS_MPP_01_03';
IMG04='COMPARATIVA MEP VS MPP 01 04';
% Formato de la imagen.
 01) FORMATO==0 <--> '.emf'
 02) FORMATO==1 <--> '.png'
2
% 03) FORMATO==2 <--> '.pdf'
FORMATO=0;
% Tamaño de marcadores en los ejes de la figura.
AXIS FONT=0.07*FIG DY;
% Tamaño de título en la figura.
TITLE FONT=0.08*FIG DY;
```
% Tamaño de etiquetas en la figura.

```
LABEL FONT=0.075*FIG DY;
% Tamaño de leyendas en la figura.
% LEYENDA FONT=10.5;
LEYENDA FONT=13;
% Tamaño de texto incluido en la figura.
TEXTO FONT=0.06*FIG DY;
§ _____
                                     _____
% GRÁFICA 01: COMPARATIVA MEP VS MPP.
% -> EFICIENCIA DEL ENLACE.
   -> POTENCIA ENTREGADA AL CIRCUITO RECEPTOR.
2
   -> FRENTE A PARTE REAL DE IMPEDANCIA DE ENTRADA DE CIRCUITO RECEPTOR.
2
  -> IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA.
2
  -> IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA.
% -----
                                                     _____
% Nombre de la figura.
FIG NAME=IMG01;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
% -> Curvas correspondientes al primer eje de ordenadas.
GRAF_NUM_01=1;
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
  -> Curvas correspondientes al primer eje de ordenadas.
X DATA 01=[];
X DATA 01(1,:)=realZMN VECTOR;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
% -> Curvas correspondientes al primer eje de ordenadas.
Y DATA 01=[];
Y DATA 01(1,:) = EFF LINK VECTOR*100;
% Número de gráficas a incluir en la figura.
% -> Curvas correspondientes al segundo eje de ordenadas.
GRAF NUM 02=1;
% Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.
   -> Curvas correspondientes al segundo eje de ordenadas.
X DATA 02=[];
X_DATA_02(1,:)=realZMN_VECTOR;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
   -> Curvas correspondientes al segundo eje de ordenadas.
8
Y DATA 02=[];
Y DATA 02(1,:)=PMN VECTOR*1E3;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE 01='linear';
Y SCALE 01='linear';
Y SCALE 02='linear';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
LIN COLOR 01=COLOR LIST(1);
LIN COLOR 02=COLOR LIST(2);
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
LIN TYPE 01=LIN LIST(1);
LIN TYPE 02=LIN LIST (2);
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
```

```
LIN WIDE 01=1.5;
LIN WIDE 02=1.5;
% Número de puntos o marcaradores a incluir en la figura.
% -> Marcadores correspondientes al primer eje de ordenadas.
POINT NUM 01=1;
% Coordenadas del eje de abscisas de los marcadores a representar.
   -> Marcadores correspondientes al primer eje de ordenadas.
POINT X 01=[];
POINT X 01=realZMN MEP;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
2
  -> Marcadores correspondientes al primer eje de ordenadas.
POINT Y 01=[];
POINT Y 01=EFF LINK MEP*100;
% Número de puntos o marcaradores a incluir en la figura.
% -> Marcadores correspondientes al segundo eje de ordenadas.
POINT NUM 02=1;
% Coordenadas del eje de abscisas de los marcadores a representar.
% -> Marcadores correspondientes al segundo eje de ordenadas.
POINT X_02=[];
POINT X 02=realZMN MPP;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
  -> Marcadores correspondientes al segundo eje de ordenadas.
POINT Y 02=[];
POINT_Y_02=PMN_MPP*1E3;
% Tipo de símbolos para la representación de marcadores.
POINT TYPE 01='x';
POINT TYPE 02='x';
% Color de símbolos para la representación de marcadores.
POINT COLOR 01={ 'k'};
POINT COLOR 02={ 'k' };
% Tamaño de símbolos para la representación de marcadores.
POINT_SIZE_01=6;
POINT SIZE 02=6;
% Textos asociados a los marcadores representados.
POINT TEXT 01={ 'MEP' };
POINT TEXT 02={ 'MPP' };
% Tamaño de fuente de extos asociados a los marcadores representados.
POINT FONT 01=TEXTO FONT;
POINT FONT 02=TEXTO FONT;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA\{1\}=...
   sprintf('$k_{T_{X}-R_{X}} ;
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
TEXTO NUM=1;
% Contenido de la leyenda a incluir en la figura.
LEYENDA DATA(1) = { '$$\eta {link}$$'};
LEYENDA DATA(2) = { '\$ P {MN} \$; '};
% Posición de la leyenda en la figura.
LEYENDA POS='Best';
% Tipo de fuente utilizada para los datos del primer eje de ordenadas.
AXIS FONT 01=AXIS FONT;
```

% Tipo de fuente utilizada para los datos del segundo eje de ordenadas. AXIS FONT 02=AXIS FONT; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA 01=[]; % Límites de representación en el primer eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA 01=[]; % Límites de representación en el segundo eje de ordenadas de la figura. YLIM\_DATA\_02=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Comparativa MEP vs. MPP'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL DATA='Impedancia real del \$\$R {X}\$\$, \$\$real\left \{ Z {MN} \right \}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)'; % Etiqueta a añadir al primer eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA 01='Eficiencia del enlace, \$\eta {link}\$ (\%)'; % Etiqueta a añadir al segundo eje de ordenadas de la figura. YLABEL\_DATA\_02='Potencia en el \$\$R\_{X}\$\$, \$P\_{MN}\$ (mW)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 2D 2021": [SALIDA] = FCN GRAFICAS 2D DOBLEY 2021 (X DATA 01, Y DATA 01, ... X DATA 02, Y DATA 02,... GRAF NUM 01, GRAF NUM 02,... X\_SCALE\_01, Y\_SCALE\_01, Y\_SCALE\_02, ..... FIG\_NAME, 1.15\*FIG\_DX, 1.2\*FIG\_DY, ... LIN COLOR 01,LIN TYPE 01,LIN WIDE 01,AXIS FONT 01,... LIN\_COLOR\_02,LIN\_TYPE\_02,LIN\_WIDE\_02,AXIS\_FONT\_01,... POINT\_NUM\_01, POINT\_X\_01, POINT\_Y\_01, ... POINT\_TYPE\_01, POINT\_COLOR\_01, POINT\_SIZE\_01, POINT\_TEXT\_01, ... POINT\_NUM\_02, POINT\_X\_02, POINT\_Y\_02, ... POINT TYPE 02, POINT COLOR 02, POINT SIZE 02, POINT TEXT 02,... POINT FONT 01, POINT FONT 02,... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA\_POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA 01, YLIM DATA 01, YLIM DATA 02,... XLABEL DATA, YLABEL DATA 01, YLABEL DATA 02, LABEL FONT, ... FIG DIB,FIG SAVE,FORMATO); oc. % GRÁFICA 02: INFLUENCIA DEL FACTOR DE ACOPLO MEP Y MPP (I). -> PARTE REAL DE IMPEDANCIA DE ENTRADA DE CIRCUITO RECEPTOR @ MEP. -> PARTE REAL DE IMPEDANCIA DE ENTRADA DE CIRCUITO RECEPTOR @ MPP -> FRENTE AL FACTOR DE ACOPLO ENTRE BOBINAS. \_\_\_\_\_ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG02; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=2; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar.

```
X DATA=[];
X_DATA(1,:)=K_TX_RX_VECTOR;
X DATA(2,:)=K TX RX VECTOR;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y_DATA(1,:)=realZMN_MEP K;
Y DATA(2,:)=realZMN MPP K;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
    LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(\overline{1}) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)</pre>
    LIN TYPE=LIN LIST (1:GRAF NUM);
else
    LIN_TYPE=cell(1,GRAF_NUM);
    LIN TYPE (1:end) = \{ '-' \};
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Número de puntos o marcaradores a incluir en la figura.
POINT NUM=0;
% Coordenadas del eje de abscisas de los marcadores a representar.
POINT X=[];
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
POINT_Y=[];
% Tipo de símbolos para la representación de marcadores.
POINT TYPE='none';
% Color de símbolos para la representación de marcadores.
POINT COLOR=[];
% Tamaño de símbolos para la representación de marcadores.
POINT SIZE=6;
% Textos asociados a los marcadores representados.
POINT TEXT=[];
% Tamaño de fuente de extos asociados a los marcadores representados.
POINT FONT=TEXTO FONT;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA\{1\}=...
    sprintf(strcat('$$R {T {X}}$$~=~%g~$$\\Omega$$;',...
     $$Q {T {X}}$$~=~%g'),R TX,Q TX);
TEXTO DATA\{2\}=...
    sprintf(strcat('$$R {R {X}}$$~=~%g~$$\\Omega$$;',...
    ' $$Q_{R_{X}}$$~=~%g'),R_RX,Q_RX);
```

% Número de elementos de texto a añadir a la figura.

TEXTO NUM=2; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA\_DATA(1)={'\$\$real\left \{ Z\_{MN\_{opt-\eta\_{link}}} \right \}\$;'}; LEYENDA DATA(2)={'\$\$real\left \{ Z\_{MN\_{opt-P\_{MN}}} \right \}\$;'}; % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Tipo de fuente utilizada para los datos del eje de ordenadas. AXIS FONT=AXIS FONT; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Influencia de factor de acoplo', 32,...  $\bar{\$} = \frac{T_{X}}{R_{X}}$ % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL\_DATA='Factor de acoplo entre bobinas, \$\$k\_{T\_{X}-R\_{X}}\$\$ (-) '; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='\$\$real\left \{ Z\_{MN\_{opt}} \right \}\$\$ (\$\$\Omega\$\$)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 2D 2021": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2D\_2021(X\_DATA, Y\_DATA, GRAF\_NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG\_NAME, FIG\_DX, FIG\_DY, ... LIN\_COLOR, LIN\_TYPE, LIN\_WIDE, AXIS\_FONT, ... POINT\_NUM, POINT\_X, POINT\_Y, ... POINT TYPE, POINT COLOR, POINT SIZE, POINT TEXT, POINT FONT, ... TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL\_DATA, YLABEL\_DATA, LABEL FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO); ok % GRÁFICA 03: INFLUENCIA DEL FACTOR DE ACOPLO SOBRE MEP Y MPP (II). % -> EFICIENCIA DEL ENLACE @ MEP. 2 -> EFICIENCIA DEL ENLACE @ MPP 2 -> FRENTE AL FACTOR DE ACOPLO ENTRE BOBINAS. §\_\_\_\_\_ % Nombre de la figura. FIG NAME=IMG03; % Número de gráficas a incluir en la figura. GRAF NUM=2; % Coordenadas del eje de abscisas de los datos a representar. X DATA=[]; X\_DATA(1,:)=K\_TX\_RX\_VECTOR;

X\_DATA(2,:)=K\_TX\_RX VECTOR;

```
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA(1,:)=EFF LINK MEP K*100;
Y DATA(2,:) = EFF LINK MPP K*100;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
        LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
        for i=1:length(K TX RX)
        LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
        end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN_LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)
        LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
        LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM);
        LIN TYPE(1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Número de puntos o marcaradores a incluir en la figura.
POINT NUM=0;
% Coordenadas del eje de abscisas de los marcadores a representar.
POINT X=[];
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
POINT Y=[];
% Tipo de símbolos para la representación de marcadores.
POINT TYPE='none';
% Color de símbolos para la representación de marcadores.
POINT COLOR=[];
% Tamaño de símbolos para la representación de marcadores.
POINT SIZE=6;
% Textos asociados a los marcadores representados.
POINT TEXT=[];
% Tamaño de fuente de extos asociados a los marcadores representados.
POINT FONT=TEXTO FONT;
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO DATA\{1\}=...
        sprintf(strcat('$$R {T {X}}$$~=~%g~$$\\Omega$$;',...
           $$Q {T {X}}$$~=~%g'),R TX,Q TX);
TEXTO DATA\{2\}=...
        sprintf(strcat('$$R {R {X}}$$~=~%g~$$\\Omega$$;',...
             \[ \] \ \[ \] \] \] \] \] \] \] \] \[ \] \] \] \] \] \] \[ \] \] \] \] \[ \] \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \] \] \[ \] \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[\] \] \[\] \] \[ \] \] \[ \] \] \[ \] \] \] \[\] \] \[ \] \] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \[ \] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \] \[\] \[\] \
TEXTO_DATA{3}='$$real \left \{ Z_{MN_{opt}} \right \}$;
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
```

TEXTO NUM=3; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA\_DATA(1) = { MEP' }; LEYENDA DATA  $(2) = \{ 'MPP' \};$ % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Tipo de fuente utilizada para los datos del eje de ordenadas. AXIS FONT=AXIS FONT; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Influencia de factor de acoplo', 32,... '\$\$k {T {X}-R {X}}\$\$',32,'sobre MEP \& MPP (II)'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL\_DATA='Factor de acoplo entre bobinas,  $k_{T_{X}-R_{X}}$  (-)'; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Eficiencia del enlace, \$\eta {link}\$ (\%)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG\_DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 2D 2021": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2D\_2021(X\_DATA,Y\_DATA,GRAF\_NUM,... X SCALE, Y SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN\_COLOR,LIN\_TYPE,LIN\_WIDE,AXIS\_FONT,... POINT\_NUM, POINT\_X, POINT\_Y, ... POINT\_TYPE, POINT\_COLOR, POINT\_SIZE, POINT\_TEXT, POINT\_FONT, ... TEXTO\_DATA, TEXTO\_NUM, TEXTO\_FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);

```
X_DATA(2,:)=K_TX_RX VECTOR;
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
Y DATA=[];
Y DATA(1,:)=PMN_MEP_K;
Y DATA(2,:)=PMN MPP K;
% Formato de visualización de datos en cada uno de los ejes de coordenadas
% del espacio de representación 2D.
X SCALE='log';
Y SCALE='log';
% Relación de colores de líneas a representar.
COLOR_LIST={'blue', 'red', 'green', 'black'};
if GRAF NUM<=length(COLOR LIST)
   LIN COLOR=COLOR LIST (1:GRAF NUM);
else
    for i=1:length(K TX RX)
    LIN COLOR{i}=[rand(1) rand(1) rand(1)];
    end
end
% Tipos de líneas a utilizar en la representación.
LIN_LIST={'-', '--', ':', '-.'};
if GRAF_NUM<=length(LIN_LIST)
    LIN TYPE=LIN LIST(1:GRAF NUM);
else
    LIN TYPE=cell(1, GRAF NUM);
    LIN TYPE(1:end) = { '-' };
end
% Grosor de líneas a utilizar en la representación.
LIN WIDE=1.5;
% Número de puntos o marcaradores a incluir en la figura.
POINT NUM=0;
% Coordenadas del eje de abscisas de los marcadores a representar.
POINT X=[];
% Coordenadas del eje de ordenadas de los datos a representar.
POINT Y=[];
% Tipo de símbolos para la representación de marcadores.
POINT TYPE='none';
% Color de símbolos para la representación de marcadores.
POINT COLOR=[];
% Tamaño de símbolos para la representación de marcadores.
POINT SIZE=6;
% Textos asociados a los marcadores representados.
POINT TEXT=[];
```

% Tamaño de fuente de extos asociados a los marcadores representados. POINT\_FONT=TEXTO\_FONT;

```
% Texto a añadir a la figura.
TEXTO_DATA{1}=...
sprintf(strcat('$$R_{T_{X}}$$~=~%g~$$\\Omega$$;',...
'$$Q_{T_{X}}$$~=~%g'),R_TX,Q_TX);
TEXTO_DATA{2}=...
sprintf(strcat('$$R_{R_{X}}$$~=~%g~$$\\Omega$$;',...
'$$Q_{R_{X}}$$~=~%g'),R_RX,Q_RX);
TEXTO_DATA{3}='$$real \left \{ Z_{MN_{opt}} \right \}$$';
```

```
% Número de elementos de texto a añadir a la figura.
```

TEXTO NUM=3; % Contenido de la leyenda a incluir en la figura. LEYENDA\_DATA(1) = { MEP' }; LEYENDA DATA  $(2) = \{ 'MPP' \};$ % Posición de la leyenda en la figura. LEYENDA POS='Best'; % Tipo de fuente utilizada para los datos del eje de ordenadas. AXIS FONT=AXIS FONT; % Límites de representación en el eje de abscisas de la figura. XLIM DATA=[]; % Límites de representación en el eje de ordenadas de la figura. YLIM DATA=[]; % Título de la gráfica incluida en la figura. TITLE DATA=strcat('WPDT: Influencia de factor de acoplo', 32,... '\$\$k {T {X}-R {X}}\$\$',32,'sobre MEP \& MPP (III)'); % Etiqueta a añadir al eje de abscisas de la figura. XLABEL\_DATA='Factor de acoplo entre bobinas, \$\$k\_{T\_{X}-R\_{X}}\$\$ (-) '; % Etiqueta a añadir al eje de ordenadas de la figura. YLABEL DATA='Potencia entregada al \$\$R {X}\$\$, \$P {MN}\$ (W)'; % Selección de dibujado de la figura en pantalla. FIG\_DIB=1; % Selección de guardado de la figura en disco. FIG SAVE=1; % Creación de la figura y dibujado de las gráficas. -> Función "FCN GRAFICAS 2D 2021": [SALIDA] = FCN\_GRAFICAS\_2D\_2021(X\_DATA, Y\_DATA, GRAF\_NUM, ... X SCALE, Y SCALE, ... FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ... LIN\_COLOR, LIN\_TYPE, LIN\_WIDE, AXIS\_FONT, ... POINT\_NUM, POINT\_X, POINT\_Y, ... POINT\_TYPE, POINT\_COLOR, POINT\_SIZE, POINT\_TEXT, POINT\_FONT, ... TEXTO\_DATA, TEXTO\_NUM, TEXTO\_FONT, ... LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ... TITLE DATA, TITLE FONT, ... XLIM DATA, YLIM DATA, ... XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ... FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO);

#### 7.10 Código "FCN\_GRAFICAS\_2D\_2021".

```
function [SALIDA] = FCN_GRAFICAS_2D_2021(X_DATA,Y_DATA,GRAF_NUM,...
  X_SCALE,Y_SCALE,...
  FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
  LIN_COLOR, LIN_TYPE, LIN_WIDE, AXIS_FONT, ...
  POINT NUM, POINT X, POINT Y, ...
  POINT_TYPE, POINT_COLOR, POINT_SIZE, POINT_TEXT, POINT_FONT, ...
  TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
  LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
  TITLE DATA, TITLE FONT, ...
  XLIM DATA, YLIM DATA, ...
  XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ...
  FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO)
8 ______
% FUNCIÓN "FCN GRAFICAS 2D 2021.m"
% _____
8
8
2
oc.
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Grupo de Ingeniería Microelectrónica (GIM).
% Departamento TEISA.
% Universidad de Cantabria (UC) - 2021.
% ----
8
% _____
§ _____
§ _____
<u>%</u>
% PARÁMETROS DE ENTRADA DE LA FUNCIÓN.
ç
%
% CREACIÓN DE LA FIGURA.
ç_____
% Creación de la figura y añadido del título.
hfig=figure('Name',FIG NAME);
% _____
                              _____
% SELECCIÓN DE MUESTRA POR PANTALLA DE LA FIGURA.
%
% Selección de muestra de la figura por pantalla.
if FIG DIB==1
  % Dibujado y con muestra de la figura por pantalla.
  set(hfig, 'Visible', 'on',...
     'Units', 'centimeters',...
     'Position', [1,1,1.45*FIG DX,1.45*FIG DY]);
else
  % Dibujado y sin muestra de la figura por pantalla.
  set(hfig,'Visible','off',...
     'Units', 'centimeters',...
     'Position',[1,1,1.45*FIG_DX,1.45*FIG_DY]);
end
o.
% DIBUJADO DE LAS GRÁFICAS INDICADAS EN LA FIGURA.
```

```
% _____
% Habilitar el dibujado conjunto de gráficos.
hold on;
% Representación de cada una de las gráficas indicadas.
for i=1:GRAF NUM
   % Curvas de Y_DATA = f(X_DATA)
   h1=plot(X_DATA(i,:),Y_DATA(i,:),...
       'Color', cell2mat(LIN_COLOR(i)),...
       'LineStyle', char(LIN_TYPE(i)),...
       'LineWidth', LIN WIDE);
end
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
hold off;
% Añadido de rejilla para facilitar la visualización de datos.
grid on;
% Selección de tipo de visualización de datos en los ejes.
set(gca,'xscale',X SCALE,...
   'yscale',Y_SCALE);
_____
% DIBUJADO DE LOS PUNTOS INDICADAS EN LA FIGURA.
2 -
                                          _____
     _____
% Habilitar el dibujado conjunto de gráficos.
hold on:
% Representación de cada una de las gráficas indicadas.
for i=1:POINT NUM
   % Puntos a representar sobre las gráficas de la figura.
   h2=plot(POINT_X(i),POINT_Y(i),...
       'LineStyle', 'none', ...
       'Marker', char (POINT TYPE (i)), ...
       'MarkerFaceColor', cell2mat(POINT_COLOR(i)),...
       'MarkerEdgeColor', cell2mat(POINT_COLOR(i)),...
       'MarkerSize', POINT SIZE);
   % Selección de tipo de visualización de datos en los ejes.
   set(gca,'xscale',X SCALE,...
       'yscale',Y SCALE);
end
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
hold off;
00
                                                _____
% INSERCIÓN DE CUADROS DE TEXTO EN LA FIGURA.
۶ _____
                                              _____
% Insertar cuadros de texto en la figura.
for i=1:TEXTO NUM
   % Lectura de datos de posición de la figura.
   set(gca,'Units','centimeters');
   POS=get(gca, 'Position');
   % Ubicación del primer cuadro de texto.
   if i==1
      posX00=0.2;
      posY00=POS(4)-0.7;
```

```
% Ubicación de los restantes cuadros de texto.
   else
      posX00=0.2;
      posY00=posY00-0.7;
   end
   % Creación del cuadro de texto en la figura.
   htxt=text('Units','centimeters',...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'String', TEXTO_DATA(i),...
   'Margin',1,...
   'FontSize', TEXTO_FONT, ...
   'Position', [posX00 posY00],...
   'Color', 'k');
end
٥٤
                                           _____
% INSERCIÓN DE LEYENDA DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
%
% Leyenda.
h legend=legend(LEYENDA DATA);
set(h_legend, 'Units', 'centimeters',...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'Color', 'white',...
   'FontWeight', 'bold',...
   'FontSize', LEYENDA_FONT, ...
   'Location', LEYENDA POS);
% DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE EJES DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
%
                                              _____
% Propiedades de los ejes del gráfico.
set(gca, 'LooseInset', get(gca, 'TightInset'),...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'TickLabelInterpreter', 'latex',...
   'FontSize', AXIS FONT);
%
% DEFINICIÓN DE LOS LÍMITES DE LOS EJES DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
o.
% Definición de límites de representación en eje de abscisas.
if isempty(XLIM DATA) == 0
   set(gca, 'XLim', XLIM DATA);
end
% Definición de límites de representación en eje de ordenadas.
if isempty(YLIM DATA)==0
   set(gca, 'YLim', YLIM DATA);
end
<u>9</u>
                                              _____
% DEFINICIÓN DEL TÍTULO DE LAS GRÁFICAS EN LA FIGURA.
_____
                                           _____
% Título de la figura.
title (TITLE DATA, ...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', TITLE_FONT,...
   'FontWeight', 'bold');
```

```
% Etiquetado de los ejes.
xlabel(XLABEL DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', LABEL FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
ylabel(YLABEL_DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', LABEL_FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
§ _____
% INSERCIÓN DE TEXTO EN PUNTOS REMARCADOS SOBRE LA GRÁFICA.
% ---
     _____
                                               _____
% Insertar texto de coordenadas de punto de interés.
for i=1:POINT NUM
   % Texto asociado a cada uno de los puntos de interés.
   htxt=text('Position',...
      [POINT X(i), POINT Y(i)],...
      'String', POINT_TEXT(i),...
      'Units', 'centimeters',...
      'FontUnits', 'centimeters',...
      'Interpreter', 'Latex',...
      'FontSize', POINT FONT, ...
      'Color',cell2mat(POINT_COLOR(i)),...
      'FontWeight', 'bold',...
      'VerticalAlignment', 'bottom',...
      'HorizontalAlignment', 'left');
end
ç_____
% ALMACENAMIENTO EXTERNO DE LA FIGURA.
% _____
                               _____
if FIG_SAVE==1
   % Guardado de imagen en directorio actual.
   FCN SAVE FIGURES(hfig, 1.45*FIG DX, 1.45*FIG DY, FIG NAME, FORMATO);
   FCN_SAVE_FIGURES(hfig,1.45*FIG_DX,1.45*FIG_DY,FIG_NAME,FORMATO);
end
%
% GENERACIÓN DE DATOS DE SALIDA.
% -----
% Puntero ("handler") de la figura creada.
```

SALIDA=hfig;

# 7.11 Código "FCN\_GRAFICAS\_2D\_DOBLEY\_2021".

```
function [SALIDA] = FCN GRAFICAS 2D DOBLEY 2021(X DATA 01,Y DATA 01,...
  X DATA 02, Y DATA 02,...
  GRAF NUM 01, GRAF NUM 02,.
  X SCALE 01, Y SCALE 01, Y SCALE 02, .....
  FIG_NAME, FIG_DX, FIG_DY, ...
  LIN_COLOR_01,LIN_TYPE_01,LIN_WIDE_01,AXIS_FONT_01,...
LIN_COLOR_02,LIN_TYPE_02,LIN_WIDE_02,AXIS_FONT_02,...
  POINT NUM 01, POINT X 01, POINT Y 01, ...
  POINT TYPE 01, POINT COLOR 01, POINT SIZE 01, POINT TEXT 01, ...
  POINT_NUM_02, POINT_X_02, POINT_Y_02, ...
  POINT_TYPE_02, POINT_COLOR_02, POINT_SIZE_02, POINT_TEXT_02, ...
  POINT FONT 01, POINT FONT 02,...
  TEXTO_DATA, TEXTO_NUM, TEXTO_FONT, ...
  LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
  TITLE_DATA, TITLE_FONT, ...
  XLIM_DATA_01, YLIM_DATA_01, YLIM_DATA_02, ...
  XLABEL DATA, YLABEL DATA 01, YLABEL DATA 02, LABEL FONT, ...
  FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO)
% =
                       _____
% FUNCIÓN "FCN GRAFICAS 2D 2021.m"
۶. _____
2
2
8
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Grupo de Ingeniería Microelectrónica (GIM).
% Departamento TEISA.
% Universidad de Cantabria (UC) - 2021.
% ____
                            _____
2
 ok
§ _____
% _____
% PARÁMETROS DE ENTRADA DE LA FUNCIÓN.
$_____
<u>§</u>
% CREACIÓN DE LA FIGURA.
%
% Creación de la figura y añadido del título.
hfig=figure('Name',FIG_NAME);
%
% SELECCIÓN DE MUESTRA POR PANTALLA DE LA FIGURA.
% _
    _____
% Selección de muestra de la figura por pantalla.
if FIG DIB==1
  % Dibujado y con muestra de la figura por pantalla.
  set(hfig,'Visible','on',...
     'Units', 'centimeters',...
     'Position', [1,1,1.45*FIG DX,1.45*FIG DY]);
else
  % Dibujado y sin muestra de la figura por pantalla.
```

```
set(hfig,'Visible','off',...
       'Units', 'centimeters',...
       'Position', [1,1,1.45*FIG DX,1.45*FIG DY]);
end
%
                                                  _____
% CREACIÓN DE LOS EJES PARA LA REPRESENTACIÓN DE LAS CURVAS.
ç_____
% Dibujado de curvas iniciales para ambos ejes de ordenadas.
[h00,h01,h02]=plotyy(X DATA 01(1,:),Y DATA 01(1,:),...
   X DATA 02(1,:),Y DATA 02(1,:));
% Editar propiedades de las primeras curvas representadas.
% -> Curva incluida en el primero de los ejes de ordenadas.
set(h01,...
   'Color', cell2mat(LIN COLOR 01(1)),...
   'LineStyle', char(LIN_TYPE_01(1)),...
   'LineWidth', LIN_WIDE_01);
% Editar propiedades de las primeras curvas representadas.
 -> Curva incluida en el segundo de los ejes de ordenadas.
8
set(h02,...
   'Color', cell2mat(LIN_COLOR_02(1)),...
   'LineStyle', char(LIN_TYPE_02(1)), ...
'LineWidth', LIN_WIDE_02);
% Modificación de las propiedades del primer eje de ordenadas.
% -> Permitir el añadido de nuevas curvas y marcadores.
set(h00(1), 'NextPlot', 'add');
% Modificación de las propiedades del segundo eje de ordenadas.
% -> Permitir el añadido de nuevas curvas y marcadores.
set(h00(2), 'NextPlot', 'add');
06
% DIBUJADO DE LAS GRÁFICAS INDICADAS EN LA FIGURA: 01
%
% Representación de las curvas indicadas en el primer eje "Y".
for i=2:GRAF NUM 01
   % Curvas de Y DATA 01 = f(X DATA 01)
   % Dibujado de las siguientes curvas en los ejes dobles.
      -> Uso del primero de los ejes de ordenadas.
   8
   h01(i)=plot(h00(1),...
      X DATA 01(i,:),Y DATA 01(i,:),...
       'Color', cell2mat(LIN COLOR 01(i)),...
       'LineStyle', char(LIN TYPE 01(i)), ...
       'LineWidth',LIN_WIDE_01);
end
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
set(h00(1),'NextPlot','replace');
%
% DIBUJADO DE LAS GRÁFICAS INDICADAS EN LA FIGURA: 02
     _____
% Representación de las curvas indicadas en el segundo eje "Y".
for i=2:GRAF NUM 02
   % Curvas de Y_DATA_02 = f(X DATA 02)
   % Dibujado de las siguientes curvas en los ejes dobles.
```

```
-> Uso del segundo de los ejes de ordenadas.
   h02(i)=plot(h00(2),...
       X_DATA_02(i,:),Y_DATA_02(i,:),...
       'Color', cell2mat(LIN COLOR 02(i)),...
       'LineStyle', char(LIN_TYPE_02(i)),...
       'LineWidth', LIN WIDE 02);
end
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
set(h00(2),'NextPlot','replace');
۹_____
% PROPIEDADES DE LOS EJES DE REPRESENTACIÓN DE CURVAS.
8 -
      _____
% Añadido de rejilla para facilitar la visualización de datos.
grid on;
% Selección de tipo de visualización de datos en los ejes.
set(h00(1),'xscale',X_SCALE_01,...
   'yscale', Y SCALE 01);
set(h00(2),'xscale',X_SCALE_01,...
   'yscale',Y_SCALE_02);
ok _____
% DIBUJADO DE LOS PUNTOS INDICADAS EN LA FIGURA: 01
2 -
      _____
% Representación de puntos en el primero de los ejes de ordenadas de la
% figura creada.
% Habilitar el dibujado conjunto de gráficos.
set(h00(1),'NextPlot','add');
% Representación de cada una de las gráficas indicadas.
for i=1:POINT NUM 01
   % Puntos a representar sobre las gráficas de la figura.
   h2=plot(h00(1),...
       POINT_X_01(i), POINT_Y_01(i),...
       'LineStyle', 'none',...
       'Marker', char(POINT TYPE 01(i)),...
       'MarkerFaceColor', cell2mat(POINT COLOR 01(i)),...
       'MarkerEdgeColor', cell2mat(POINT COLOR 01(i)),...
       'MarkerSize', POINT SIZE 01);
   % Selección de tipo de visualización de datos en los ejes.
   set(h00(1),'xscale',X SCALE 01,...
       'yscale', Y SCALE 01);
end
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
set(h00(1),'NextPlot','replace');
۶
۶
% DIBUJADO DE LOS PUNTOS INDICADAS EN LA FIGURA: 02
8 --
     _____
% Representación de puntos en el segundo de los ejes de ordenadas de la
% figura creada.
% Habilitar el dibujado conjunto de gráficos.
set(h00(2), 'NextPlot', 'add');
% Representación de cada una de las gráficas indicadas.
```

```
for i=1:POINT NUM 02
    % Puntos a representar sobre las gráficas de la figura.
   h2=plot(h00(2),...
       POINT X 02(i), POINT Y 02(i),...
       'LineStyle', 'none', ...
       'Marker', char(POINT_TYPE_02(i)),...
       'MarkerFaceColor', cell2mat(POINT_COLOR_02(i)),...
       'MarkerEdgeColor', cell2mat(POINT COLOR 02(i)),...
       'MarkerSize', POINT_SIZE_02);
   % Selección de tipo de visualización de datos en los ejes.
   set(h00(1),'xscale',X SCALE 01,...
        'yscale',Y_SCALE_02);
end
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
set(h00(2),'NextPlot','replace');
∞
% INSERCIÓN DE CUADROS DE TEXTO EN LA FIGURA.
% _____
                                                  ------
% Insertar cuadros de texto en la figura.
for i=1:TEXTO NUM
   % Lectura de datos de posición de la figura.
   set(gca, 'Units', 'centimeters');
   POS=get(gca, 'Position');
   % Ubicación del primer cuadro de texto.
   if i==1
       posX00=0.2;
       posY00=POS(4)-0.7;
   % Ubicación de los restantes cuadros de texto.
   else
       posX00=0.2;
       posY00=posY00-0.7;
   end
   % Creación del cuadro de texto en la figura.
   htxt=text('Units','centimeters',...
    'FontUnits', 'centimeters',...
    'Interpreter', 'Latex',...
   'String', TEXTO DATA(i),...
   'Margin',1,...
    'FontSize', TEXTO FONT, ...
    'Position', [posX00 posY00],...
    'Color','k');
end
        _____
% INSERCIÓN DE LEYENDA DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
& _____
% Leyenda.
h legend=legend([h01,h02],LEYENDA DATA);
set(h_legend, 'Units', 'centimeters', ...
    'FontUnits', 'centimeters',...
    'Interpreter', 'Latex',...
   'Color', 'white',...
   'FontWeight', 'bold',...
    'FontSize', LEYENDA_FONT, ...
```

'Location', LEYENDA\_POS);

```
<u>&</u>
% DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE EJES DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
8 -
       _____
% Propiedades de los ejes del espacio con el primer eje de ordenadas.
set(h00(1),'LooseInset',get(h00(1),'TightInset'),...
    'FontUnits', 'centimeters',...
   'TickLabelInterpreter', 'latex',...
   'YColor', 'black',...
   'FontSize', AXIS_FONT_01);
% Propiedades de los ejes del espacio con el segundo eje de ordenadas.
set(h00(2),'LooseInset',get(h00(2),'TightInset'),...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'TickLabelInterpreter', 'latex',...
   'YColor', 'black',...
   'FontSize', AXIS FONT 02);
%
% DEFINICIÓN DE LOS LÍMITES DE LOS EJES DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
%
% Definición de límites de representación en eje de abscisas.
if isempty(XLIM DATA 01)==0
   set(h00(1), 'XLim', XLIM_DATA_01);
   set(h00(2), 'XLim', XLIM DATA 01);
end
% Definición de límites de representación en el primer eje de ordenadas.
if isempty(YLIM DATA 01) == 0
   set(h00(1), 'YLim', YLIM_DATA_01);
end
% Definición de límites de representación en el segundo eje de ordenadas.
if isempty(YLIM_DATA_02) == 0
   set(h00(2), 'YLim', YLIM_DATA_02);
end
% DEFINICIÓN DEL TÍTULO DE LAS GRÁFICAS EN LA FIGURA.
§ _____
                                                      _____
% Título de la figura.
title (TITLE DATA, ...
   'FontUnits','centimeters',...
'interpreter','Latex',...
   'FontSize', TITLE FONT,...
   'FontWeight', 'bold');
% Etiquetado de los ejes.
xlabel(h00(1),...
   XLABEL_DATA, ...
   'FontUnits','centimeters',...
'Interpreter','Latex',...
   'FontSize', LABEL_FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
ylabel(h00(1),...
   YLABEL DATA_01,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', LABEL FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
ylabel(h00(2),...
   YLABEL DATA 02,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
```

```
'FontSize', LABEL FONT, ...
    'FontWeight', 'bold');
۶<u>۲</u>
% INSERCIÓN DE TEXTO EN PUNTOS REMARCADOS SOBRE LA GRÁFICA: 01
                                                          _____
8 ---
        _____
                                 _____
% Inserción de marcadores o puntos de interés sobre el espacio con el
% primer eje de ordenadas de la figura.
% Habilitar el dibujado conjunto de gráficos.
set(h00(1), 'NextPlot', 'add');
% Insertar texto de coordenadas de punto de interés.
for i=1:POINT NUM 01
    % Texto asociado a cada uno de los puntos de interés.
   htxt=text('Position',...
       [POINT X 01(i), POINT Y 01(i)],...
       'String', POINT_TEXT_01(i),...
'Parent', h00(1),...
       'Units', 'centimeters',...
       'FontUnits', 'centimeters',...
       'Interpreter', 'Latex',...
       'FontSize', POINT_FONT_01,...
       'Color', cell2mat(POINT COLOR 01(i)),...
       'FontWeight', 'bold',...
       'VerticalAlignment', 'bottom', ...
       'HorizontalAlignment', 'left');
end
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
set(h00(1), 'NextPlot', 'replace');
<u>&</u>
% INSERCIÓN DE TEXTO EN PUNTOS REMARCADOS SOBRE LA GRÁFICA: 02
8 --
     _____
% Inserción de marcadores o puntos de interés sobre el espacio con el
% segundo eje de ordenadas de la figura.
% Habilitar el dibujado conjunto de gráficos.
set(h00(2),'NextPlot','add');
% Insertar texto de coordenadas de punto de interés.
for i=1:POINT NUM 02
   % Texto asociado a cada uno de los puntos de interés.
   htxt=text('Position',...
       [POINT_X_02(i), POINT_Y_02(i)], ...
       'String', POINT_TEXT_02(i),...
       'Parent', h00(2),...
       'Units','centimeters',...
       'FontUnits', 'centimeters',...
       'Interpreter', 'Latex',...
       'FontSize', POINT_FONT_02,...
       'Color', cell2mat(POINT COLOR 02(i)),...
       'FontWeight', 'bold',...
'VerticalAlignment', 'bottom',...
       'HorizontalAlignment', 'left');
end
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
```

```
set(h00(2), 'NextPlot', 'replace');
```

SALIDA=hfig;

8 -----

% Puntero ("handler") de la figura creada.

\_\_\_\_\_

-----

PÁGINA 308 DE 323

#### 7.12 Código "FCN\_GRAFICAS\_SURF\_2021".

```
function [SALIDA] = FCN_GRAFICAS_SURF_2021(X_DATA,Y_DATA,Z_DATA,POINT_NUM,...
  FIG_NAME, FIG_DX, FIG_DY, ...
  SURF COLOR, SURF LINE, SURF VIEW, ...
  POINT_X, POINT_Y, POINT_Z, ...
  POINT TYPE, POINT COLOR, POINT SIZE, POINT TEXT, POINT FONT, AXIS FONT, ...
  X_SCALE,Y_SCALE,Z_SCALE,..
  BAR USE, BAR TITLE, BAR POS, BAR FONT, ...
  TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
  LEYENDA DATA, LEYENDA_FONT, LEYENDA_POS, ...
  TITLE DATA, TITLE FONT, ...
  XLIM DATA, YLIM DATA, ZLIM DATA, ...
  XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, ZLABEL_DATA, LABEL FONT, ...
  FIG_DIB, FIG_SAVE, FORMATO)
<u>%</u>
% FUNCIÓN "GRAFICAS SURF 2021.m"
8 -----
2
%
2
2
% --
   _____
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Grupo de Ingeniería Microelectrónica (GIM).
% Departamento TEISA.
% Universidad de Cantabria (UC) - 2021.
8 -----
2
& _____
۶ _____
ok
* _____
% PARÁMETROS DE ENTRADA DE LA FUNCIÓN.
% ====
   _____
% _____
% CREACIÓN DE LA FIGURA.
%
% Creación de la figura y añadido del título.
hfig=figure('Name',FIG_NAME);
%
% SELECCIÓN DE MUESTRA POR PANTALLA DE LA FIGURA.
% Selección de muestra de la figura por pantalla.
if FIG DIB==1
  % Dibujado y con muestra de la figura por pantalla.
  set(hfig,'Visible','on',...
     'Units', 'centimeters',...
     'Position', [1,1,FIG DX,FIG DY]);
else
  % Dibujado y sin muestra de la figura por pantalla.
  set(hfig,'Visible','off',...
     'Units', 'centimeters',...
     'Position', [1,1,FIG DX,FIG DY]);
end
ç_____
```

```
% DIBUJADO DE LAS GRÁFICAS INDICADAS EN LA FIGURA.
                                                    _____
§ _____
% Habilitar el dibujado conjunto de gráficos.
hold on;
% Representación de la gráfica de tipo 3D.
h1=surf(X_DATA,Y_DATA,Z_DATA,...
   'FaceColor', SURF_COLOR,...
    'LineStyle', SURF_LINE);
% Selección de tipo de visualización de datos en los ejes.
set(gca,'xscale',X SCALE,...
    yscale',Y_SCALE,...
    'zscale',Z_SCALE);
% Selección de escala de color para representación de la superficie 3D.
% set(gca,'colorscale','log')
colormap(gca, 'parula');
% Representación de cada uno de los puntos de interés sobre la gráfica 3D.
for i=1:POINT NUM
    % Puntos a resaltar sobre la figura tridimensional.
   h2=plot3(POINT_X(i),POINT_Y(i),POINT_Z(i),...
        'LineStyle', 'none',...
       'Marker', char(POINT TYPE(i)), ...
       'MarkerFaceColor', cell2mat(POINT_COLOR(i)),...
       'MarkerEdgeColor',cell2mat(POINT_COLOR(i)),...
       'MarkerSize',POINT_SIZE);
   % Selección de tipo de visualización de datos en los ejes.
   set(gca,'xscale',X SCALE,...
        yscale', Y SCALE,...
       'zscale', Z SCALE);
end
% Cambiar a vista de la figura en el plano XY.
view(SURF VIEW);
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
hold off;
% Añadido de rejilla para facilitar la visualización de datos.
grid on;
%
% INSERCIÓN DE CUADROS DE TEXTO EN LA FIGURA.
% _
                                          -----
            _____
% Insertar cuadros de texto en la figura.
for i=1:TEXTO NUM
   % Lectura de datos de posición de la figura.
   set(gca, 'Units', 'centimeters');
   POS=get(gca, 'Position');
   % Ubicación del primer cuadro de texto.
   if i==1
       posX00=0.2;
       posY00=POS(4)-0.6;
   % Ubicación de los restantes cuadros de texto.
   else
       posX00=0.2;
       posY00=posY00-0.6;
```

```
end
   % Creación del cuadro de texto en la figura.
   htxt=text('Units','centimeters',...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'String', TEXTO_DATA(i),...
   'Margin',1,...
   'FontSize', TEXTO_FONT, ...
   'Position', [posX00 posY00],...
   'Color', 'k');
end
۶
۶
% INSERCIÓN DE BARRA DE COLORES EN LA FIGURA.
% ---
       _____
% Creación de la barra de colores utilizada para representar la relación
% de los colores utilizados en la gráfica de superficie 3D con los valores
% correspondientes en el eje de cotas.
if BAR USE==1
   % Insertar barra de colores en la figura.
   cl=colorbar('Units','centimeters',...
       'TickLabelInterpreter', 'Latex',...
       'FontWeight', 'bold',...
       'FontSize', BAR_FONT, ...
       'Location', BAR POS);
   c1.Title.String=BAR TITLE;
   % Opción para seleccionar valores máximos y mínimos que mostrar en la
   % barra de colores añadida a la figura.
   if isempty(ZLIM DATA) ==1
       % Límites de datos a mostrar en la barra de colores definidos por
       % los valores minimo y máximo contenidos en los datos a
       % representar.
       caxis([min(Z_DATA(:)), max(Z_DATA(:))]);
   else
       % Límites de datos a mostrar en la barra de colores definidos por
       % el usuario como variable de entrada de la función.
       caxis(ZLIM DATA);
   end
end
o.
% INSERCIÓN DE LEYENDA DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
oc.
% Leyenda de apoyo en la figura.
if isempty(LEYENDA DATA) ==0
   % Creación de leyenda en la figura.
   h legend=legend(LEYENDA DATA);
   set(h legend, 'Units', 'centimeters',...
       'FontUnits', 'centimeters',...
       'Interpreter', 'Latex',...
       'Color', 'white',...
       'FontWeight', 'bold',...
       'FontSize', LEYENDA_FONT, ...
       'Location', LEYENDA_POS);
```

 $\operatorname{end}$ 

```
ç_____
% DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE EJES DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
                                                      _____
_____
                                _____
% Propiedades de los ejes del gráfico.
set(gca, 'LooseInset',get(gca, 'TightInset'),...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'TickLabelInterpreter', 'latex',...
   'FontSize', AXIS FONT);
% Invertir de alguno de los ejes de la figura.
   -> set(gca,'xdir','reverse');
-> set(gca,'ydir','reverse');
2
  -> set(gca, 'zdir', 'reverse');
2
% set(gca, 'ydir', 'reverse');
%
% DEFINICIÓN DE LOS LÍMITES DE LOS EJES DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
8 -----
% Definición de límites de representación en eje de abscisas.
if isempty(XLIM DATA)==0
   set(gca, 'XLim', XLIM DATA);
end
% Definición de límites de representación en eje de ordenadas.
if isempty(YLIM DATA) == 0
   set(gca, 'YLim', YLIM DATA);
end
% Definición de límites de representación en eje de cotas.
if isempty(ZLIM DATA)==0
   set(gca, 'ZLim', ZLIM DATA);
end
% DEFINICIÓN DEL TÍTULO DE LAS GRÁFICAS EN LA FIGURA.
           ____
% Título de la figura.
title(TITLE_DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', TITLE_FONT,...
   'FontWeight', 'bold');
% Etiquetado del eje de abscisas de la figura.
2
  -> El posicionamiento de las etiquetas de los ejes debe ser editado
   manualmente por el usuario, ya que su ubicación cambiará en función de
8
   la vista del objeto.
8
   -> En este caso, se ha optimizado su posicionamiento para una vista del
2
   objeto de view = [-45 \ 45].
xlabel(XLABEL DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', LABEL_FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
% x handler=get(gca, 'XLabel');
% x pos=get(x handler, 'Position');
% set(x_handler,'Position',x_pos.*[2.2,0.8,0.1]);
% Etiquetado del eje de ordenadas de la figura.
% -> El posicionamiento de las etiquetas de los ejes debe ser editado
8
  manualmente por el usuario, ya que su ubicación cambiará en función de
8
  la vista del objeto.
```

```
-> En este caso, se ha optimizado su posicionamiento para una vista del
8
   objeto de view = [-45 \ 45].
2
ylabel(YLABEL_DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', LABEL FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
% y_handler=get(gca, 'YLabel');
% y_pos=get(y_handler,'Position');
% set(y_handler, 'Position', y_pos.*[0.8,1,0.75]);
% Etiquetado del eje de cotas de la figura.
zlabel(ZLABEL_DATA,...
   'FontUnits','centimeters',...
'Interpreter','Latex',...
   'FontSize', LABEL FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
% INSERCIÓN DE TEXTO EN PUNTOS REMARCADOS SOBRE LA GRÁFICA.
٥٤
                                                _____
% Insertar texto de coordenadas de punto de interés.
for i=1:POINT NUM
   % Texto asociado a cada uno de los puntos de interés.
   htxt=text('Position',...
      [POINT X(i), POINT Y(i), POINT Z(i)],...
      'String', POINT_TEXT(i),...
      'FontUnits', 'centimeters',...
      'Interpreter', 'Latex',...
      'FontSize', POINT FONT, ...
      'Color',cell2mat(POINT_COLOR(i)),...
      'FontWeight', 'bold',...
      'VerticalAlignment', 'bottom',...
      'HorizontalAlignment', 'left');
end
%
% ALMACENAMIENTO EXTERNO DE LA FIGURA.
o.
if FIG_SAVE==1
   % Guardado de imagen en directorio actual.
   FCN_SAVE_FIGURES(gcf,FIG_DX,FIG_DY,FIG_NAME,FORMATO);
end
%
% GENERACIÓN DE DATOS DE SALIDA.
% Puntero ("handler") de la figura creada.
```

```
SALIDA=hfig;
```

# 7.13 Código "FCN\_GRAFICAS\_SURF\_ZLOG\_2021".

```
function [SALIDA]
FCN GRAFICAS_SURF_ZLOG_2021 (X_DATA, Y_DATA, Z_DATA, POINT_NUM, ...
  FIG NAME, FIG DX, FIG DY, ...
  SURF COLOR, SURF LINE, SURF VIEW, ...
  POINT_X, POINT_Y, POINT_Z, ...
  POINT_TYPE, POINT_COLOR, POINT_SIZE, POINT_TEXT, POINT FONT, AXIS FONT, ....
  X SCALE, Y SCALE, Z SCALE, ...
  BAR USE, BAR TITLE, BAR POS, BAR FONT, ...
  TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
  LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
  TITLE DATA, TITLE FONT, ...
  XLIM DATA, YLIM DATA, ZLIM DATA, ...
  XLABEL_DATA, YLABEL_DATA, ZLABEL_DATA, LABEL_FONT, ...
  FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO)
<u>%</u> _____
% FUNCIÓN "FCN_GRAFICAS_SURF_ZLOG_2021.m"
8
 _____
2
8
2
2
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Grupo de Ingeniería Microelectrónica (GIM).
% Departamento TEISA.
% Universidad de Cantabria (UC) - 2021.
8
 _____
                   _____
2
<u>%</u>
%
§ ______
% _____
% PARÁMETROS DE ENTRADA DE LA FUNCIÓN.
§ _____
ofc ______
% CREACIÓN DE LA FIGURA.
                _____
2 -
     _____
% Creación de la figura y añadido del título.
hfig=figure('Name',FIG_NAME);
<u>§</u>
% SELECCIÓN DE MUESTRA POR PANTALLA DE LA FIGURA.
 _____
9
% Selección de muestra de la figura por pantalla.
if FIG DIB==1
  % Dibujado y con muestra de la figura por pantalla.
  set(hfig,'Visible','on',...
     'Units', 'centimeters',...
     'Position',[1,1,FIG_DX,FIG_DY]);
else
  % Dibujado y sin muestra de la figura por pantalla.
  set(hfig, 'Visible', 'off',...
     'Units', 'centimeters',...
     'Position',[1,1,FIG_DX,FIG_DY]);
end
```

```
% DIBUJADO DE LAS GRÁFICAS INDICADAS EN LA FIGURA.
۶<u>,</u>
% Habilitar el dibujado conjunto de gráficos.
hold on;
% Representación de la gráfica de tipo 3D.
h1=surf(X_DATA,Y_DATA,Z_DATA,...
    'FaceColor', SURF_COLOR,...
    'LineStyle', SURF LINE);
% Selección de tipo de visualización de datos en los ejes.
set(gca,'xscale',X SCALE,...
    'yscale',Y SCALE,...
    'zscale',Z SCALE);
% Selección de escala de color para representación de la superficie 3D.
% set(gca,'colorscale','log')
colormap(gca, 'parula');
% Aplicar escala de color logarítmica a la gráfica de superficie 3D y a
% la barra de colores asociada.
   -> Recuerde que no puede haber datos de "Z_DATA" de valor CERO, ya
   que la transformación a escala logarítmica no podría realizarse
2
8
   correctamente, obteniéndose un error en la ejecución.
ax=gca;
ax.ColorScale='log';
% Representación de cada uno de los puntos de interés sobre la gráfica 3D.
for i=1:POINT NUM
    % Puntos a resaltar sobre la figura tridimensional.
   h2=plot3(POINT X(i), POINT Y(i), POINT Z(i),...
        'LineStyle', 'none',...
'Marker', char(POINT_TYPE(i)),...
        'MarkerFaceColor', cell2mat(POINT_COLOR(i)),...
        'MarkerEdgeColor', cell2mat(POINT_COLOR(i)), ...
        'MarkerSize', POINT_SIZE);
    % Selección de tipo de visualización de datos en los ejes.
   set(gca,'xscale',X SCALE,...
        'yscale',Y SCALE,...
        'zscale', Z SCALE);
end
% Cambiar a vista de la figura en el plano XY.
view(SURF VIEW);
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
hold off;
% Añadido de rejilla para facilitar la visualización de datos.
grid on;
§ _____
% INSERCIÓN DE CUADROS DE TEXTO EN LA FIGURA.
                                            _____
             _____
% Insertar cuadros de texto en la figura.
for i=1:TEXTO NUM
   % Lectura de datos de posición de la figura.
   set(gca,'Units','centimeters');
   POS=get(gca, 'Position');
```

```
% Ubicación del primer cuadro de texto.
   if i==1
       posX00=0.2;
       posY00=POS(4)-0.6;
   % Ubicación de los restantes cuadros de texto.
   else
       posX00=0.2;
       posY00=posY00-0.6;
   end
   % Creación del cuadro de texto en la figura.
   htxt=text('Units','centimeters',...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'String', TEXTO DATA(i),...
   'Margin',1,...
   'FontSize', TEXTO FONT, ...
   'Position', [posX00 posY00],...
   'Color', 'k');
end
<u>ي</u>
% INSERCIÓN DE BARRA DE COLORES EN LA FIGURA.
% --
     _____
% Creación de la barra de colores utilizada para representar la relación
% de los colores utilizados en la gráfica de superficie 3D con los valores
% correspondientes en el eje de cotas.
if BAR USE==1
   % Insertar barra de colores en la figura.
   cl=colorbar('Units','centimeters',...
       'TickLabelInterpreter', 'Latex',...
       'FontWeight', 'bold',...
       'FontSize', BAR_FONT, ...
       'Location', BAR POS);
   c1.Title.String=BAR TITLE;
   % Opción para seleccionar valores máximos y mínimos que mostrar en la
   % barra de colores añadida a la figura.
2
    caxis([min(Z DATA(:)), max(Z DATA(:))])
   % Aplicar escala de color logarítmica a la gráfica de superficie 3D y a
   % la barra de colores asociada.
   % -> Recuerde que no puede haber datos de "Z DATA" de valor CERO, ya
   % que la transformación a escala logarítmica no podría realizarse
   8
      correctamente, obteniéndose un error en la ejecución.
   ax=gca;
   ax.ColorScale = 'log';
end
» _____
          _____
% INSERCIÓN DE LEYENDA DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
                                            _____
% Leyenda de apoyo en la figura.
if isempty(LEYENDA DATA) ==0
   % Creación de leyenda en la figura.
```

h\_legend=legend(LEYENDA\_DATA);

set(h\_legend, 'Units', 'centimeters', ...

```
'FontUnits', 'centimeters',...
       'Interpreter', 'Latex',...
       'Color', 'white',...
       'FontWeight', 'bold',...
       'FontSize', LEYENDA FONT, ...
       'Location', LEYENDA POS);
end
06
% DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE EJES DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
%
% Propiedades de los ejes del gráfico.
set(gca, 'LooseInset', get(gca, 'TightInset'), ...
   'FontUnits', 'centimeters', ...
   'TickLabelInterpreter', 'latex',...
   'FontSize',AXIS_FONT);
% Invertir de alguno de los ejes de la figura.
   -> set(gca, 'xdir', 'reverse');
2
  -> set(gca, 'ydir', 'reverse');
8
% -> set(gca, 'zdir', 'reverse');
set(gca,'ydir','reverse');
۶ _____
% DEFINICIÓN DE LOS LÍMITES DE LOS EJES DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
_____
    _____
% Definición de límites de representación en eje de abscisas.
if isempty(XLIM DATA)==0
   set(gca, 'XLim', XLIM DATA);
end
% Definición de límites de representación en eje de ordenadas.
if isempty(YLIM DATA) ==0
   set(gca, 'YLim', YLIM DATA);
end
% Definición de límites de representación en eje de cotas.
if isempty(ZLIM DATA)==0
   set(gca, 'ZLim', ZLIM DATA);
end
%
% DEFINICIÓN DEL TÍTULO DE LAS GRÁFICAS EN LA FIGURA.
0%
                                                  _____
% Título de la figura.
title(TITLE DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', TITLE FONT,...
   'FontWeight', 'bold');
% Etiquetado del eje de abscisas de la figura.
   -> El posicionamiento de las etiquetas de los ejes debe ser editado
2
   manualmente por el usuario, ya que su ubicación cambiará en función de
8
2
   la vista del objeto.
2
   -> En este caso, se ha optimizado su posicionamiento para una vista del
   objeto de view = [-45 \ 45].
8
xlabel(XLABEL DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', LABEL_FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
x_handler=get(gca,'XLabel');
x pos=get(x handler, 'Position');
```

```
set(x handler, 'Position', x pos.*[2.2,0.8,0.1]);
% Etiquetado del eje de ordenadas de la figura.
   -> El posicionamiento de las etiquetas de los ejes debe ser editado
2
2
   manualmente por el usuario, ya que su ubicación cambiará en función de
÷
  la vista del objeto.
  -> En este caso, se ha optimizado su posicionamiento para una vista del
8
   objeto de view = [-45 \ 45].
2
ylabel(YLABEL_DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', LABEL FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
y handler=get(gca, 'YLabel');
y_pos=get(y_handler, 'Position');
set(y handler, 'Position', y pos.*[1,0.75,1]);
% Etiquetado del eje de cotas de la figura.
zlabel(ZLABEL DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', LABEL FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
%
% INSERCIÓN DE TEXTO EN PUNTOS REMARCADOS SOBRE LA GRÁFICA.
ok _____
                                               _____
% Insertar texto de coordenadas de punto de interés.
for i=1:POINT NUM
   % Texto asociado a cada uno de los puntos de interés.
   htxt=text('Position',...
      X POINT(i), Y POINT(i), Z POINT(i),...
      'String', POINT_TEXT(i),...
      'Units', 'centimeters',...
      'FontUnits', 'centimeters',...
      'Interpreter', 'Latex',...
      'FontSize', POINT FONT, ...
      'VerticalAlignment', 'bottom',...
      'HorizontalAlignment','left');
end
%
% ALMACENAMIENTO EXTERNO DE LA FIGURA.
o.
if FIG SAVE==1
   % Guardado de imagen en directorio actual.
   FCN_SAVE_FIGURES(gcf,FIG_DX,FIG_DY,FIG_NAME,FORMATO);
end
% GENERACIÓN DE DATOS DE SALIDA.
% _____
                                _____
```

```
% Puntero ("handler") de la figura creada.
SALIDA=hfig;
```

## 7.14 Código "FCN\_GRAFICAS\_XLOG\_2021".

```
function [SALIDA] = FCN_GRAFICAS_XLOG_2021(X_DATA,Y_DATA,GRAF_NUM,...
  FIG_NAME, FIG_DX, FIG_DY, ...
  LIN COLOR, LIN TYPE, LIN WIDE, AXIS FONT, ...
  TEXTO DATA, TEXTO NUM, TEXTO FONT, ...
  LEYENDA DATA, LEYENDA FONT, LEYENDA POS, ...
  TITLE DATA, TITLE FONT, ...
  XLIM DATA, YLIM DATA, ...
  XLABEL DATA, YLABEL DATA, LABEL FONT, ...
  FIG DIB, FIG SAVE, FORMATO)
% ====
          _____
                    _____
% FUNCIÓN "GRAFICAS 2021.m"
% _____
2
%
%
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Grupo de Ingeniería Microelectrónica (GIM).
% Departamento TEISA.
% Universidad de Cantabria (UC) - 2021.
& _____
                          _____
§ _____
§ _____
26
<u>%</u>
% PARÁMETROS DE ENTRADA DE LA FUNCIÓN.
$_____
%
% CREACIÓN DE LA FIGURA.
06
% Creación de la figura y añadido del título.
hfig=figure('Name',FIG NAME);
8 _____
% SELECCIÓN DE MUESTRA POR PANTALLA DE LA FIGURA.
% -
   ------
                                 _____
% Selección de muestra de la figura por pantalla.
if FIG DIB==1
  % Dibujado y con muestra de la figura por pantalla.
  set(hfig,'Visible','on',...
     'Units', 'centimeters',...
     'Position', [1,1,1.45*FIG DX,1.45*FIG DY]);
else
  % Dibujado y sin muestra de la figura por pantalla.
  set(hfig,'Visible','off',...
     'Units', 'centimeters',...
     'Position', [1,1,1.45*FIG DX,1.45*FIG DY]);
end
% DIBUJADO DE LAS GRÁFICAS INDICADAS EN LA FIGURA.
        _____
                       _____
                                  _____
% Habilitar el dibujado conjunto de gráficos.
hold on;
```

```
% Representación de cada una de las gráficas indicadas.
for i=1:GRAF NUM
   % Curvas de Y DATA = f(X DATA)
   h1=semilogx(X DATA(i,:), Y DATA(i,:),...
       'Color',cell2mat(LIN_COLOR(i)),...
       'LineStyle', char(LIN_TYPE(i)),...
       'LineWidth',LIN_WIDE);
end
% Deshabilitar el dibujado conjunto de gráficos.
hold off;
% Añadido de rejilla para facilitar la visualización de datos.
grid on;
% INSERCIÓN DE CUADROS DE TEXTO EN LA FIGURA.
§ _____
                                                 _____
% Insertar cuadros de texto en la figura.
for i=1:TEXTO NUM
   % Lectura de datos de posición de la figura.
   set(gca, 'Units', 'centimeters');
   POS=get(gca, 'Position');
   % Ubicación del primer cuadro de texto.
   if i==1
       posX00=0.2;
       posY00 = POS(4) - 0.6;
   % Ubicación de los restantes cuadros de texto.
   else
       posX00=0.2;
       posY00=posY00-0.6;
   end
   % Creación del cuadro de texto en la figura.
   htxt=text('Units','centimeters',...
   'FontUnits','centimeters',...
'Interpreter','Latex',...
    'String', TEXTO_DATA(i),...
    'Margin',1,...
    'FontSize', TEXTO_FONT, ...
    'Position', [posX00 posY00],...
   'Color', 'k');
end
% _____
                                                   _____
% INSERCIÓN DE LEYENDA DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
§ _____
% Leyenda.
h legend=legend(LEYENDA DATA);
set(h legend, 'Units', 'centimeters', ...
    'FontUnits', 'centimeters',...
    'Interpreter', 'Latex',...
    'Color', 'white',...
   'FontWeight', 'bold',...
    'FontSize', LEYENDA_FONT, ...
    'Location', LEYENDA POS);
```

```
%
🖇 DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE EJES DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
۶ _____
% Propiedades de los ejes del gráfico.
set(gca, 'LooseInset',get(gca, 'TightInset'),...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'TickLabelInterpreter', 'latex',...
   'FontSize',AXIS_FONT);
%
% DEFINICIÓN DE LOS LÍMITES DE LOS EJES DE GRÁFICAS EN LA FIGURA.
%
% Definición de límites de representación en eje de abscisas.
if isempty(XLIM DATA)==0
  set(gca, 'XLim', XLIM DATA);
end
% Definición de límites de representación en eje de ordenadas.
if isempty(YLIM DATA) == 0
  set(gca, 'YLim', YLIM DATA);
end
% _____
                      _____
% DEFINICIÓN DEL TÍTULO DE LAS GRÁFICAS EN LA FIGURA.
   _____
                                          _____
% Título de la figura.
title(TITLE DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', TITLE FONT,...
   'FontWeight', 'bold');
% Etiquetado de los ejes.
xlabel(XLABEL DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', LABEL FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
ylabel(YLABEL_DATA,...
   'FontUnits', 'centimeters',...
   'Interpreter', 'Latex',...
   'FontSize', LABEL FONT, ...
   'FontWeight', 'bold');
%
% ALMACENAMIENTO EXTERNO DE LA FIGURA.
% -----
if FIG SAVE==1
   % Guardado de imagen en directorio actual.
  FCN SAVE FIGURES (hfig, 1.45*FIG DX, 1.45*FIG DY, FIG NAME, FORMATO);
  FCN_SAVE_FIGURES(hfig,1.45*FIG_DX,1.45*FIG_DY,FIG_NAME,FORMATO);
end
§_____
% GENERACIÓN DE DATOS DE SALIDA.
    _____
% Puntero ("handler") de la figura creada.
SALIDA=hfig;
```

## 7.15 Código "FCN\_SAVE\_FIGURES".

```
function [CTROL]=FCN_SAVE_FIGURES(HFIG, DX, DY, ARC, FORMATO)
% FUNCIÓN "FCN_SAVE_FIGURES.m"
§ _____
                        _____
% Función de guardado de figuras con formato acorde a los distintos tipos
% de documentos donde van a ser utilizadas.
% El archivo con la figura creada se alojará en la misma carpeta donde se
% úbique el programa de llamada a la función.
8
% [CTROL]=FCN SAVE FIGURES(HFIG, DX, DY, ARC, FORMATO)
Ŷ
8
  Variables de salida:
8
  _____
8
   - CTROL: indicación de solución obtenida correctamente.
      -> CTROL==1 <--> Solución válida
2
2
      -> CTROL==0 <--> Solución no válida
8
  Variables de entrada:
2
8
  _____
8
   - HFIG: identificador de figura a guardar.
   - DX: anchura de la figura en el documento (cm).
2
8
   - DY: altura de la figura en el documento (cm).
8
   - ARC: nombre del archivo con el que guardar la figura.
   - FORMATO: extensión del archivo con el que guardar la figura.
8
      -> FORMATO==0 <--> '.emf'
8
      -> FORMATO==1 <--> '.png'
8
      -> FORMATO==2 <--> '.pdf'
8
      -> FORMATO==3 <--> '.eps'
8
2
% Víctor López Pérez.
% Jose Ángel Miguel Díaz.
% Universidad de Cantabria 2021.
§ _____
                            _____
%
olo
<u>%</u>
% DEFINICIÓN DE VARIABLES DE USO.
8 -
    % Extensión del archivo a guardar.
switch FORMATO
   case 0
      EXTENSION='.emf';
      CODIGO='-dmeta';
   case 1
      EXTENSION='.png';
      CODIGO='-dpng';
   case 2
      EXTENSION='.pdf';
      CODIGO='-dpdf';
   case 3
      EXTENSION='.eps';
      CODIGO='-deps';
   otherwise
      EXTENSION='.emf';
      CODIGO='-dmeta';
      disp(' ');
      disp('WARNING: ');
      disp('No se ha indicado un formato de archivo válido');
      disp('El formato por defecto es .emf');
      disp(' ');
end
```

```
% Ubicación del archivo.
FILE PATH=strcat(pwd, '\', ARC, EXTENSION);
oc
% DEFINICIÓN DE TAMAÑO DE LA FIGURA A ALMACENAR.
oc
% Unidades de medida de archivo de salida.
set(HFIG, 'PaperUnits', 'centimeters');
% Dimensiones de archivo de salida.
set(HFIG, 'PaperSize', [DX DY]);
% Ubicación de la figura en el archivo.
% La figura se ha posicionado de forma que ocupe todo el espacio reservado
% para el archivo, evitando la aparición de bordes blancos a los lados de
% la imagen guardada.
set(HFIG, 'PaperPositionMode', 'manual');
set(HFIG, 'PaperPosition', [0 0 DX DY]);
% Método de renderizado de la imagen a guardar.
% La opción 'painters' está recomendada para gráficos en 2-D, no siendo
% óptima para el caso de figuras en 3-D.
set(HFIG, 'renderer', 'painters');
% Copia de la figura en el archivo.
print(HFIG, ARC, CODIGO, '-r600');
06
                                                 _____
% INDICACIÓN POR PANTALLA DE UBICACIÓN DEL ARCHIVO GUARDADO.
% _____
                                _____
% Aviso al usuario por pantalla.
disp(' ');
disp('Una imagen ha sido guardada en la ubicación:');
fprintf('%s \n',FILE_PATH);
disp(' ');
```

```
end
```