

Compatibilidad electromagnética

EMC

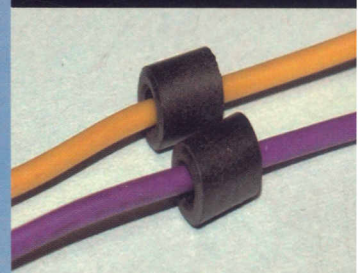
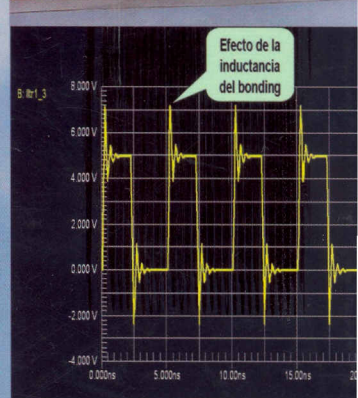
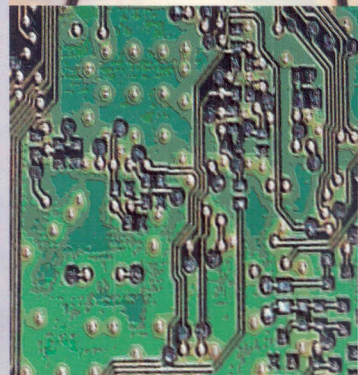
Joan Pere
López Veraguas

¿A quién va dirigido el libro?

Estudiantes de Ingeniería
Ingenieros electrónicos y de telecomunicaciones
Diseñadores de circuitos impresos
Ingenieros de test de EMC
Ingenieros de producto

Sectores afectados por las EMC:

Automoción
Aviación
Consumo



Índice general

<i>Prólogo</i>	<i>XIX</i>
<i>Introducción</i>	<i>XXIII</i>
1. Fundamentos	1
1.1 Compatibilidad electromagnética	1
1.1.1 Fuente de ruido	1
1.1.2 El medio de propagación del ruido	1
1.1.3 Receptor del ruido	1
1.1.4 EMC desde el inicio del diseño	2
1.1.5 Auto-compatibilidad	3
1.1.6 Métodos de diseño de EMC	3
1.1.7 Distorsión de la señal	4
1.1.8 Pistas eléctricamente largas	5
1.2 Métodos de acoplo del ruido	7
1.2.1 Acoplo de impedancia común	9
1.2.2 Acoplo por campo electromagnético	10
1.2.3 Acoplo radiado. Campo magnético	10
1.2.4 Acoplo radiado. Campo eléctrico	11
1.2.5 Radiado y conducido. Acoplo combinado	12
1.3 Diseñando para EMC	13
1.3.1 Cancelación del flujo magnético	15
1.3.2 Componentes no ideales	17
1.3.3 Antenas ocultas	17
1.3.4 Componentes ocultos	19
1.4 Electrostática	20
1.4.1 Potencial eléctrico y diferencia de potencial	20
1.5 Condensadores	21
1.5.1 Capacidad de un condensador (Faradios)	22
1.5.2 Capacitance drift (Estabilidad a largo término) ..	22
1.5.3 Coeficiente de temperatura (TC)	22
1.5.4 Rated capacitance (C_R) (Capacidad	
Especificada)	23
1.5.5 Rated voltage (U_R) (VoltajeEspecificado)	23

1.5.6	Rated ripple current (Rizado de Corriente Especificado)	23
1.5.7	Surge voltage (U_s) (Voltaje Máximo)	23
1.5.8	Voltaje AC sobrepuesto	24
1.5.9	Voltage inverso	24
1.5.10	Voltaje pulsante	24
1.5.11	Upper Category Temperature (UCT en °C) (Límite Superior de Temperatura).....	24
1.5.12	Temperatura y frecuencia	24
1.5.13	Operating Temperature (T_{OP}) and Life Expectancy (Temperatura de Funcionamiento y Vida Esperada)	25
1.5.14	Resistencia de aislamiento (R_{IS})	26
1.5.15	Dieléctricos (Dielectric strength).....	26
1.5.16	Dieléctrico de poliéster (PET)	26
1.5.17	Dieléctrico de polipropileno (PP)	26
1.5.18	Dieléctrico de polycarbonato (PC).....	27
1.5.19	Influencia del dieléctrico sobre la capacidad	27
1.5.20	Dielectric absorption (DA) (Absorción del dieléctrico).....	27
1.5.21	Condensadores en serie.....	28
1.5.22	Condensadores en paralelo	28
1.5.23	Constante de tiempo (RC) y carga en un condensador (Culombios).....	28
1.5.24	Descarga de un condensador.....	30
1.5.25	Energía almacenada (Joules o Watio/segundo) ..	31
1.5.26	ESR (Resistencia Serie Equivalente) (Ohms).....	31
1.5.27	ESL (Inductancia Serie Equivalente) (Henrios) .	31
1.5.28	Corriente a través del condensador (Amperios)..	32
1.5.29	Reactancia de un condensador (Ohms).....	32
1.5.30	Impedancia total de un condensador (Ohms).....	32
1.5.31	Ángulo de fase	33
1.5.32	Factor de disipación (%)	34
1.5.33	Factor de potencia (%)	34
1.5.34	Factor de calidad	34
1.5.35	Potencia perdida (Watios).....	35
1.5.36	Respuesta impulsos (du/dt)	35
1.6	La inductancia	35
1.6.1	¿Qué es la inductancia?	35

1.6.2	Tipos de inductancia	37
1.6.3	Bobinas conectadas en serie.....	37
1.6.4	Capacidad parásita en las bobinas.....	38
1.6.5	Ruido en la masa (Ground noise).....	39
1.6.6	Minimizar la inductancia	40
1.7	Tiempo y frecuencia.....	41
1.7.1	Dominio temporal	42
1.7.2	Dominio frecuencial.....	43
1.8	Diafonía (Crosstalk).....	44
1.8.1	Unidades de medida del crosstalk.....	46
1.8.2	Crosstalk de impedancia común	46
1.8.3	Capacidad mutua.....	47
1.8.4	Relación entre la capacidad mutua y el crosstalk	48
1.8.5	Crosstalk capacitivo	48
1.8.6	Far end y near end del crosstalk capacitivo	49
1.8.7	Reducción del crosstalk capacitivo.....	51
1.8.8	Crosstalk inductivo	51
1.8.9	Relación entre inductancia mutua y crosstalk.....	54
1.8.10	Far end y near end del crosstalk inductivo.....	55
1.8.11	Crosstalk e impedancia de las pistas.....	56
1.8.12	Impedancias bajas	57
1.8.13	Impedancias altas	57
1.8.14	Crosstalk en planos de masa	57
1.8.15	Divergencia de la corriente de retorno.....	58
1.8.16	Técnicas de diseño para prevenir el crosstalk.....	59
1.9	Conceptos básicos de EMC.....	61
1.9.1	Ensayos de EMC.....	61
1.9.2	Emisiones radiadas.....	62
1.9.3	Emisiones conducidas.....	63
1.9.4	Inmunidad radiada	64
1.9.5	Inmunidad conducida.....	65
1.9.6	Inyección de corriente (BCI Bulk Current Injection)	66
1.9.7	Frecuencia de resonancia	67
1.9.8	Resonancia en paralelo	68
1.9.9	Frecuencia de antirresonancia.....	69
1.10	ESD (Descargas de electricidad estática)	70
1.10.1	Campos estáticos.....	70
1.10.2	Formas de onda de las descargas electrostáticas.	71

1.10.3	Efecto triboeléctrico.....	72
1.10.4	Fallos provocados por eventos de ESD	72
1.10.5	Daño en componentes	72
1.10.6	Interrupción en las operaciones	73
1.10.7	Tipos de descargas	73
1.10.8	Generador de ESD autoconstruido.....	76
1.10.9	Diagnósticos y soluciones.....	77
1.10.10	Conceptos relacionados con el análisis de fenómenos ESD.....	78
1.11	Corrientes en modo diferencial y modo común	79
1.11.1	Corrientes en modo diferencial	79
1.11.2	Radiación en modo diferencial	80
1.11.3	Corrientes en modo común	81
1.11.4	Emisión de interferencias en modo diferencial... 83	
1.11.5	Emisión de interferencias en modo común.....	84
1.11.6	Conversión entre modo diferencial y modo común.....	85
1.11.7	Gradiente de tensión en los planos.....	86
1.11.8	Asimetría en un circuito impreso de dos capas... 89	
1.11.9	Asimetrías en componentes	89
1.11.10	Identificación y reducción de las interferencias . 90	
1.11.11	Aislamiento mediante bobina de modo común . 91	
1.11.12	Aislamiento mediante transformador.....	92
1.11.13	Aislamiento mediante opto-acoplador	93
1.11.14	Filtrado de las entradas y salidas	94
1.11.15	Circuitos de filtro	94
1.11.16	Cables planos	95
1.12	Relés.....	96
1.12.1	Control de la bobina del relé.....	97
1.12.2	Desactivación.....	97
1.12.3	Cargas inductivas	98
1.12.4	Sobretensiones generadas	98
1.12.5	Ejemplo práctico	100
1.12.6	Protección con varistores	101
1.12.7	Alimentación y retornos de relés y motores	102
1.13	Campos electromagnéticos	102
1.13.1	Campo conservativo y campo radiante	103
1.13.2	Campos radiantes	104
1.13.3	Tipos de antenas.....	105

1.13.4	Partículas cargadas	105
1.13.5	Movimiento de las partículas	106
1.13.6	El fenómeno de la radiación	107
1.13.7	Campo cercano y campo lejano	107
1.13.8	Impedancia de onda	108
2.	<i>Líneas de transmisión</i>	111
2.1	Introducción	111
2.1.1	Interconexiones	111
2.1.2	Línea capacitiva (puntual).....	111
2.1.3	La velocidad de la luz	112
2.1.4	Tiempo de propagación.....	113
2.2	Parámetros de las líneas de transmisión.....	113
2.2.1	Impedancia característica.....	114
2.2.2	La impedancia característica es relativa a la forma física de la línea	116
2.2.3	Impedancia y resistencia	117
2.2.4	Líneas de transmisión en circuitos impresos Microstrip	117
2.2.5	Stripline.....	118
2.2.6	Microstrip diferencial.....	119
2.2.7	Stripline diferencial simétrica.....	120
2.2.8	Material del circuito impreso	121
2.2.9	Retardo y velocidad de propagación.....	122
2.2.10	Inductancia y capacidad de las líneas	122
2.2.11	Amplitud de la señal sobre la línea de transmisión	123
2.2.12	Corriente en la línea de transmisión.....	124
2.2.13	División de líneas.....	126
2.2.14	Sincronización de señales	127
2.3	Retornos de las líneas de transmisión. Retornos ideales.....	128
2.3.1	Retorno de corriente en una línea microstrip referenciada a masa.....	129
2.3.2	Retorno de corriente en una stripline.....	131
2.3.3	Cuando el plano de alimentación y el del driver no tienen el mismo voltaje.....	132
2.4	Reflexiones en la línea de transmisión.....	133
2.4.1	Final de línea, sin la impedancia correcta.....	135
2.4.2	Damping.....	137

2.4.3	Ángulos de las pistas.....	138
2.5	Retornos no ideales	139
2.5.1	Acoplo de dos líneas atravesando un corte del plano de masa.....	140
2.5.2	Salto de capa	141
2.5.3	Otros retornos no ideales	143
2.5.4	Características comunes de los retornos no ideales	143
2.6	Atenuación de las señales	143
2.6.1	Pérdidas resistivas (Skin effect).....	144
2.6.2	Profundidad del efecto skin (Skin depth).....	144
2.6.3	Resistencia efectiva de un conductor	144
2.6.4	Absorción del dieléctrico	145
2.6.5	Degradación de los flancos	146
2.6.6	Impedancia de 50 o 75 Ohms.....	146
2.6.7	Pre-énfasis.....	147
3.	<i>Técnicas de trazado del circuito impreso</i>	149
3.1	Distribución de la alimentación	149
3.1.1	¿Qué son los planos de alimentación y de masa?.....	149
3.1.2	Ruido SSO en el plano de masa	150
3.1.3	Impedancia característica.....	150
3.1.4	Corrientes de retorno en el plano de masa	150
3.1.5	Anchura efectiva del plano de masa	151
3.1.6	Separando planos	152
3.1.7	Tensiones de alimentación	152
3.1.8	Efecto proximidad.....	154
3.1.9	Segregación de circuitos	155
3.2	Necesidad de planos.....	157
3.2.1	Control de la impedancia	157
3.2.2	Bucles.....	157
3.2.3	Efecto de apantallamiento de los planos.....	157
3.2.4	Crosstalk	158
3.2.5	Capacidad entre planos	158
3.3	Estrategias en los planos de masa y de alimentación.....	160
3.4	Reglas básicas de diseño	161
3.4.1	Configuraciones de masa en estrella y en serie ..	161
3.4.2	Masa híbrida.....	163
3.4.3	Conectando los planos juntos.....	163

3.4.4	Solapar planos.....	164
3.4.5	Desacoplo a un plano equivocado.....	165
3.4.6	Pistas que atraviesan separaciones.....	166
3.4.7	Distribución de las capas	167
3.5	Las vías	168
3.5.1	Capacidad de las vías	169
3.5.2	Inductancia de las vías	169
3.5.3	Disposición de vías	170
3.5.4	El modelo vía	171
3.5.5	Diámetro de las vías.....	172
3.5.6	Microvías	172
3.5.7	Jaula de Faraday.....	173
3.5.8	Masas flotantes.....	173
3.6	Micro-islas	174
3.6.1	Micro-isla en circuitos multicapa.....	176
3.6.2	Entradas y salidas desde los planos	177
3.6.3	Figuras de ruido	177
3.6.4	Aislamiento de circuitos	179
3.7	Capacidad enterrada (Buried capacitance).....	179
3.8	Ruido en la masa (Ground Bounce).....	181
3.8.1	Etapas de salida.....	181
3.8.2	Inductancias parásitas	182
3.8.3	La naturaleza de los planos	184
3.8.4	Estrategias para minimizar el ground bounce	185
3.9	Técnicas de supresión de EMI en los planos	187
3.9.1	La regla 20-H.	187
3.9.2	La regla 3-W	188
3.10	Consejos prácticos sobre los planos de alimentación	190
3.10.1	Trazado del circuito impreso de un microcontrolador	190
3.10.2	Alimentación y desacoplo	190
3.10.3	Separación de la alimentación	191
3.10.4	Cristal de cuarzo y señales rápidas	192
3.10.5	Pistas sin plano de referencia.....	193
3.11	Stitching (Cosido). Salvando las distancias	194
3.11.1	Stitching de alta frecuencia.....	195
3.11.2	Stitching de baja frecuencia.....	196
3.11.3	Stitching múltiple.....	196

3.11.4	Técnica de stitching según la frecuencia de las señales.....	197
3.11.5	Masas aisladas galvánicamente.....	198
4.	Condensadores de desacoplo.....	199
4.1	Introducción.....	199
4.1.1	Condensador de desacoplo.....	200
4.1.2	Eficacia del condensador de desacoplo.....	200
4.1.3	Resonancia serie.....	202
4.1.4	Consideraciones generales.....	203
4.1.5	Tipo de condensador.....	203
4.1.6	El emplazamiento.....	204
4.1.7	¿Por qué es importante el emplazamiento?.....	204
4.1.8	Efecto de la carga en las salidas.....	205
4.1.9	El valor del condensador.....	205
4.1.10	Frecuencia de resonancia.....	206
4.1.11	Filtrado de la alimentación.....	206
4.1.12	Condensador de paso (bypass).....	209
4.1.13	Condensador reserva (bulk).....	209
4.2	Impedancia del sistema de alimentación.....	210
4.2.1	Impedancia del sistema de alimentación.....	211
4.2.2	Regulador de tensión.....	212
4.2.3	Condensador reserva.....	213
4.2.4	Corriente media y de pico en CMOS.....	214
4.2.5	Condensador de desacoplo.....	215
4.2.6	Planos de alimentación.....	216
4.2.7	Impedancia global del sistema.....	216
4.3	Desacoplo en baja y alta frecuencia.....	217
4.3.1	Desacoplo a bajas frecuencias.....	217
4.3.2	Desacoplo en altas frecuencias.....	218
4.4	Emisiones debido al desacoplo.....	219
4.4.1	Desarrollo de la energía de RF en modo común.....	220
4.4.2	Energía de RF en los planos de alimentación.....	221
4.4.3	¿Por qué radia el lazo de desacoplo?.....	221
4.5	Suministro de alimentación.....	222
4.5.1	Desplazamiento de cargas.....	222
4.5.2	Almacenamiento de carga.....	223
4.5.3	Desacoplo paralelo.....	224
4.5.4	Resonancia de condensadores en paralelo.....	225

4.6	Estrategias recomendadas de trazado de circuitos impresos	225
4.6.1	Reducción de la inductancia de las vías.....	227
4.6.2	Emplazamiento en array.....	229
5.	Osciladores de cuarzo	231
5.1	Cristales de cuarzo	231
5.1.1	Teoría de la oscilación	231
5.1.2	Elegir el cristal de cuarzo adecuado.....	233
5.1.3	¿Por qué cristales de cuarzo?	233
5.1.4	Temporización y precisión.....	233
5.1.5	La tolerancia en frecuencia	234
5.1.6	Estabilidad en frecuencia	234
5.1.7	Envejecimiento (Aging).....	235
5.1.8	Capacidad de carga	235
5.1.9	Resonancia en serie y paralelo	236
5.1.10	Resonancia en serie.....	237
5.1.11	Resonancia en paralelo	238
5.1.12	Tiempo de arranque del oscilador.....	239
5.1.13	Tolerancia en frecuencia y capacidad de carga	240
5.1.14	Drive level.....	240
5.1.15	Resistencia negativa.....	240
5.1.16	Pullability.....	241
5.1.17	Frecuencia fundamental vs. Sobretono (Overtone)	241
5.1.18	Oscilador Colpitts	242
5.1.19	Consideraciones de diseño	243
5.2	Resonadores cerámicos	244
5.3	Oscilador de espectro distribuido (Spread Spectrum Clocking).....	246
6.	Consideraciones de software	249
6.1	El software también importa	249
6.1.1	Reducción de las emisiones electromagnéticas ..	250
6.1.2	Mejora de la inmunidad. Debouncing.....	252
6.1.3	Niveles de las entradas	253
6.1.4	Ciclo de histéresis en las entradas.....	254
6.1.5	Evolución de las entradas analógicas.....	255
6.1.6	Estrategia del watchdog	255

6.1.7 Interrupciones256

Glosario 257

Referencias..... 267

Índices..... 269