

<b>Introducción</b> . . . . .	1
<b>Capítulo 1. Degradación del tiempo de subida de las interconexiones</b> . . . . .	5
1.1. Los problemas de propagación en las interconexiones . . . . .	5
1.1.1. La evolución de los circuitos digitales . . . . .	5
1.1.2. La evolución de la señal en las interconexiones . . . . .	7
1.1.3. Tiempo de propagación en las interconexiones . . . . .	8
1.1.3.1. Retraso de propagación en los circuitos integrados . . . . .	9
1.1.4. Dimensiones espectrales de las señales . . . . .	10
1.2. Comportamiento de los componentes a altas frecuencias . . . . .	12
1.2.1. Comportamiento de los cables de conexión . . . . .	12
1.2.2. Comportamiento de una resistencia en RF . . . . .	12
1.2.3. Comportamiento de una inductancia en RF . . . . .	13
1.2.4. Comportamiento de la capacitancia en RF . . . . .	14
1.2.5. Efectos de las pérdidas de los conductores: efecto piel . . . . .	15
1.3. Los efectos sobre la transmisión de señales en las interconexiones . . . . .	17
1.3.1. Filtrado a través del canal de transmisión . . . . .	17
1.3.2. Degradación del tiempo de subida en un canal de banda limitada . . . . .	18
1.3.3. Ejemplo de un filtro RC de pasabajas de primer orden . . . . .	19
1.3.4. Efectos de las pérdidas resistivas debidos al efecto piel . . . . .	20
1.3.5. Tiempo de subida de los circuitos en cascada . . . . .	22
1.3.6. Criterio de calidad de transmisión: diagrama de ojo . . . . .	23
1.4. Medición del tiempo de subida . . . . .	24
1.4.1. Diferentes definiciones del tiempo de subida . . . . .	24
1.4.2. Principio de medición . . . . .	24
1.4.3. Efecto de la sonda de medición . . . . .	25
1.5. Conclusión . . . . .	26

<b>Capítulo 2. Modelado electromagnético de interconexiones</b> . . . . .	27
2.1. Modelado global de la integridad de la señal . . . . .	27
2.1.1. Modelos ICEM e ICIM . . . . .	27
2.1.2. Modelos IBIS . . . . .	28
2.1.3. Características del búfer I/V. . . . .	29
2.2. Modelo RC de las interconexiones . . . . .	30
2.2.1. Modelo RC. . . . .	31
2.2.2. La constante de Elmore . . . . .	31
2.3. Modelización capacitiva e inductiva . . . . .	32
2.3.1. Modelado capacitivo . . . . .	33
2.3.2. Modelado inductivo . . . . .	34
2.3.2.1. Inductancia en el sentido de Maxwell. . . . .	35
2.3.2.2. Inductancia en el sentido de Kirchoff. . . . .	35
2.3.3. Aplicación a los circuitos de interconexión. . . . .	36
2.3.3.1. Inductancia y capacitancia lineal. . . . .	36
2.3.3.2. Inductancia y capacidad de acoplamiento . . . . .	37
2.4. Modelado de líneas LC . . . . .	38
2.5. Aplicación a encapsulados y MCM. . . . .	41
2.5.1. Diferentes tipos de encapsulados . . . . .	41
2.5.2. Módulos multichip (MCM) . . . . .	42
2.5.3. Modelado LC de encapsulados . . . . .	44
2.5.4. Simulaciones electromagnéticas 2.5D y 3D . . . . .	47
2.6. Conclusión . . . . .	48
<b>Capítulo 3. Control de la impedancia de las interconexiones</b> . . . . .	49
3.1. ¿Por qué controlar la impedancia? . . . . .	49
3.1.1. Efecto de la longitud de la interconexión . . . . .	50
3.1.2. Clasificación de las interconexiones según la señal transportada . . . . .	53
3.2. Influencia del tiempo de subida en la degradación de la señal . . . . .	54
3.3. Modelo de interconexión de impedancia controlada. . . . .	55
3.3.1. Definición de impedancia característica. . . . .	55
3.3.2. Configuración del control de impedancia de las interconexiones . . . . .	56
3.4. Interconexiones en la placa de circuito impreso . . . . .	58
3.4.1. Reflexiones. Interconexiones de PCB . . . . .	58
3.4.2. Transición entre líneas y discontinuidad . . . . .	60
3.4.2.1. Transición coaxial/microtira . . . . .	60
3.4.2.2. Transición de PCB a PCB. . . . .	60
3.4.3. Extracción de los valores del sistema equivalente. . . . .	62
3.5. Control de impedancia para una configuración de microtira . . . . .	63
3.5.1. Efecto de la permitividad efectiva . . . . .	64
3.5.2. Limitaciones en un circuito digital típico . . . . .	65
3.5.3. Efecto del espesor de la cinta o resina protectora . . . . .	66

3.6. Análisis de la propagación en las interconexiones . . . . .	67
3.6.1. Reflexión y transmisión en una terminación . . . . .	67
3.6.2. Reflexión y transmisión en caso de falla de la impedancia. . . . .	68
3.6.3. Reflexión y transmisión en un bus . . . . .	69
3.6.4. Adaptación de líneas . . . . .	70
3.7. Efecto en la configuración de los buses de datos . . . . .	71
3.8. Aplicación a la distribución del reloj . . . . .	72
3.9. Conclusión . . . . .	74

**Capítulo 4. Modos de propagación en las líneas de transmisión . . . . . 75**

4.1. Modelo de línea de transmisión . . . . .	75
4.1.1. Modos de propagación en las líneas . . . . .	76
4.1.1.1. Modo TEM puro sin pérdidas . . . . .	76
4.1.1.2. Modo cuasi TEM (con pérdidas de metal) . . . . .	76
4.1.1.3. Modo cuasi TEM (con pérdidas de metal y pérdidas dieléctricas). . . . .	77
4.2. Modos de propagación en los circuitos integrados . . . . .	78
4.2.1. Modo cuasi TEM . . . . .	80
4.2.2. Modo de efecto piel. . . . .	80
4.2.3. Modo de onda lenta. . . . .	81
4.2.4. Zona de transición . . . . .	83
4.3. Ecuación de propagación en las líneas de transmisión . . . . .	83
4.3.1. Ecuación de propagación . . . . .	84
4.3.2. Impedancia reducida . . . . .	87
4.3.3. Comportamiento de la interconexión en función de la longitud y la carga . . . . .	88
4.3.4. Caso de líneas eléctricamente cortas. . . . .	89
4.4. Conclusión . . . . .	90

**Capítulo 5. La técnica de ensayo de los parámetros S . . . . . 91**

5.1. Definición de parámetros medidos en altas frecuencias. . . . .	91
5.1.1. Reflexión y transmisión . . . . .	91
5.1.2. Coeficiente de reflexión y ROE en las interconexiones. . . . .	93
5.2. Principio de los parámetros S . . . . .	94
5.2.1. Definiciones de los términos . . . . .	94
5.2.2. Impedancia de entrada de un circuito terminado por una impedancia . . . . .	96
5.3. Medición de los parámetros S . . . . .	97

5.3.1. Calibraciones estándar de un analizador vectorial . . . . .	98
5.3.2. Calibración Corta, Abierta, Carga, Paso (SOLT) . . . . .	99
5.3.3. Calibración TRL . . . . .	100
5.3.4. Técnica de medición de un puerto . . . . .	102
5.4. Medición de la impedancia característica de la línea . . . . .	103
5.4.1. Método de cortocircuito y circuito abierto . . . . .	103
5.4.2. Método de línea cargado por $R_0$ . . . . .	105
5.4.3. Línea equivalente de los parámetros S. . . . .	106
5.5. Medición de la capacidad de la línea . . . . .	106
5.5.1. Método de apertura y cortocircuito. . . . .	107
5.5.2. Medición con el método de línea cargada. . . . .	107
5.6. Componentes de placas de circuito impreso y técnicas de desembobado . . . . .	108
5.6.1. Medición de la impedancia en placas de circuito impreso . . . . .	109
5.6.2. Matrices de cadena T y C . . . . .	109
5.6.3. Matriz ABCD de una línea de transmisión . . . . .	110
5.6.4. Procedimiento de desembobado (de-embedding) . . . . .	112
5.7. Caracterización de materiales dieléctricos para interconexiones. . . . .	114
5.7.1. Método de capacitancia MIM para aisladores en tecnologías integradas . . . . .	115
5.7.2. Permitividad efectiva de una línea de transmisión. . . . .	116
5.7.3. Casos de microtira, placa de disparo o línea coplanar. . . . .	117
5.8. Conclusión . . . . .	118

## **Capítulo 6. Análisis por reflectometría temporal. . . . .** 119

6.1. Principio de la reflectometría temporal . . . . .	119
6.2. Reflexión y transmisión de la tensión . . . . .	120
6.2.1. Las tensiones observables . . . . .	121
6.2.2. Efectos de las reflexiones múltiples en circuitos de alta velocidad . . . . .	123
6.3. Medición de la impedancia característica . . . . .	123
6.3.1. Medición de la impedancia con un generador de impulsos. . . . .	123
6.3.2. Medición de la impedancia con un tramo . . . . .	125
6.3.3. Casos de impedancia en cascada . . . . .	126
6.4. Reflexión sobre cargas reactivas . . . . .	127
6.5. Extracción de esquemas equivalentes . . . . .	128
6.5.1. Definición del esquema equivalente . . . . .	128
6.5.2. Extracción de una discontinuidad o de un componente inductivo. . . . .	130
6.5.3. Caso de una discontinuidad o un componente capacitivo . . . . .	132
6.5.4. Caso de una inductancia en serie y una capacitancia en paralelo . . . . .	135

6.6. Discontinuidades en cascada. . . . .	136
6.6.1. Resolución espacial. . . . .	136
6.6.2. Ejemplo de la extracción de inductancia y capacitancia . . . . .	137
6.7. Conclusión . . . . .	139
<b>Capítulo 7. Interferencias y diafonía en las interconexiones . . . . .</b>	<b>141</b>
7.1. Acoplamiento e interferencia debido al sustrato . . . . .	142
7.1.1. Modelo ICEM para el acoplamiento de sustratos . . . . .	142
7.1.2. Anillo de protección y caja de aislamiento . . . . .	144
7.2. Teoría del acoplamiento entre líneas . . . . .	144
7.2.1. Modelo de acoplamiento de línea . . . . .	145
7.2.2. Señales de acoplamiento en las terminaciones . . . . .	149
7.2.3. Modelo de acoplamiento en interconexiones de placas de circuito impreso . . . . .	149
7.2.4. Señales de Paradiafonía (Near-end cross-talk NEXT) y Telediafonía (Far-end cross-talk FEXT) en PCB . . . . .	153
7.3. Aplicación a cables, buses y conectores de alta velocidad . . . . .	155
7.3.1. Restricciones en los buses de alta velocidad . . . . .	155
7.3.2. Estandarización de los cables de transmisión de datos . . . . .	156
7.3.3. Categorías de sistemas Ethernet de alta velocidad. . . . .	158
7.4. Conclusión . . . . .	160
<b>Bibliografía . . . . .</b>	<b>161</b>
<b>Índice alfabético . . . . .</b>	<b>163</b>