

# Índice

<b>1. Introducción</b> .....	19
1.1. Presentación .....	19
1.2. Objetivos .....	22
1.3. Estructura de la Tesis .....	22
<b>2. Caracterización Dieléctrica de Materiales</b> .....	25
2.1. Conceptos y definiciones .....	25
2.2. Técnicas de Medida.....	31
2.2.1. Placas Paralelas .....	31
2.2.2. Sondas Coaxiales .....	32
2.2.3. Líneas de Transmisión .....	34
2.2.4. Espacio Libre .....	35
2.2.5. Resonadores .....	37
<b>3. Métodos de Análisis Electromagnético</b> .....	49
3.1. Métodos Analíticos .....	51

3.1.1. Método de Separación de Variables .....	51
3.1.2. Método Perturbacional .....	52
3.2. Métodos Modales .....	54
3.2.1. Método de Adaptación Modal ( <i>mode-matching</i> ) .....	54
3.2.2. Métodos Circuitales con Matrices Generalizadas .....	56
3.2.2.1. Matriz de Inmitancia Generalizada (GAM y GIM) .....	57
3.2.2.2. Matriz de Dispersión Generalizada (GSM) .....	59
3.2.2.3. Análisis Circuital Generalizado (GCA) .....	62
3.3. Métodos basados en operadores diferenciales.....	64
3.3.1. Método de Diferencias Finitas (FD y FDTD) .....	65
3.3.2. Método de Elementos Finitos (FEM) .....	66
3.4. Métodos basados en operadores integrales.....	68
3.4.1. Método de los Momentos (MoM) .....	69
3.4.2. Método de la Ecuación Integral de Frontera (BIE) .....	70
<b>4. Análisis Circuital Generalizado de Onda Completa o <i>Full-Wave</i> -     <i>Generalized Circuit Analysis Full Wave (GCAFW)</i>.....</b>	<b>73</b>
4.1. Elementos básicos con puertos en superficie transversales.....	75
4.1.1. Elemento básico <i>Cyl2Cyl</i> .....	75
4.1.2. Elemento básico <i>Coax2Coax</i> .....	83
4.1.3. Elemento básico <i>Cyl2LittleCyl</i> .....	85
4.1.4. Elemento básico <i>Cyl2Ring</i> .....	92
4.1.5. Impedancia/Admitancia Característica en el puerto .....	93
4.2. Elementos básicos con puertos en superficies longitudinales .....	94
4.2.1. Elemento básico <i>Lat1</i> .....	94
4.2.2. Elemento básico <i>Lat2Lat</i> .....	99
4.2.3. Impedancia/Admitancia Característica en el puerto .....	104

---

4.3. Simulaciones y Validaciones .....	105
4.3.1. Verificación de Ajuste de las Funciones Base a los Campos Modales .....	105
4.3.2. Comparación de Parámetros Modales con Otros Métodos .....	111
4.3.3. Simulación de Cavidades Resonantes.....	112
4.3.3.1. Estructuras Analíticas .....	112
4.3.3.2. Cavity Circular con orificio.....	116
4.3.3.3. Cavity <i>Split</i> .....	118
4.3.3.4. Cavity Reentrante.....	120
4.4. Limitaciones del método .....	123
<b>5. Hibridación del Análisis Modal y el Análisis Circuital Generalizado –   <i>Mode-Matching Circuital Full-Wave (MMCFW)</i> .....</b>	<b>125</b>
5.1. Motivación y Principio de Funcionamiento.....	125
5.2. Campos en el interior de estructuras cilíndricas multicapa.....	131
5.3. Funciones Base .....	138
5.4. Caracterización de los elementos básicos .....	141
5.4.1. Elemento Externo.....	141
5.4.2. Elemento Interno.....	145
5.4.2.1. Elemento Interno con Cortocircuito en pared interna.....	147
5.4.3. Elemento Intermedio.....	147
5.4.4. Dimensionamiento de las matrices de caracterización modal.....	150
5.5. Conexión entre elementos básicos .....	152
5.5.1. Cálculo de las amplitudes de los campos .....	156
5.6. Caracterización de las pérdidas debido a las paredes conductoras.....	156
5.6.1. Modos TM.....	158
5.6.2. Modos TE.....	161
5.6.3. Modos Cruzados .....	164

5.6.4. Cálculo de parámetros indirectos .....	166
5.6.4.1. <i>Tangente de Pérdidas Dieléctricas <math>\tan\delta</math></i> .....	166
5.6.4.2. <i>Tangente de Pérdidas Magnéticas <math>\tan\delta_m</math></i> .....	167
5.6.4.3. <i>Conductividad del metal <math>\sigma</math></i> .....	168
5.7. Convergencia.....	169
5.7.1. Relación óptima de modos de los elementos básicos .....	170
5.7.2. Mínimo número de modos en cada elemento básico.....	172
5.7.3. Extrapolación asintótica para infinitos modos.....	172
5.8. Identificación y representación gráfica de modos resonantes .....	174
5.9. Simulaciones y Validaciones .....	181
5.9.1. Cavity Cargada Coaxialmente con 3 dieléctricos .....	182
5.9.2. Cavidades Cilíndrica y Coaxial Multicapa.....	183
5.9.3. Cavidades Cilíndricas Parcialmente Cargadas .....	184
5.9.3.1. <i>Dielectric Disk</i> .....	184
5.9.3.2. <i>Dielectric Ring</i> .....	187
5.9.3.3. <i>Sandwiched dielectric rod</i> .....	189
5.9.4. Cavidades Cilíndricas con orificio de inserción .....	190
5.9.5. Cavity <i>Split-Post Resonator</i> .....	192
5.9.6. Cavidades Reentrantes .....	194
5.10. Limitaciones .....	196
<b>6. Aplicaciones Experimentales .....</b>	<b>199</b>
6.1. Consideraciones en medidas experimentales .....	199
6.1.1. Medidas de frecuencia de resonancia y factor de calidad descargados .....	200
6.1.2. Cálculo de Incertidumbres en la medida .....	201
6.1.2.1. Incertidumbre directa .....	202
6.1.2.2. Incertidumbre indirecta .....	204

---

6.1.3. Procedimiento de medida de propiedades dieléctricas.....	205
6.2. Cálculo de propiedades dieléctricas utilizando todo tipo de modos en cavidades típicamente empleadas en dielectrometría .....	207
6.2.1. Cavidad <i>Split</i> .....	207
6.2.2. Cavidad Circular .....	209
6.2.3. Cavidad Circular con orificio para medida de <i>rods</i> .....	212
6.2.4. Cavidad Reentrante .....	213
6.3. Cavidades utilizadas en aplicaciones específicas de microondas.....	215
6.3.1. Cavidad circular orientada a calorimetría .....	216
6.3.2. Cavidad reentrante con orificio de inserción: equipo <i>dielectric kit (dielkit)</i> de viales .....	218
6.3.3. Cavidad bi-reentrante orientada a medida de líquidos con altas pérdidas...	222
<b>7. Conclusiones y Líneas Futuras .....</b>	<b>227</b>
7.1. Conclusiones .....	227
7.2. Líneas Futuras .....	229

## Apéndices

I. Expansión en Series de Funciones Base.....	231
II. Campos en Guías de Sección Circular.....	237
III. Funciones de Bessel.....	245
III.A. Expresiones Asintóticas .....	246
III.B. Integrales.....	247
III.C. Consideraciones MATLAB .....	249
IV. Método Modificado de Chebyshev para Búsqueda de Raíces Complejas.....	251
V. Integrales trigonométricas, hiperbólicas y exponenciales .....	257

*Índice*

---

<b>Software Implementado .....</b>	<b>271</b>
<b>Publicaciones .....</b>	<b>275</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>277</b>