

Índice

Resumen	VII
Resum	IX
Abstract	XI
1. Introducción	1
1.1. Motivación y Objetivos de la Tesis	1
1.2. Revisión Bibliográfica	3
1.3. Estructura de la Tesis	3
2. Contribuciones al Análisis Eficiente de Uniones Planares Complejas	7
2.1. Introducción	7
2.2. Análisis de Uniones Planares mediante la Técnica de la Ecuación Integral .	9
2.2.1. Aceleración del cálculo del núcleo de la ecuación integral	14
2.2.2. Resolución de la ecuación integral planteada	17
2.3. Discontinuidades entre Guías Rectangulares y Guías Coaxiales	20
2.3.1. Obtención de los modos de una guía coaxial utilizando el método de los momentos	21
2.3.2. Análisis de la unión planar entre una guía rectangular y una guía coaxial	34
2.3.3. Ejemplos de validación	39
2.4. Discontinuidades entre Guías Rectangulares y Guías Circulares	42
2.4.1. Obtención de los modos de una guía circular utilizando el método de los momentos	43
2.4.2. Análisis de la unión planar entre una guía rectangular y una guía circular	55
2.4.3. Ejemplos de validación	58
2.5. Discontinuidades entre Guías Coaxiales	60
2.5.1. Análisis de la unión planar entre dos guías coaxiales concéntricas .	61
2.5.2. Ejemplos de validación	65
2.6. Discontinuidades Múltiples entre Guías Rectangulares	67
2.6.1. Análisis de una discontinuidad múltiple entre guías rectangulares .	69

2.6.2.	Discontinuidades múltiples en estructuras inductivas implementadas en guía rectangular	71
2.6.3.	Ejemplos de validación	72
3.	Análisis y Diseño de Uniones Multi-Puerto en Guía Rectangular Compensadas con Postes Cilíndricos de Geometría Arbitraria	75
3.1.	Introducción	75
3.2.	Generalización del Método BI-RME 3D para el Análisis de Uniones Compensadas en Guía Rectangular	76
3.2.1.	Revisión del método BI-RME 3D	77
3.2.2.	Análisis multimodal eficiente de uniones multi-puerto compensadas en guía rectangular	81
3.3.	Ejemplos de Aplicación	94
3.3.1.	Codos rectos en plano H y en plano E	95
3.3.2.	Uniones en T en plano H y en plano E	100
3.3.3.	Uniones en T mágica	106
3.3.4.	Uniones <i>turnstile</i>	108
4.	Análisis Riguroso de la Excitación Coaxial de Dispositivos en Guía de Ondas	113
4.1.	Introducción	113
4.2.	Análisis Multimodal de la Excitación Coaxial de Dispositivos en Configuración Clásica mediante el Método BI-RME 3D	119
4.2.1.	Cálculo de los elementos de la matriz G	122
4.2.2.	Cálculo de los elementos de la matriz T	129
4.2.3.	Cálculo de los elementos de la matriz L	142
4.2.4.	Cálculo de los elementos de la matriz F	145
4.2.5.	Ejemplos de validación	150
4.3.	Análisis Multimodal de la Excitación Coaxial de Dispositivos en Configuración Colineal mediante el Método BI-RME 3D	159
4.3.1.	Cálculo de los elementos de la matriz G	162
4.3.2.	Cálculo de los elementos de la matriz T	165
4.3.3.	Cálculo de los elementos de la matriz L	175
4.3.4.	Cálculo de los elementos de la matriz F	175
4.3.5.	Ejemplos de validación	176
5.	Herramienta de Análisis de Filtros y Dispositivos en Configuración <i>Comb-Line</i>	185
5.1.	Introducción	185
5.2.	Descripción de la Herramienta Implementada	187
5.3.	Fundamentos Teóricos	194
5.4.	Ejemplos de Aplicación	201
5.4.1.	Validación de la herramienta de la etapa 3	202
5.4.2.	Validación de la herramienta de la etapa 4	206
5.4.3.	Validación de la herramienta de la etapa 5	212
5.4.4.	Otros ejemplos de validación	216

6. Conclusiones	223
6.1. Conclusiones y Principales Aportaciones	223
6.2. Líneas Futuras de Investigación	225
APÉNDICES	227
A. Matrices P y Q del Cálculo de los Modos de una Guía Coaxial usando el Método de los Momentos	227
A.1. Modos TM^z	227
A.2. Modos TE^z	229
B. Matrices P y Q del Cálculo de los Modos de una Guía Circular usando el Método de los Momentos	233
B.1. Modos TM^z	233
B.2. Modos TE^z	235
C. Análisis Modal de Guías y Cavidades Rectangulares	239
C.1. Funciones Vectoriales Modales de Campo Magnético de una Guía Rectangular	239
C.2. Funciones de Green de tipo Magnético de una Cavidad Rectangular	241
D. Series y Funciones Auxiliares utilizadas en el Análisis de Uniones Compensadas	243
D.1. Series utilizadas en el Análisis de Uniones Compensadas	243
D.2. Funciones Auxiliares utilizadas en el Análisis de Uniones Compensadas	244
E. Conexión de Matrices de Impedancias y Admitancias Generalizadas	247
F. Series Auxiliares utilizadas en el Análisis de la Excitación Coaxial de Dispositivos	251
G. Integrales Auxiliares utilizadas en el Análisis de la Excitación Coaxial de Dispositivos	255
G.1. Excitación Coaxial de Dispositivos en Configuración Clásica	255
G.2. Excitación Coaxial de Dispositivos en Configuración Colineal	257
H. Publicaciones realizadas relacionadas con la Tesis Doctoral	263

Índice de Figuras

2.1. Unión planar entre dos guías de onda de sección transversal arbitraria.	10
2.2. Red multimodal equivalente que caracteriza a una unión planar entre dos guías de onda de sección transversal arbitraria mediante la técnica de la ecuación integral. .	14
2.3. Sección transversal de una guía coaxial de radios externo r_1 e interno r_2 . Se asume que la permitividad dieléctrica relativa es ϵ_r y que la permeabilidad magnética relativa es μ_r	21
2.4. Unión planar entre una guía rectangular de dimensiones a y b , y una guía coaxial de radio externo r_1 y radio interno r_2 . Los parámetros (x_s, y_s) sitúan el centro de la guía coaxial con respecto a la esquina inferior derecha de la guía rectangular. . . .	36
2.5. Módulo en dB del parámetro de transmisión S_{21} relativo a una unión planar entre una guía rectangular WR-75 ($a = 19,05$ mm, $b = 9,525$ mm) y una guía coaxial ($r_1 = 1,9$ mm, $r_2 = 0,6$ mm, $\epsilon_r = 1,7$). La guía coaxial se encuentra en una posición centrada con respecto a la guía rectangular. El modo de excitación es el modo TM_{11}^z de la guía rectangular WR-75 y el modo de respuesta es el modo TEM^z de la guía coaxial.	40
2.6. Módulo en dB del parámetro de transmisión S_{21} relativo a una unión planar entre una guía rectangular WR-75 ($a = 19,05$ mm, $b = 9,525$ mm) y una guía coaxial ($r_1 = 1,9$ mm, $r_2 = 0,6$ mm, $\epsilon_r = 1,7$). La guía coaxial se encuentra descentrada con respecto a la guía rectangular ($x_s = 4,25$ mm, $y_s = 6,0$ mm). El modo de excitación es el modo TM_{11}^z de la guía rectangular WR-75 y el modo de respuesta es el modo TEM^z de la guía coaxial.	41
2.7. Módulo en dB del parámetro de transmisión S_{21} relativo a una unión planar entre una guía rectangular WR-90 ($a = 22,90$ mm, $b = 10,20$ mm) y una guía coaxial ($r_1 = 3,2$ mm, $r_2 = 0,9$ mm, $\epsilon_r = 1,0$). La guía coaxial se encuentra centrada con respecto a la guía rectangular. El modo de excitación es el modo TM_{11}^z de la guía rectangular WR-90 y el modo de respuesta es el modo TEM^z de la guía coaxial. . .	42
2.8. Sección transversal de una guía circular de radio r_1	44
2.9. Unión planar entre una guía rectangular de dimensiones a y b , y una guía circular de radio r_1 . Los parámetros (x_s, y_s) sitúan el centro de la guía circular con respecto a la esquina inferior derecha de la guía rectangular.	55

2.10. Módulo en dB del parámetro de transmisión S_{21} relativo a una unión planar entre una guía rectangular WR-75 ($a = 19,05$ mm, $b = 9,525$ mm) y una guía circular de radio $r_1 = 3,0$ mm ($\varepsilon_r = 8,0$). La guía circular se encuentra centrada con respecto a la guía rectangular.	58
2.11. Módulo en dB del parámetro de transmisión S_{21} relativo a una unión planar entre una guía rectangular WR-90 ($a = 22,90$ mm, $b = 10,20$ mm) y una guía circular de radio $r_1 = 2,7$ mm ($\varepsilon_r = 14,0$). La guía circular se encuentra centrada con respecto a la guía rectangular.	59
2.12. Módulo en dB del parámetro de transmisión S_{21} relativo a una unión planar entre una guía rectangular WR-90 ($a = 22,90$ mm, $b = 10,20$ mm) y una guía circular de radio $r_1 = 2,7$ mm ($\varepsilon_r = 14,0$). La guía circular se encuentra descentrada con respecto a la guía rectangular ($x_s = 6,45$ mm, $y_s = 3,1$ mm).	60
2.13. Unión planar entre dos guías coaxiales concéntricas (a) y (b) de radios externos $r_1^{(a)}$ y $r_1^{(b)}$, y de radios internos $r_2^{(a)}$ y $r_2^{(b)}$, respectivamente.	61
2.14. Módulo en dB del parámetro de reflexión S_{11} relativo a una unión planar entre dos guías coaxiales (a) y (b). Las dimensiones de las guías son las siguientes: $r_1^{(a)} = 6,0$ mm, $r_2^{(a)} = 0,65$ mm, $r_1^{(b)} = 5,0$ mm y $r_2^{(b)} = 2,65$ mm ($\varepsilon_r^{(a)} = \varepsilon_r^{(b)} = 1,0$). Los resultados de la simulación se comparan con los proporcionados por el método directo descrito en [36].	66
2.15. Módulo en dB del parámetro de reflexión S_{11} relativo a una unión planar entre dos guías coaxiales (a) y (b). Las dimensiones de las guías son las siguientes: $r_1^{(a)} = 8,6$ mm, $r_2^{(a)} = 0,65$ mm, $r_1^{(b)} = 5,0$ mm y $r_2^{(b)} = 1,42$ mm ($\varepsilon_r^{(a)} = 4,25$ y $\varepsilon_r^{(b)} = 7,2$). Los resultados de la simulación se comparan con los proporcionados por el método directo descrito en [36].	66
2.16. Módulo en dB del parámetro de transmisión S_{21} relativo a una unión planar entre dos guías coaxiales (a) y (b). Las dimensiones de las guías son las siguientes: $r_1^{(a)} = 15,2$ mm, $r_2^{(a)} = 7,41$ mm, $r_1^{(b)} = 11,5$ mm y $r_2^{(b)} = 9,24$ mm ($\varepsilon_r^{(a)} = 2,33$ y $\varepsilon_r^{(b)} = 15,1$). Los resultados de la simulación se comparan con los proporcionados por el método directo descrito en [36].	67
2.17. Discontinuidad múltiple entre guías rectangulares.	68
2.18. Vista en planta de una discontinuidad múltiple en una estructura inductiva implementada en guía rectangular.	71
2.19. Vista en planta de una discontinuidad múltiple en una estructura inductiva implementada en guía rectangular.	72
2.20. Módulo en dB de los parámetros de dispersión de la estructura inductiva implementada en guía rectangular cuya vista en planta se detalla en la figura 2.19. Comparación con los resultados proporcionados por HFSS.	73
2.21. Vista en planta de un filtro inductivo de tres resonadores implementados en guía estándar WR-12 con inserciones metálicas en plano E . Las dimensiones del filtro se han extraído de [45].	74
2.22. Módulo en dB del parámetro S_{21} del filtro inductivo con inserciones metálicas en plano E de la figura 2.21. Comparación de los resultados obtenidos utilizando la técnica de la ecuación integral con los datos experimentales extraídos de [45].	74

3.1. Uniones multi-puerto en guía rectangular compensadas con un poste conductor cilíndrico de altura variable situado en una posición arbitraria. (a) Codo recto en plano H ; (b) codo recto en plano E con un iris de acoplo en uno de los puertos; (c) unión en T en plano H ; (d) unión en T en plano E con un iris de acoplo en uno de los puertos; (e) unión T-mágica con un iris de acoplo en uno de los puertos; (f) unión <i>turnstile</i>	82
3.2. Geometría básica bajo análisis: unión en guía rectangular de 5 puertos cargada con un poste conductor cilíndrico de altura arbitraria situado en la base de la cavidad en la posición $(x_0, 0, z_0)$	83
3.3. Representación de los sistemas de coordenadas utilizados para los puertos de acceso $\xi = 3, 4, 5$	85
3.4. Pérdidas de retorno de un codo recto en plano H implementado en guía rectangular WR-90 compensado con un poste conductor cilíndrico ($r = 0,5$ mm, $h = 9,0$ mm). Comparación del caso en el que el poste está en una posición descentrada ($x_0 = 9,45$ mm, $z_0 = 17,45$ mm) con el caso centrado.	96
3.5. Pérdidas de retorno de un codo recto en plano H implementado en guía rectangular WR-90 compensado con un poste conductor cilíndrico ($r = 0,5$ mm, $h = 9,0$ mm). Influencia de la posición relativa del poste en la respuesta en frecuencia de la estructura.	96
3.6. Pérdidas de retorno de un codo recto en plano H implementado en guía rectangular WR-90 compensado con un poste conductor cilíndrico ($h = 9,0$ mm) situado en una posición descentrada ($x_0 = 9,45$ mm, $z_0 = 17,45$ mm). Influencia del radio del poste en la respuesta en frecuencia de la estructura.	97
3.7. Pérdidas de retorno de un codo recto en plano H implementado en guía rectangular WR-90 compensado con un poste conductor cilíndrico ($r = 0,5$ mm) situado en una posición descentrada ($x_0 = 9,45$ mm, $z_0 = 17,45$ mm). Influencia de la altura del poste en la respuesta en frecuencia de la estructura.	98
3.8. Pérdidas de retorno de un codo recto en plano E implementado en guía rectangular WR-90 compensado con un poste conductor cilíndrico ($r = 3,75$ mm, $h = 1,5$ mm) en posición descentrada ($x_0 = 11,45$ mm, $z_0 = 4,10$ mm). En el puerto (5) del codo se ha introducido un iris de adaptación ($h_{\text{iris}} = 7,0$ mm, $l_{\text{iris}} = 20,5$ mm, $t_{\text{iris}} = 1,5$ mm).	99
3.9. Pérdidas de retorno de un codo recto en plano E implementado en guía rectangular WR-90 compensado con un poste conductor cilíndrico ($h = 1,5$ mm) situado en una posición descentrada. En el puerto (5) del codo se ha introducido un iris de adaptación. Influencia del radio del poste en la respuesta en frecuencia de la estructura.	100
3.10. Pérdidas de retorno de un codo recto en plano E implementado en guía rectangular WR-90 compensado con un poste conductor cilíndrico ($r = 3,75$ mm) situado en una posición descentrada ($x_0 = 11,45$ mm, $z_0 = 4,10$ mm). En el puerto (5) del codo se ha introducido un iris de adaptación. Influencia de la altura del poste en la respuesta en frecuencia de la estructura.	101
3.11. Pérdidas de retorno de un codo recto en plano E implementado en guía rectangular WR-90 compensado con un poste situado en una posición descentrada. Influencia de la altura a la que se sitúa el iris (h_{iris}) en la respuesta en frecuencia de la estructura.	101

3.12. Pérdidas de retorno de un codo recto en plano E implementado en guía rectangular WR-90 compensado con un poste situado en una posición descentrada. Influencia de la longitud del iris (l_{iris}) en la respuesta en frecuencia de la estructura.	102
3.13. Parámetros de dispersión de una unión en T en plano H en guía WR-75 compensada con un poste cilíndrico ($r = 0,254$ mm, $h = 7,62$ mm). Comparación entre el caso en que el poste está centrado con el caso en que está descentrado ($x_0 = 9,525$ mm, $z_0 = 12,525$ mm). Los resultados obtenidos para el caso en que el poste está centrado se comparan con los datos presentados en [59].	103
3.14. Pérdidas de retorno de una unión en T en plano H en guía WR-75 compensada con un poste cilíndrico ($r = 0,254$ mm, $h = 7,62$ mm) situado en la posición ($x_0 = a/2, z_0$). Influencia de la posición relativa del poste en la respuesta en frecuencia del divisor.	104
3.15. Parámetros de dispersión de una unión en T en plano H en guía WR-28 compensada con un poste cilíndrico ($r = 0,635$ mm, $h = 3,048$ mm). Comparación entre el caso en que el poste está centrado con el caso en que está descentrado ($x_0 = 9,525$ mm, $z_0 = 5,362$ mm). Los resultados obtenidos para el caso en que el poste está centrado se comparan con los datos presentados en [59].	105
3.16. Parámetros de dispersión de una unión en T en plano E en guía WR-75 compensada con un poste cilíndrico ($r = 2,9$ mm, $h = 4,65$ mm) situado en una posición centrada. En el puerto (5) se ha introducido un iris de adaptación ($h_{\text{iris}} = 1,5$ mm, $l_{\text{iris}} = 15,3$ mm, $t_{\text{iris}} = 1,25$ mm).	105
3.17. Parámetros de dispersión de una unión en T mágica sin compensar implementada en guía rectangular WR-90. Comparación con las medidas experimentales extraídas de [9]. (a) Parámetros de reflexión. (b) Parámetros de transmisión.	107
3.18. Parámetros de dispersión de una unión en T mágica implementada en la guía rectangular WR-90 compensada con un poste situado en posición centrada ($r = 0,65$ mm, $h = 9,5$ mm). En el puerto (5) de la estructura se ha introducido un iris de adaptación ($h_{\text{iris}} = 4,0$ mm, $l_{\text{iris}} = 16,11$ mm, $t_{\text{iris}} = 1,5$ mm). (a) Parámetros de reflexión. (b) Parámetros de transmisión.	108
3.19. Parámetros de dispersión de una unión en T mágica implementada en la guía rectangular WR-90 compensada con un poste ($r = 0,65$ mm, $h = 9,5$ mm) situado en posición descentrada ($x_0 = a/2, z_0 = 14,45$ mm). En el puerto (5) de la estructura se ha introducido un iris de adaptación ($h_{\text{iris}} = 4,0$ mm, $l_{\text{iris}} = 16,11$ mm, $t_{\text{iris}} = 1,5$ mm). (a) Parámetros de reflexión. (b) Parámetros de transmisión.	109
3.20. Parámetros de dispersión de una unión <i>turnstile</i> sin compensar implementada en la guía rectangular WR-62. La guía circular es de radio $\rho = 6,99$ mm. Comparación con los resultados presentados en [10].	110
3.21. Parámetros de dispersión de una unión <i>turnstile</i> compensada (poste centrado; $r = 2,8$ mm, $h = 3,7$ mm) implementada en la guía rectangular WR-62. La guía circular es de radio $\rho = 6,99$ mm. El caso (a) se corresponde con la unión sin compensar, mientras que el caso (b) se corresponde con la unión compensada. Los resultados de la simulación se comparan con HFSS.	111

4.1. Excitación clásica de dispositivos implementados en guía rectangular mediante sonda coaxial terminada en disco.	114
4.2. Excitación de dispositivos implementados en guía rectangular mediante sonda coaxial en configuración colineal.	115
4.3. Vistas frontal y lateral de la excitación coaxial clásica de una guía rectangular semi-infinita mediante sonda terminada en disco.	119
4.4. Vista superior de la excitación clásica de dispositivos implementados en guía rectangular. Representación del sistema de referencia en coordenadas cilíndricas utilizado.	120
4.5. Vista frontal de la cavidad perturbada obtenida tras cortocircuitar los puertos de acceso de la estructura bajo análisis. La cavidad rectangular es de longitud c (en el eje \hat{z}).	121
4.6. Pérdidas de retorno para una guía rectangular semi-infinita implementada en la guía estándar WR-62 excitada mediante sonda coaxial convencional ($r_1 = 1,6764$ mm, $r_2 = 0,635$ mm, $Z_0 = 50 \Omega$, $d_z = 5,0$ mm, $d_x = a/2$). En la figura se estudian dos casos en función del valor de la profundidad de penetración de la sonda h_p . Los resultados de la simulación se comparan con los datos experimentales presentados en [17].	151
4.7. Estudio de convergencia para el módulo del parámetro S_{11} ($f = 15$ GHz) relativo a la estructura simulada en la figura 4.6 con $h_p = 1,2954$ mm. El estudio se realiza en función del número de modos $Q^{\text{TE}} = Q^{\text{TM}}$ utilizados en la guía rectangular de expansión.	152
4.8. Pérdidas de retorno para una guía rectangular semi-infinita implementada en la guía estándar WR-75 excitada mediante sonda coaxial convencional ($r_1 = 3,18$ mm, $r_2 = 0,3$ mm, $\varepsilon_r = 2,09$, $h_p = 4,7625$ mm, $d_z = 6,8$ mm, $d_x = a/2$). Los resultados de la simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	152
4.9. Pérdidas de retorno para una guía rectangular semi-infinita ($a = 57,04$ mm, $b = 28,8$ mm) excitada mediante sonda coaxial convencional ($r_1 = 2,12$ mm, $r_2 = 0,635$ mm, $\varepsilon_r = 2,09$, $h_p = 14,4$ mm, $d_z = 19,2$ mm, $d_x = a/2$). Los resultados de la simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	153
4.10. Pérdidas de retorno para una guía rectangular semi-infinita implementada en la guía estándar WR-90 excitada mediante sonda coaxial convencional ($r_1 = 3,45$ mm, $r_2 = 0,55$ mm, $\varepsilon_r = 2,09$, $h_p = 5,5$ mm, $d_z = 8,6$ mm, $d_x = a/2$). Los resultados de la simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	154
4.11. Pérdidas de retorno para una guía rectangular semi-infinita implementada en la guía estándar WR-75 excitada mediante una sonda coaxial terminada en disco ($r_1 = 3,18$ mm, $r_2 = 0,3$ mm, $\varepsilon_r = 2,09$, $h_p = 4,7625$ mm, $h_d = 1,5$ mm, $d_z = 6,8$ mm, $d_x = a/2$). Los resultados de la simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	155

4.12. Pérdidas de retorno para una guía rectangular semi-infinita implementada en la guía estándar WR-137 excitada mediante una sonda coaxial terminada en disco ($r_1 = 4,8768$ mm, $r_2 = 1,524$ mm, $r_d = 4,0$ mm, $h_p = 3,4$ mm, $h_d = 4,5$ mm, $Z_0 = 50 \Omega$, $d_z = 11,6$ mm, $d_x = a/2$). Los resultados de la simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS y con los datos extraídos de [19]. En la misma figura se presenta en trazo punteado la respuesta de una sonda coaxial convencional con $h'_p = 7,9$ mm.	156
4.13. Estudio de convergencia para el módulo del parámetro S_{11} ($f = 7,5$ GHz) relativo a la estructura simulada en la figura 4.12. El estudio se realiza en función del número de modos $Q^{\text{TE}} = Q^{\text{TM}}$ utilizados en la guía rectangular de expansión.	157
4.14. Pérdidas de retorno de la estructura analizada en la figura 4.12 en función de la distancia normalizada $d_z/(\lambda_g/4)$ a la pared cortocircuitada de la guía rectangular. Los resultados se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	157
4.15. Filtro inductivo de 7 cavidades excitado mediante sonda coaxial convencional. . .	158
4.16. Pérdidas de retorno asociadas al filtro inductivo excitado mediante sonda coaxial representado en la figura 4.15.	159
4.17. Excitación coaxial en configuración colineal de dispositivos implementados en guía rectangular.	160
4.18. Vistas lateral y frontal del bloque básico relativo a la excitación coaxial en configuración colineal de dispositivos implementados en guía rectangular.	161
4.19. Sistema de referencia en coordenadas cilíndricas utilizado en el análisis de la excitación coaxial en configuración colineal de dispositivos implementados en guía rectangular.	162
4.20. Estructura utilizada para validar la herramienta de análisis de la excitación coaxial de dispositivos en configuración colineal. En este primer ejemplo, se abren los accesos (1) y (2) del bloque básico.	177
4.21. Parámetros de dispersión asociados a la estructura representada en la figura 4.20. Los datos obtenidos se comparan con los que proporciona HFSS.	178
4.22. Estructura utilizada para validar la herramienta de análisis de la excitación coaxial de dispositivos en configuración colineal. En este segundo ejemplo, se abren los accesos (1) y (3) del bloque básico.	178
4.23. Parámetros de dispersión asociados a la estructura representada en la figura 4.22. Los datos obtenidos se comparan con los que proporciona HFSS.	179
4.24. Estructura utilizada para validar la herramienta de análisis de la excitación coaxial de dispositivos en configuración colineal. En este tercer ejemplo, se abren los accesos (1), (2) y (3) del bloque básico.	179
4.25. Parámetros de dispersión asociados a la estructura representada en la figura 4.24. Los datos obtenidos se comparan con los que proporciona HFSS.	180
4.26. Estructura utilizada para validar la herramienta de análisis de la excitación coaxial de dispositivos en configuración colineal. En este cuarto ejemplo, se abren los accesos (1), (3) y (4) del bloque básico.	181
4.27. Parámetros de dispersión asociados a la estructura representada en la figura 4.26. Los datos obtenidos se comparan con los que proporciona HFSS.	181

4.28. Estructura utilizada para validar la herramienta de análisis de la excitación coaxial de dispositivos en configuración colineal. En este quinto ejemplo, se abren los 4 accesos del bloque básico.	182
4.29. Parámetros de dispersión asociados a la estructura representada en la figura 4.28. Los datos obtenidos se comparan con los que proporciona HFSS.	182
4.30. Vistas lateral y superior de la conexión del bloque básico de la figura 4.17 con una guía rectangular de dimensiones $a^{(2)} \times b^{(2)}$ a través de un iris rectangular de sección transversal $a^{(1)} \times b^{(1)}$ y longitud l_{iris}	183
4.31. Parámetro de transmisión asociado a la estructura representada en la figura 4.30. Los datos obtenidos se comparan con los que proporciona HFSS.	184
5.1. Diplexor en configuración <i>comb-line</i> implementado en tecnología guiada. El dispositivo consta de 12 resonadores rectangulares cargados con postes conductores de geometría cilíndrica (realmente, se trata de 2 filtros, cada uno con 6 resonadores rectangulares).	186
5.2. Filtro genérico en configuración <i>comb-line</i> constituido por 10 resonadores y 2 puertos de acceso en guía coaxial. En tres de los resonadores se ha incluido un tornillo de sintonía.	188
5.3. Vista en planta y vista lateral de un resonador <i>comb-line</i> de dimensiones $a \times b \times c$ cargado con un poste conductor cilíndrico situado en la posición relativa $(-d_{x,c}, 0, d_{z,c})$	190
5.4. Vistas laterales de los diferentes tipos de postes conductores soportados por la herramienta de simulación: poste cilíndrico (arriba izquierda); poste en forma de champiñón (arriba derecha); y poste en forma de vaso (abajo).	191
5.5. Sistema de referencia utilizado para definir la posición relativa de los iris de acoplamiento entre resonadores <i>comb-line</i>	192
5.6. Vista en planta y vista lateral de un resonador <i>comb-line</i> con un tornillo de sintonía de radio r_t y altura h_t situado en la posición relativa $(d_{x,t}, b, d_{z,t})$	192
5.7. Puerto de acceso de sección transversal rectangular ($a_p \times b_p$) cuyas dimensiones no coinciden con las de la cara lateral del resonador ($a \times b$).	193
5.8. Puerto de acceso de sección transversal rectangular de dimensiones $a'_p \times b'_p$ a través de un iris de tipo rectangular de sección transversal $a_{ir,p} \times b_{ir,p}$ y longitud $l_{ir,p}$	194
5.9. Puerto de acceso mediante sonda coaxial terminada en disco. En caso de que $r_d = h_d = 0$ se obtiene la sonda coaxial convencional.	195
5.10. Conexión de todas las matrices multimodales implicadas en la caracterización del resonador (2, 2) del filtro <i>comb-line</i> genérico de la figura 5.2.	196
5.11. Matrices multimodales implicadas en la caracterización del resonador (2, 3) del filtro <i>comb-line</i> genérico de la figura 5.2.	197
5.12. Obtención de una MIG equivalente para la representación multimodal del resonador (2, 2) del filtro de la figura 5.2.	197
5.13. Interconexión de las MIG equivalentes para el filtro <i>comb-line</i> genérico de la figura 5.2.	198
5.14. Conexión de la MIG correspondiente a un resonador <i>comb-line</i> de 4 accesos con la MIG asociada a la unión planar que se produce al introducir el iris de acoplamiento.	199

5.15. Filtro <i>comb-line</i> de 4 cavidades con dos puertos de acceso, siendo uno de ellos de tipo coaxial y el otro de tipo rectangular. Esta estructura se utiliza para validar la herramienta de simulación relativa a la etapa 3.	202
5.16. Módulo del parámetro S_{21} para el filtro <i>comb-line</i> de la figura 5.15. Los resultados obtenidos con la herramienta de simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	203
5.17. Dispositivo <i>comb-line</i> de 7 cavidades con tres puertos de acceso, siendo dos de ellos de tipo coaxial y el otro de tipo rectangular. Esta estructura se utiliza para validar la herramienta de simulación relativa a la etapa 3.	204
5.18. Módulo de los parámetros S_{21} y S_{31} (líneas continuas) para el dispositivo <i>comb-line</i> de la figura 5.17. Los resultados obtenidos con la herramienta de simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	206
5.19. Dispositivo <i>comb-line</i> de 11 cavidades y 5 puertos de acceso. Esta estructura se utiliza para validar la herramienta de simulación relativa a la etapa 3.	207
5.20. Módulo de los parámetros de dispersión relativos al dispositivo <i>comb-line</i> de 11 cavidades y 5 puertos de acceso representado en la figura 5.19. (a) $ S_{21} $ (dB); (b) $ S_{31} $ (dB); (c) $ S_{41} $ (dB); (d) $ S_{51} $ (dB).	209
5.21. Fase de los parámetros de dispersión relativos al dispositivo <i>comb-line</i> de 11 cavidades y 5 puertos de acceso representado en la figura 5.19. (a) $\arg(S_{11})$ (grados); (b) $\arg(S_{21})$ (grados); (c) $\arg(S_{31})$ (grados); (d) $\arg(S_{41})$ (grados).	210
5.22. Filtro <i>comb-line</i> de 2 cavidades y 2 puertos de acceso, siendo uno de ellos de tipo coaxial y el otro de tipo rectangular. Esta estructura se utiliza para validar la herramienta de simulación relativa a la etapa 4.	211
5.23. Módulo del parámetro S_{21} para el filtro <i>comb-line</i> de la figura 5.22. Los resultados obtenidos con la herramienta de simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	211
5.24. Dispositivo <i>comb-line</i> de 8 cavidades y 3 puertos de acceso, siendo uno de ellos de tipo coaxial y dos de tipo rectangular. Esta estructura se utiliza para validar la herramienta de simulación relativa a la etapa 4.	212
5.25. Módulo de los parámetros S_{21} y S_{31} para el dispositivo <i>comb-line</i> de la figura 5.24. Los resultados obtenidos con la herramienta de simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	213
5.26. Fase de los parámetros de dispersión relativos al dispositivo <i>comb-line</i> de 8 cavidades y 3 puertos de acceso representado en la figura 5.24. (a) $\arg(S_{11})$ (grados); (b) $\arg(S_{21})$ (grados); (c) $\arg(S_{31})$ (grados).	214
5.27. Filtro <i>comb-line</i> de 2 cavidades y 2 puertos de acceso, siendo uno de tipo coaxial y el otro de tipo rectangular. Esta estructura se utiliza para validar la herramienta de simulación relativa a la etapa 5.	215
5.28. Módulo del parámetro S_{21} para el filtro <i>comb-line</i> de la figura 5.27. Los resultados obtenidos con la herramienta de simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	215

5.29. Dispositivo <i>comb-line</i> de 8 cavidades y 3 puertos de acceso, siendo uno de tipo coaxial y el resto de tipo rectangular. Esta estructura se utiliza para validar la herramienta de simulación relativa a la etapa 5.	216
5.30. Módulo de los parámetros de dispersión del dispositivo <i>comb-line</i> de la figura 5.29. Los resultados obtenidos con la herramienta de simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	217
5.31. Fase de los parámetros de dispersión relativos al dispositivo <i>comb-line</i> de 8 cavidades y 3 puertos de acceso representado en la figura 5.29. (a) $\arg(S_{11})$ (grados); (b) $\arg(S_{21})$ (grados); (c) $\arg(S_{31})$ (grados).	218
5.32. Filtro <i>comb-line</i> de 4 cavidades y 2 puertos de acceso de tipo coaxial. Los resonadores están cargados con postes conductores en forma de vaso y poseen todos ellos tornillos de sintonía.	219
5.33. Módulo del parámetro de transmisión S_{21} del filtro <i>comb-line</i> de la figura 5.32. Los resultados obtenidos con la herramienta de simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	219
5.34. Filtro <i>comb-line</i> de 6 cavidades en línea y 2 puertos de acceso de tipo coaxial. Las dimensiones del filtro se han extraído de [78]. Los resonadores están cargados con postes conductores de geometría cilíndrica.	220
5.35. Módulo de los parámetros de dispersión del filtro <i>comb-line</i> de la figura 5.34. Los resultados obtenidos con la herramienta de simulación se comparan con los datos proporcionados por HFSS.	221
E.1. Conexión de una matriz de admitancias generalizada y una matriz de impedancias generalizada.	247

Índice de Tablas

2.1.	Valores de los coeficientes $\beta_{r,m}$ ($r = 1, 2, 3$) para los modos TE^z y TM^z	16
2.2.	Comparación del número de onda de corte obtenido con la herramienta implementada con los resultados presentados en [28]. La guía coaxial analizada es de radio externo $r_1 = 1,6$ m y de radio interno $r_2 = 1,0$ m ($\epsilon_r = 1,0$). Los resultados presentados se refieren a los modos $TM_{s,q}^z$ con $(s, q) = (0, 1), (2, 1), (0, 2), (3, 2), (0, 3), (2, 3), (0, 4), (3, 4)$	28
2.3.	Comparación del número de onda de corte obtenido con la herramienta implementada con los resultados presentados en [40]. La guía coaxial analizada es de radio externo $r_1 = 1,2222$ m y de radio interno $r_2 = 1,0$ m ($\epsilon_r = 1,0$). Los resultados presentados se refieren a los modos $TM_{s,1}^z$ con $s = 1, 2, 5, 10, 100, 200$	29
2.4.	Convergencia del número de onda de corte expresado en rad/m de los modos $TM_{s,q}^z$ para una guía coaxial de radio externo $r_1 = 1,6$ m y de radio interno $r_2 = 1,0$ m ($\epsilon_r = 1,0$) en función del número de términos N_ρ considerados en la expansión radial de la solución modal. Los índices modales analizados son $(s, q) = (0, 1), (2, 1), (0, 2), (3, 2), (0, 3), (2, 3), (0, 4), (3, 4)$	29
2.5.	Comparación del número de onda de corte obtenido con la herramienta implementada con los resultados presentados en [28]. La guía coaxial analizada es de radio externo $r_1 = 1,6$ m y de radio interno $r_2 = 1,0$ m ($\epsilon_r = 1,0$). Los resultados presentados se refieren a los modos $TE_{s,q}^z$ con $(s, q) = (0, 2), (2, 2), (0, 3), (3, 3), (0, 4), (2, 4), (0, 5), (3, 5)$	34
2.6.	Comparación del número de onda de corte obtenido con la herramienta implementada con los resultados presentados en [40]. La guía coaxial analizada es de radio externo $r_1 = 1,0202$ m y de radio interno $r_2 = 1,0$ m ($\epsilon_r = 1,0$). Los resultados presentados se refieren a los modos $TE_{s,2}^z$ con $s = 1, 2, 5, 10, 100, 200$	34
2.7.	Convergencia del número de onda de corte de los modos $TE_{s,q}^z$ expresado en rad/m para una guía coaxial de radio externo $r_1 = 1,6$ m y de radio interno $r_2 = 1,0$ m ($\epsilon_r = 1,0$) en función del número de términos N_ρ considerados en la expansión radial de la solución modal. Los índices modales de los modos analizados son: $(s, q) = (0, 2), (2, 2), (0, 3), (3, 3), (0, 4), (2, 4), (0, 5), (3, 5)$	35
2.8.	Número de onda de corte relativo a los modos $TM_{s,1}^z$ ($s = 0, 1, 2, 5, 6, 7, 8$) de una guía circular de radio $r_1 = 1,0$ m. Los resultados obtenidos con la herramienta implementada se comparan con los datos que se recogen en [44].	49

2.9. Estudio de convergencia para el número de onda de corte expresado en rad/m de los modos $TM_{s,1}^z$ ($s = 0, 1, 2, 5, 6, 7, 8$) de una guía circular de radio $r_1 = 1,0$ m en función del número de términos N_ρ considerados en la expansión radial de la solución modal.	50
2.10. Número de onda de corte relativo a los modos $TE_{s,3}^z$ ($s = 0, 1, 2, 5, 6, 7, 8$) de una guía circular de radio $r_1 = 1,0$ m. Los resultados obtenidos con la herramienta implementada se comparan con los datos extraídos de [44].	54
2.11. Estudio de convergencia para el número de onda de corte expresado en rad/m de los modos $TE_{s,3}^z$ ($s = 0, 1, 2, 5, 6, 7, 8$) de una guía circular de radio $r_1 = 1,0$ m en función del número de términos N_ρ considerados en la expansión radial de la solución modal.	54
3.1. Definición de las matrices del método BI-RME 3D.	80
4.1. Valores de las anchuras y de las longitudes de las 17 guías rectangulares que integran el filtro inductivo excitado mediante sonda coaxial convencional representado en la figura 4.15 (se asume que las guías se numeran de izquierda a derecha). La altura de todas las guías que integran la estructura se mantiene constante e igual a $b = 12,624$ mm.	158
5.1. Dimensiones y posición relativa (mm) de los postes conductores de geometría cilíndrica del filtro <i>comb-line</i> de 4 resonadores de la figura 5.15.	202
5.2. Dimensiones y posición relativa (mm) de los iris de acoplamiento del filtro <i>comb-line</i> de 4 resonadores de la figura 5.15.	203
5.3. Dimensiones y posición relativa (mm) de los postes conductores de geometría cilíndrica del dispositivo <i>comb-line</i> de 7 resonadores de la figura 5.17.	205
5.4. Dimensiones y posición relativa (mm) de los iris de acoplamiento del dispositivo <i>comb-line</i> de 7 resonadores de la figura 5.17.	205
5.5. Dimensiones y posición relativa (mm) de los postes conductores de geometría cilíndrica del dispositivo <i>comb-line</i> de 11 resonadores de la figura 5.19.	207
5.6. Dimensiones y posición relativa (mm) de los iris de acoplamiento del dispositivo <i>comb-line</i> de 11 resonadores de la figura 5.19.	208
5.7. Dimensiones y posición relativa (mm) de los postes conductores de geometría cilíndrica del dispositivo <i>comb-line</i> de 8 resonadores de la figura 5.24.	212
5.8. Dimensiones y posición relativa (mm) de los postes conductores en forma de vaso del dispositivo <i>comb-line</i> de 8 resonadores de la figura 5.24.	212
5.9. Dimensiones y posición relativa (mm) de los postes conductores en forma de champiñón del dispositivo <i>comb-line</i> de 8 resonadores de la figura 5.24.	213
5.10. Dimensiones y posición relativa (mm) de los tornillos de sintonía del dispositivo <i>comb-line</i> de 8 resonadores de la figura 5.24.	213
5.11. Dimensiones (mm) de los iris de sección transversal circular del dispositivo <i>comb-line</i> de 8 resonadores de la figura 5.29.	216

5.12. Dimensiones (mm) del filtro *comb-line* de 6 resonadores en línea de la figura 5.34.
Se asume que el iris de cada resonador es el que se conecta al puerto local (2) de
dicho resonador. 220

