

# Índice

<b>Sobre los autores</b> . . . . .	19		
<b>Prefacio</b> . . . . .	21		
<b>Prólogo. Breve historia de la electrónica</b> . . . . .	25		
Antecedentes . . . . .	25		
La era del tubo de vacío . . . . .	26		
— Descubrimiento de los tubos de vacío . . . . .	26		
— Aplicaciones iniciales . . . . .	27		
— Industrias electrónicas . . . . .	27		
— Componentes . . . . .	27		
— Comunicaciones . . . . .	28		
— Computadores (cálculo) . . . . .	28		
— Controles . . . . .	29		
— Análisis y teoría . . . . .	30		
La era del transistor . . . . .	30		
— Descubrimiento del transistor de unión bipo- lar . . . . .	31		
— Invención del circuito integrado . . . . .	31		
— Microelectrónica . . . . .	32		
— Transistor de efecto campo . . . . .	33		
— Circuitos integrados digitales . . . . .	33		
— Circuitos analógicos . . . . .	34		
— Técnicas de fabricación . . . . .	34		
— Industrias de la comunicación y control . . . . .	35		
— La industria del cálculo . . . . .	35		
El futuro . . . . .	36		
		1-1. Fuerzas, campos y energía . . . . .	41
		— Partículas cargadas . . . . .	41
		— Intensidad de campo . . . . .	42
		— Potencial . . . . .	42
		— Concepto de barrera de energía po- tencial . . . . .	44
		1-2. La conducción en los metales . . . . .	44
		— Densidad de corriente . . . . .	46
		— Conductividad . . . . .	47
		1-3. El semiconductor intrínseco . . . . .	48
		— El hueco . . . . .	48
		— Conducción en semiconductores in- trínsecos . . . . .	50
		1.4. Semiconductores extrínsecos . . . . .	51
		— Semiconductores tipo n . . . . .	52
		— Semiconductores de tipo p . . . . .	52
		— Ley de acción de masas . . . . .	53
		— Concentración de portadores . . . . .	53
		— Generación y recombinación de car- gas . . . . .	55
		1.5. Variaciones en las propiedades del sili- cio . . . . .	55
		— Concentración intrínseca . . . . .	55
		— Movilidad . . . . .	56
		— Conductividad . . . . .	56
		1-6. Difusión . . . . .	56
		— Relación de Einstein . . . . .	57
		— Corriente total . . . . .	57
		1.7. Semiconductores graduados . . . . .	58
		— Ley de acción de masas . . . . .	59
		— Unión abrupta en circuito abierto . . . . .	59
		Referencias . . . . .	60
		Temas de repaso . . . . .	60

## PRIMERA PARTE

### Dispositivos Semiconductores

<b>1. Semiconductores</b> . . . . .	41
-------------------------------------	----

<b>2. El diodo de unión</b> . . . . .	61	<b>3. Transistores de unión bipolares (BJT)</b> . . . . .	97
2-1. La unión en un circuito abierto . . . . .	61	3-1. La fuente ideal de corriente controlada . . . . .	97
— Región de la carga espacial . . . . .	61	3-2. El transistor de unión . . . . .	100
2-2. La unión <i>pn</i> polarizada . . . . .	63	— Comportamiento físico de un transistor bipolar . . . . .	102
— Unión <i>pn</i> con polarización directa . . . . .	64	3-3. Representación Ebers-Moll de BJT . . . . .	104
— Unión <i>pn</i> con polarización inversa . . . . .	64	— Ganancia de corriente con gran señal . . . . .	105
— Contactos óhmicos . . . . .	64	— Modos de trabajo del transistor . . . . .	106
— La unión <i>pn</i> en cortocircuito y en circuito abierto . . . . .	65	— Concentración de portadores minoritarios . . . . .	108
— Grandes tensiones directas . . . . .	65	3-4. Características en base común . . . . .	109
2-3. Características tensión-intensidad . . . . .	65	— Características de salida . . . . .	109
2-4. Dependencia de la característica <i>V/I</i> con la temperatura . . . . .	68	— Características de entrada . . . . .	111
2-5. Diodos de germanio . . . . .	69	— Efecto Early o modulación del ancho de la base . . . . .	111
2-6. El diodo como elemento de un circuito . . . . .	69	3-5. Configuración en emisor común (CE) . . . . .	112
— El diodo ideal . . . . .	69	— Las características de salida . . . . .	112
— Concepto de recta de carga . . . . .	70	— Las características de entrada . . . . .	115
2-7. Modelos de gran señal . . . . .	71	— El modo activo inverso . . . . .	115
— Análisis de circuitos de diodos utilizando el modelo de gran señal . . . . .	72	3-6. Corte y saturación . . . . .	116
2-8. Aplicaciones elementales de los diodos . . . . .	75	— Corte . . . . .	116
— Rectificadores . . . . .	75	— Corte en el transistor invertido . . . . .	117
— Circuitos cortadores y fijadores . . . . .	76	— La región de saturación en emisor común . . . . .	117
2-9. Modelos de diodos de pequeña señal . . . . .	80	— Resumen de tensiones en un BJT . . . . .	119
— Capacidad de difusión . . . . .	83	3-7. Modelos de continua . . . . .	119
— Capacidad de transición . . . . .	84	3-8. El transistor de unión bipolar como interruptor . . . . .	126
2-10. Tiempos de conmutación del diodo de unión . . . . .	84	— Velocidad de conmutación del BJT . . . . .	128
2-11. Diodos Zener . . . . .	86	3-9. El transistor de unión bipolar como amplificador . . . . .	129
— Multiplicación de avalancha . . . . .	86	— Notación . . . . .	131
— Ruptura Zener . . . . .	86	3-10. Modelo BJT para pequeña señal . . . . .	132
— Modelos de diodo Zener . . . . .	87	— Modelo de baja frecuencia . . . . .	133
— Un regulador Zener . . . . .	87	3-11. El BJT como diodo . . . . .	138
— Características de temperatura . . . . .	88	3-12. El par de emisor acoplado . . . . .	140
2-12. Diodos de barrera Schottky . . . . .	88	3-13. Limitaciones en los transistores . . . . .	142
2-13. Diodo de unión en escalón . . . . .	89	— Corriente de colector máxima . . . . .	142
— Capacidad de deplexión . . . . .	89	— Máxima disipación de potencia . . . . .	142
— Expresión analítica de la concentración de portadores minoritarios . . . . .	91	— Máxima tensión de salida . . . . .	143
— Descripción del control de carga de un diodo . . . . .	93	— Perforación . . . . .	143
— Capacidad de difusión . . . . .	94	— Máxima tensión nominal de entrada . . . . .	144
Referencias . . . . .	94	Referencias . . . . .	145
Temas de repaso . . . . .	95	Temas de repaso . . . . .	145

4. Transistores de efecto campo . . . . .	147	5-1. Tecnología de los circuitos integrados monolíticos (microelectrónica) . . . . .	184
4-1. La fuente ideal de corriente con tensión regulada . . . . .	147	5-2. El proceso planar . . . . .	186
4-2. Transistores de unión de efecto campo — Funcionamiento del JFET . . . . .	149 150	— Crecimiento del cristal del sustrato . . . . .	186
4-3. Característica tensión-corriente de un JFET . . . . .	151	— Crecimiento epitaxial . . . . .	187
— La región óhmica . . . . .	152	— Oxidación . . . . .	187
— La región de saturación o de estric- ción . . . . .	153	— Fotolitografía . . . . .	188
— Ruptura . . . . .	154	— Difusión . . . . .	189
— Corte . . . . .	154	— Implantación de iones . . . . .	190
4-4. Característica de transferencia del JFET	154	— Metalización . . . . .	191
4-5. El MESFET . . . . .	155	5-3. Fabricación de transistores bipolares . . . . .	191
4-6. El MOSFET de acumulación . . . . .	155	— Fabricación de transistores . . . . .	191
— Estructura del MOS de acumulación	156	— Capa enterrada . . . . .	193
— Comportamiento físico del MOSFET de acumulación . . . . .	157	— Fabricación del <i>pnp</i> . . . . .	193
4-7. Características tensión-corriente de un MOSFET de acumulación . . . . .	157	— Transistores de emisor múltiple . . . . .	195
— Expresiones analíticas de las carac- terísticas tensión-corriente . . . . .	157	— El transistor Schottky . . . . .	195
— Región óhmica . . . . .	157	— Transistores super- $\beta$ . . . . .	196
— Región de saturación . . . . .	158	5-4. Fabricación del FET . . . . .	197
— Características del MOSFET de acu- mulación de canal <i>p</i> . . . . .	160	— Fabricación del NMOS de acumula- ción / . . . . .	197
— Comparación entre transistores PMOS y NMOS . . . . .	161	— Autoaislamiento . . . . .	197
4-8. El MOSFET de deplexión . . . . .	161	— Transistores NMOS de deplexión . . . . .	198
4-9. Símbolos de los circuitos MOSFET . . . . .	162	— Largo y ancho de puerta . . . . .	198
4-10. Análisis en continua de los FET . . . . .	163	— Fabricación de JFET . . . . .	199
— Recta de polarización . . . . .	163	5-5. Tecnología CMOS . . . . .	200
4-11. El MOSFET como resistencia . . . . .	166	5-6. Diodos monolíticos . . . . .	200
4-12. El FET como interruptor . . . . .	168	— Características del diodo . . . . .	202
4-13. El FET como amplificador . . . . .	172	5-7. Contacto metal-semiconductor . . . . .	202
4-14. Modelos FET de pequeña señal . . . . .	173	5-8. Resistencias integradas . . . . .	202
— El modelo de baja frecuencia . . . . .	174	— Resistencia pelicular . . . . .	203
— Modelo de alta frecuencia . . . . .	178	— Resistencias difundidas . . . . .	203
4-15. Dispositivos CMOS . . . . .	178	— Resistencias de iones implantados . . . . .	204
Referencias . . . . .	180	— Resistencias epitaxiales . . . . .	205
Temas de repaso . . . . .	181	— Resistencias de estricción . . . . .	205
5. Fabricación de circuitos integrados . . . . .	183	— Resistencias MOS . . . . .	206
		— Resistencias de película delgada . . . . .	206
		5-9. Condensadores integrados . . . . .	207
		— Condensadores de unión . . . . .	207
		— Condensadores MOS y de película delgada . . . . .	207
		5-10. Empacado de circuitos integrados . . . . .	208
		5-11. Características de los componentes in- tegrados . . . . .	209
		5-12. Disposición de los circuitos microelec- trónicos . . . . .	209
		— Circuitos bipolares . . . . .	210

— Circuitos MOS . . . . .	210
— Cruces . . . . .	210
— Trazado con computador . . . . .	211
Referencias . . . . .	211
Temas de repaso . . . . .	211

## SEGUNDA PARTE

### Circuitos y sistemas digitales

#### 6. Circuitos lógicos básicos (digitales) . . . . . 215

6-1. El sistema binario . . . . .	215
6-2. Algebra de Boole . . . . .	217
— Sistemas lógicos . . . . .	218
— La puerta OR . . . . .	218
— La puerta AND . . . . .	220
— Puerta NOT (inversora) . . . . .	221
— Función de inhibición (y habilitación) . . . . .	222
6-3. Puertas OR-exclusiva, NAND y NOR . . . . .	222
— Puerta OR-exclusiva . . . . .	222
— Leyes de Morgan . . . . .	224
— La puerta NAND . . . . .	226
— La puerta NOR . . . . .	226
6-4. Características de las puertas lógicas . . . . .	227
— El inversor ideal . . . . .	228
— Característica de transferencia del inversor real . . . . .	228
— Margen de ruido . . . . .	230
— Fan-out (salida en abanico) . . . . .	231
— Fan-in . . . . .	231
— Disipación de potencia . . . . .	231
— Velocidad de actuación . . . . .	232
6-5. El inversor NMOS . . . . .	233
— La carga saturada . . . . .	234
— Carga lineal (no saturada) . . . . .	236
— La carga de deplexión . . . . .	237
— Resumen . . . . .	239
6-6. Retardo de propagación de un inversor NMOS . . . . .	239
6-7. Puertas lógicas NMOS . . . . .	241
6-8. El inversor CMOS . . . . .	243
6-9. Puertas lógicas CMOS . . . . .	244
— La puerta NOR . . . . .	244
— La puerta NAND . . . . .	245

— La puerta transmisión . . . . .	245
— Familias lógicas CMOS . . . . .	246
6-10. El inversor BJT . . . . .	247
— Inversor de transistor Schottky . . . . .	248
6-11. La puerta TTL NAND . . . . .	248
— Actuación del transistor de entrada . . . . .	250
— Tiempo de almacenamiento bajo . . . . .	251
— Diodos de enganche de entrada . . . . .	251
6-12. Etapas de salida TTL . . . . .	252
— La etapa en totem . . . . .	252
— Salida de tres estados . . . . .	254
— La característica de transferencia . . . . .	254
6-13. Familias lógicas TTL . . . . .	254
6-14. Circuitos lógicos de emisor acoplado . . . . .	256
— Puerta básica OR/NOR de emisor acoplado (ECL) . . . . .	257
— La tensión de referencia $V_R$ . . . . .	258
— La característica de transferencia . . . . .	259
— Márgenes de ruido . . . . .	262
— La característica NOR . . . . .	262
— La etapa de salida . . . . .	262
— Topología ECL OR/NOR . . . . .	263
— Disipación de potencia . . . . .	263
— Número de salidas (fan-out) . . . . .	264
— Familias ECL . . . . .	264
6-15. Comparación entre familias lógicas . . . . .	264
Referencias . . . . .	265
Temas de repaso . . . . .	266
7. Combinación de sistemas digitales . . . . .	269
7-1. Montajes de puertas normalizadas . . . . .	269
— Criterios de diseño . . . . .	272
7-2. Sumadores binarios . . . . .	272
— Semisumador . . . . .	272
— Funcionamiento en paralelo . . . . .	273
— Sumador completo . . . . .	274
— Sumadores MSI . . . . .	275
— Funcionamiento en serie . . . . .	277
7-3. Funciones aritméticas . . . . .	278
— Sustracción binaria . . . . .	278
— Unidad aritmética lógica (ALU)/ Función generador . . . . .	279
— Multiplicadores binarios . . . . .	279

7-4. Comparador digital . . . . .	280	Temas de repaso . . . . .	311
7-5. Comprobador generador de paridad . . . . .	282		
7-6. Decodificador demúltiplex . . . . .	283	<b>8. Circuitos y sistemas secuenciales . . . . .</b>	<b>313</b>
— Sistema de codificación binario-decimal (BCD) . . . . .	283	8-1. Una memoria de 1 bit . . . . .	313
— Decodificador de BCD a decimal . . . . .	283	— Célula de almacenamiento de 1 bit . . . . .	313
— Demúltiplex . . . . .	285	— Un interruptor sin oscilaciones . . . . .	314
— Decodificador-Demúltiplex de 4 a 16 líneas . . . . .	285	— Biestable de fijación . . . . .	315
— Decodificador-excitador de lámpara . . . . .	286		
— Demúltiplex de orden superior . . . . .	286	8-2. Propiedades del circuito de un biestable de fijación . . . . .	315
7-7. Múltiplex-selector de datos . . . . .	286	8-3. El FLIP-FLOP <i>SR</i> temporizado . . . . .	317
— Conversión paralelo a serie . . . . .	288	— Sistema secuencial . . . . .	318
— Selección secuencial de datos . . . . .	288	— El FLIP-FLOP <i>SR</i> . . . . .	319
— Múltiplex de orden superior . . . . .	289		
— Lógica combinacional . . . . .	289	8-4. FLIP-FLOP tipos <i>J-K</i> , <i>T</i> y <i>D</i> . . . . .	320
7-8. Codificador . . . . .	290	— El FLIP-FLOP <i>J-K</i> . . . . .	320
— Etapas de salida . . . . .	292	— Puesta a 1 y a 0 (Preset and clear) . . . . .	321
— Codificador con prioridad . . . . .	293	— Condición de auto-oscilación . . . . .	321
		— FLIP-FLOP <i>J-K</i> ordenador-seguidor . . . . .	322
7-9. Memoria de sólo lectura (ROM) . . . . .	294	— El FLIP-FLOP tipo <i>D</i> . . . . .	323
— Convertidores de código . . . . .	295	— El FLIP-FLOP tipo <i>T</i> . . . . .	323
— Programación del ROM . . . . .	296	— Resumen . . . . .	323
— ROMS NMOS . . . . .	296		
7-10. Direccionado bidimensional de un ROM . . . . .	299	8-5. Registradores de desplazamiento . . . . .	324
— Ampliación de la información . . . . .	300	— Registrador de entrada-serie, salida paralelo (SIPO) . . . . .	325
— Ampliación del direccionado . . . . .	300	— Registrador de entrada y salida en serie (SISO) . . . . .	326
7-11. Aplicaciones de los ROM . . . . .	300	— Registrador de entrada y salida en serie (PISO) . . . . .	326
— Tablas de recurrencia . . . . .	300	— Registrador de entrada y salida en paralelo (PIPO) . . . . .	326
— Generadores de secuencia . . . . .	301	— Registradores de desplazamiento a derecha e izquierda (bidireccional) . . . . .	327
— Generador de ondas . . . . .	301	— Línea de retardo digital . . . . .	327
— Imagen visible de siete segmentos . . . . .	302	— Generador de secuencias . . . . .	327
— Lógica combinatoria . . . . .	303	— Contador de anillo registrador de desplazamiento . . . . .	328
— Generador de caracteres . . . . .	303	— Contador de anillo Johnson . . . . .	329
— Almacenamiento de programas . . . . .	303		
7-12. ROMS programables (PROMS) . . . . .	304	8-6. Contadores asíncronos . . . . .	329
7-13. PROM borrable . . . . .	304	— Contador asíncrono . . . . .	329
— EPROMS . . . . .	304	— Contador reversible . . . . .	331
— E <sup>2</sup> PROMS . . . . .	306	— Contador divisor por N . . . . .	332
7-14. Lógica de disposición programable . . . . .	306		
7-15. Disposiciones lógicas programables (PLA) . . . . .	307	8-7. Contadores síncronos . . . . .	333
— Programación de un PLA . . . . .	309	— Transporte en serie . . . . .	334
		— Transporte en paralelo . . . . .	335
		— Contador síncrono reversible con transporte en paralelo . . . . .	335
Referencias . . . . .	311		

– Contador de décadas síncrono . . .	335
8-8. Aplicaciones de los contadores . . .	336
– Contador directo . . . . .	337
– Divisor por $N$ . . . . .	337
– Medición de frecuencia . . . . .	338
– Medición de tiempo . . . . .	338
– Medición de distancias . . . . .	338
– Medición de velocidad . . . . .	338
– Calculadora digital (computadora) . . .	339

Referencias . . . . .	339
Temas de repaso . . . . .	339

## 9. Sistemas integrados a muy gran escala . . . . . 341

9-1. Registradores de desplazamiento MOS dinámicos . . . . .	341
– Inversor MOS dinámico . . . . .	342
– Célula de memoria bifásica de relación . . . . .	343
– Aplicaciones . . . . .	344
– Registrador de desplazamiento MOS estático . . . . .	344

9-2. Etapas del registrador de desplazamiento de no relación . . . . .	345
– Célula de registrador dinámico de dos fases y de no relación . . . . .	345
– Etapa de registrador de desplazamiento dinámico CMOS . . . . .	346

9-3. Lógica domino CMOS . . . . .	347
-----------------------------------	-----

9-4. Memorias de acceso aleatorio (RAM) . . . . .	349
– Selección lineal . . . . .	349
– Direccionado bi-dimensional . . . . .	350
– Organización básica RAM . . . . .	350
– Ampliación de la memoria . . . . .	352

9-5. Células de memoria de lectura-escritura . . . . .	352
– RAM MOS estático . . . . .	353
– Célula RAM CMOS estática . . . . .	354
– Célula RAM dinámica de 4 MOS-FET . . . . .	355
– Célula RAM dinámica de un MOS-FET . . . . .	356
– Organización del chip RAM dinámico . . . . .	357

9-6. Células RAM bipolares . . . . .	360
--------------------------------------	-----

9-7. Dispositivos acoplados en carga (CCD) . . . . .	362
--	-----

– Funcionamiento básico del CCD . . . . .	362
– Electrodo por bit . . . . .	364
– Frecuencias máxima y mínima de funcionamiento . . . . .	364

9-8. Estructuras CCD . . . . .	365
– CCD de dos fases . . . . .	365
– Estructuras de entrada y de salida . . . . .	367
– Organización de una memoria CCD . . . . .	367

9-9. Lógica de inyección integrada . . . . .	368
– Fusionado de elementos . . . . .	369
– Inyección de corriente . . . . .	370
– Inversor . . . . .	371
– Puerta NAND . . . . .	372
– Puerta NOR . . . . .	373
– FLIP-FLOP . . . . .	373

9-10. Microprocesadores y microcomputadores . . . . .	373
– Microcomputadores . . . . .	375
– Microcomputador de un chip . . . . .	375
– Aplicaciones . . . . .	376

Referencias . . . . .	377
Temas de repaso . . . . .	377

## TERCERA PARTE

### Circuitos y sistemas amplificadores

## 10. Etapas amplificadoras básicas a baja frecuencia . . . . . 383

10-1. Ondas para una entrada senoidal . . . . .	384
– Notaciones . . . . .	385

10-2. Punto de funcionamiento del BJT . . . . .	387
– Estabilidad de polarización . . . . .	388

10-3. Polarización del BJT para circuitos integrados . . . . .	389
– Resistencia de salida . . . . .	390
– Repetidores de corriente . . . . .	391

10-4. Fuente de corriente Widlar . . . . .	392
– Variaciones de temperatura . . . . .	394

10-5. Fuentes de corriente de tres transistores . . . . .	395
---	-----

10-6. Polarización del BJT con componentes discretos - Análisis . . . . .	396	— Análisis de la etapa amplificadora FET generalizada . . . . .	420
— Acoplamiento capacitivo . . . . .	396	— La etapa en fuente común . . . . .	422
— Análisis en continua . . . . .	398	— La configuración en drenaje común . . . . .	422
— Incremento de corriente por variar $\beta_F$ . . . . .	399		
— Incremento de corriente por variar $I_{CO}$ . . . . .	400	10-16. Amplificadores BJT en cascada . . . . .	423
— Incremento de la corriente por variar $V_{BE}$ . . . . .	400	— Etapas FET en cascada . . . . .	426
— Incremento total de corriente . . . . .	400		
10-7. Diseño de polarización con componentes discretos . . . . .	401	10-17. Etapas de transistores mixtas (compound) . . . . .	426
— Consideraciones de diseño . . . . .	403	— Configuración CC-CC (Darlington) . . . . .	427
		— Conexión CC-CE . . . . .	427
		— Conexión CE-CB (Cascodo) . . . . .	427
10-8. Polarización del FET . . . . .	404	10-18. El amplificador diferencial . . . . .	428
— Fuentes de corriente . . . . .	404	— Modo diferencial . . . . .	429
— Circuito polarizado de cuatro resistencias . . . . .	406	— Modo común . . . . .	429
10-9. Análisis lineal de circuitos de transistores . . . . .	408	10-19. Análisis de amplificadores diferenciales . . . . .	430
10-10. Amplificador en emisor común . . . . .	410	— Ganancia $A_{DM}$ del modo diferencial . . . . .	430
— Ganancia o amplificación de corriente $A_I$ . . . . .	410	— Ganancia $A_{CM}$ del modo común . . . . .	431
— Resistencia de entrada $R_i$ . . . . .	411	— Relación de rechazo del modo común . . . . .	431
— Ganancia o amplificación de tensión $A_v$ . . . . .	411	— Salida para señales de entrada arbitrarias . . . . .	432
— Resistencia de salida . . . . .	412	— Efectos de la resistencia de fuente . . . . .	434
		— Resistencias de entrada y de salida . . . . .	434
10-11. El seguidor de emisor . . . . .	413	10-20. Amplificadores diferenciales FET . . . . .	434
— La ganancia de corriente . . . . .	414	10-21. El amplificador operacional (Amp-Op) . . . . .	435
— La resistencia de entrada . . . . .	414	— El Amp-Op ideal . . . . .	436
— Ganancia de tensión . . . . .	415	— Etapas Amp-Op inversoras prácticas . . . . .	437
— La resistencia de salida . . . . .	415	— La etapa no inversora práctica . . . . .	439
10-12. El amplificador en base común . . . . .	416		
10-13. Comparación entre configuraciones del amplificador BJT . . . . .	416	10-22. Aplicaciones elementales del Amp-Op . . . . .	440
— Configuración en emisor común (CE) . . . . .	416	— Amplificador sumador . . . . .	440
— Configuración en colector común (CC) . . . . .	416	— Suma no inversora . . . . .	441
— Configuración en base común (CB) . . . . .	417	— Convertidor de tensión a corriente (amplificador de transconductancia) . . . . .	441
		— Convertidor corriente-tensión (amplificador de transresistencia) . . . . .	442
10-14. Amplificador en emisor común con una resistencia de emisor . . . . .	417	— Integradores . . . . .	443
10-15. Etapas amplificadoras FET . . . . .	418		
— Circuitos equivalentes de pequeña señal . . . . .	418	Referencias . . . . .	443

Temas de repaso . . . . . 444

**11. Respuesta en frecuencia de los amplificadores** . . . . . 447

11-1. Características de respuesta en frecuencia . . . . . 447

— Consideraciones sobre fidelidad . . . . . 448

— Respuestas en alta frecuencia . . . . . 449

— Respuesta en baja frecuencia . . . . . 451

— Respuesta total . . . . . 451

— Ancho de banda . . . . . 453

11-2. Respuesta de un amplificador a un escalón . . . . . 453

— Tiempo de subida . . . . . 454

— Pendiente . . . . . 455

— Pruebas con onda cuadrada . . . . . 456

11-3. Ganancia de corriente de cortocircuito en emisor común . . . . . 456

— El parámetro  $f_T$  . . . . . 458

11-4. La función ganancia generalizada . . . . . 459

— Determinación del número de polos y de ceros . . . . . 460

— La aproximación del polo dominante . . . . . 460

11-5. Respuesta en alta frecuencia de una etapa en emisor común . . . . . 462

— La función de transferencia . . . . . 463

— Equivalente híbrido- $\pi$  unilateral . . . . . 463

— Impedancia de entrada de Miller . . . . . 464

11-6. Producto ganancia-ancho de banda . . . . . 465

11-7. Etapa en fuente común a alta frecuencia . . . . . 466

11-8. Seguidores de emisor y de fuente a alta frecuencia . . . . . 467

— Ganancia de tensión . . . . . 467

— La impedancia de salida  $Z_o$  . . . . . 469— La impedancia de entrada  $Z_i$  . . . . . 470

— El seguidor de fuente . . . . . 472

11-9. Método de la constante de tiempo para hallar la respuesta . . . . . 473

— El coeficiente  $a_1$  . . . . . 473— El coeficiente  $a_2$  . . . . . 478

11-10. Respuesta en frecuencia de etapas en cascada . . . . . 480

— Cascada Emisor Común-Emisor Común (Ce-Ce) y fuente común-fuente común (Cs-Cs) en alta frecuencia . . . . . 480

11-11. El amplificador cascode (CE-CB) . . . . . 485

11-12. El amplificador operacional a alta frecuencia . . . . . 488

— La etapa no inversora . . . . . 488

— La etapa inversora . . . . . 489

11-13. El efecto de los condensadores de acoplamiento y de paso . . . . . 490

— La respuesta completa en baja frecuencia . . . . . 491

— Etapas en cascada a baja frecuencia . . . . . 493

— Resumen . . . . . 493

Referencias . . . . . 494

Temas de repaso . . . . . 494

**12. Amplificadores realimentados** . . . . . 497

12-1. Clasificación y representación de los amplificadores . . . . . 498

— El amplificador de tensión . . . . . 498

— El amplificador de corriente . . . . . 499

— El convertidor Tensión-Corriente o Amplificador de Transconductancia . . . . . 499

— El convertidor Corriente-Tensión o Amplificador de Transimpedancia . . . . . 499

12-2. El concepto de realimentación . . . . . 500

— La fuente de señal (entrada) . . . . . 501

— La señal de salida . . . . . 501

— La red de muestreo . . . . . 501

— La red de Comparación o Sumadora . . . . . 502

— La red de realimentación . . . . . 503

— El amplificador básico . . . . . 503

— Topologías del amplificador realimentado . . . . . 503

12-3. El amplificador realimentado ideal . . . . . 504

— Relación de retorno o ganancia del lazo . . . . . 506

— Supuestos fundamentales . . . . . 506

12-4. Propiedades de amplificadores con



realimentación negativa . . . . .	507	múltiple lazo . . . . .	546
— Desensibilidad . . . . .	507	— Amplificador con realimentación positiva-negativa . . . . .	547
— Distorsión no lineal . . . . .	508	— Estructura McMillan . . . . .	548
— Reducción del ruido . . . . .	511	— Realimentación seguidora . . . . .	550
12-5. Impedancia en amplificadores reali- mentados . . . . .	512	— Realimentación salto de rana . . . . .	550
— Resistencia de entrada . . . . .	512	Referencias . . . . .	550
— Impedancia de salida . . . . .	513	Temas de repaso . . . . .	551
— Fórmula de la impedancia de Blackman . . . . .	514		
12-6. Propiedades de las topologías de am- plificadores realimentados . . . . .	516	<b>13. Estabilidad y respuesta de los amplificado- res realimentados . . . . .</b>	<b>553</b>
— El amplificador paralelo-paralelo . . . . .	516	13-1. Efectos de la realimentación sobre el ancho de banda . . . . .	553
— El amplificador serie-serie . . . . .	517	— Función de dos polos . . . . .	554
— El amplificador paralelo-serie . . . . .	518	— Función de tres polos . . . . .	554
— El amplificador serie-paralelo . . . . .	518	13-2. Estabilidad . . . . .	555
12-7. Análisis aproximado de un amplifica- dor realimentado . . . . .	519	— Definición de la estabilidad . . . . .	556
— El amplificador sin realimentación . . . . .	519	— Estabilidad en amplificadores rea- limentados . . . . .	557
— Plan general de análisis . . . . .	520	13-3. Pruebas de estabilidad . . . . .	557
12-8. Análisis general de amplificadores realimentados . . . . .	523	— Criterio de Nyquist . . . . .	558
— Ganancia (relación de transferen- cia) con realimentación . . . . .	524	— Margen de fase . . . . .	558
— Proceso de análisis . . . . .	526	— Margen de ganancia . . . . .	558
12-9. Más sobre la impedancia en amplifi- cadores realimentados . . . . .	530	— El diagrama de Bode . . . . .	560
12-10. Triple realimentación en paralelo . . . . .	532	13-4. Compensación . . . . .	563
— Las impedancias de entrada y de salida . . . . .	534	— Compensación por polo dominante . . . . .	564
— Opciones de diseño . . . . .	536	— Cancelación polo-cero . . . . .	565
12-11. El par paralelo-serie . . . . .	537	— Una nota para el lector . . . . .	566
— Resistencias de entrada y de sali- da . . . . .	538	13-5. Respuesta en frecuencia de amplifi- cadores realimentados. Función de transferencia de doble polo . . . . .	567
12-12. El par serie-paralelo . . . . .	539	— Modelo de circuito . . . . .	568
— Impedancias de entrada y de sa- lida . . . . .	540	— Respuesta en frecuencia . . . . .	569
12-13. El triple en serie . . . . .	541	— Respuesta a un escalón . . . . .	569
— Impedancias de entrada y de sali- da . . . . .	542	13-6. Margen de fase del amplificador rea- limentado de dos polos . . . . .	572
12-14. Análisis general de amplificadores realimentados multi-etapa . . . . .	543	13-7. Respuesta del amplificador realimen- tado de tres polos . . . . .	576
12-15. Amplificadores realimentados de		13-8. Análisis aproximado de un amplifica- dor realimentado multi-polo . . . . .	576
		— Margen de fase . . . . .	578
		— El polo dominante . . . . .	578
		13-9. Determinación aproximada de los po- los en lazo abierto . . . . .	579

13-10. Más sobre la compensación . . . . .	588	— Compensación interna . . . . .	621
— Separación de polos . . . . .	589	— Compensación adaptada . . . . .	621
— Compensación por capacidades en paralelo . . . . .	591	— Compensación por efecto Miller . . . . .	621
— Análisis del lugar de las raíces (opcional) . . . . .	591	— Cancelación polo-cero . . . . .	625
— Resumen . . . . .	592		
Referencias . . . . .	592	14-9. Ritmo de variación . . . . .	626
Temas de repaso . . . . .	593	— Efecto del ritmo de variación sobre una señal de entrada . . . . .	627
<b>14. Características del amplificador operacional . . . . .</b>	<b>595</b>	14-10. Circuitos BIFET y BIMOS . . . . .	628
14-1. Estructura del amplificador operacional . . . . .	595	14-11. Amplificadores operacionales de tres etapas . . . . .	629
— Estructura de dos etapas . . . . .	596	14-12. Otros tipos de amplificadores operacionales . . . . .	630
14.2 La etapa de ganancia con carga activa . . . . .	597	— Estructura de etapa única . . . . .	630
— La recta de carga . . . . .	597	— Amplificadores de instrumentación . . . . .	631
— Modelo de pequeña señal . . . . .	598	— El Amplificador de Transconductancia Operacional (OTA) . . . . .	634
— Limitaciones de las fuentes de corriente <i>npn</i> . . . . .	601	14-13. Amplificadores operacionales MOS . . . . .	635
14-3. La etapa diferencial . . . . .	602	— Circuitos NMOS . . . . .	635
— La relación de rechazo del modo común (CMRR) . . . . .	602	— Amp-Op CMOS . . . . .	636
— Resistencia de entrada $R_{id}$ . . . . .	603	Referencias . . . . .	638
— La ganancia en el modo diferencial $A_{DM}$ . . . . .	603	Temas de repaso . . . . .	638
14-4. Desplazamiento de nivel . . . . .	608		
— El multiplicador $V_{BE}$ . . . . .	609	<b>CUARTA PARTE</b>	
14-5. Etapas de salida . . . . .	610	<b>Procesado de señales y adquisición de datos</b>	
14-6. Tensiones y corrientes offset . . . . .	613	<b>15. Generación y conformación de ondas . . . . .</b>	<b>643</b>
— Técnicas universales de equilibrado . . . . .	616	15-1. Osciladores senoidales . . . . .	643
14-7. Medición de los parámetros de un amplificador operacional . . . . .	616	— Criterio de Barkhausen . . . . .	644
— Tensión offset de entrada $V_{io}$ . . . . .	617	— Consideraciones prácticas . . . . .	644
— Corriente de polarización de entrada . . . . .	617	15-2. Oscilador de cambio de fase . . . . .	645
— Ganancia de tensión diferencial en lazo $A_v = A_{DM}$ . . . . .	618	— Funcionamiento a frecuencia variable . . . . .	647
— Relación de rechazo del modo común . . . . .	618	15-3. Oscilador de puente de Wien . . . . .	647
14-8. Respuesta en frecuencia y compensación . . . . .	620	— Estabilización de la amplitud . . . . .	648
		15-4. Forma general de un circuito oscilador . . . . .	649
		— Relación de retorno . . . . .	649
		— Osciladores sintonizables <i>LC</i> . . . . .	649
		15-5. Oscilador de cristal . . . . .	650

15-6. Multivibradores . . . . . 652  
 — Multivibradores monoestables . . . . . 654  
 — Multivibradores estables . . . . . 657

15-7. Comparadores . . . . . 658

15-8. Formación de ondas cuadradas a partir de una senoide . . . . . 660  
 — Señalador de tiempo a partir de una senoide . . . . . 661

15-9. Comparador regenerativo (disparador Schmitt) . . . . . 661  
 — Disparador Schmitt acoplado en emisor . . . . . 664

15-10. Generadores de ondas cuadradas y triangulares . . . . . 665  
 — Generadores de onda triangular . . . . . 666  
 — Modulación del ciclo de servicio (duty) . . . . . 668  
 — Oscilador gobernado por tensión: VCO (Voltage Controlled Oscillator) . . . . . 668

15-11. Generadores de impulsos . . . . . 670  
 — Multivibrador monoestable de repetición . . . . . 671

15-12. El temporizador integrado 555 . . . . . 672  
 — El multivibrador astable . . . . . 673

15-13. Generadores de base de tiempo . . . . . 674  
 — El barrido . . . . . 674  
 — Generadores de barrido . . . . . 675

15-14. Generadores de ondas en escalera . . . . . 677  
 — Contador de almacenamiento . . . . . 678  
 — Aplicaciones . . . . . 678

15-15. Modulación de una onda cuadrada . . . . . 680  
 — Modulación de amplitud . . . . . 680  
 — Modulador recortador . . . . . 680  
 — Demoduladores . . . . . 682  
 — Amplificador recortador estabilizado . . . . . 683  
 — Modulación de ancho de impulso . . . . . 683

Referencias . . . . . 684  
 Temas de repaso . . . . . 684

16-1. Señales y procesado de señales . . . . . 687

16-2. Toma y retención de información . . . . . 691

16-3. Múltiplex y demúltiplex analógicos . . . . . 693  
 — Demúltiplex analógico . . . . . 694

16-4. Convertidores de digital a analógico (D/A) . . . . . 694  
 — Convertidor D/A tipo escalera . . . . . 696  
 — Convertidor D/A multiplicador . . . . . 697

16-5. Convertidores de analógico a digital (A/D) . . . . . 698  
 — Convertidor A/D con contador . . . . . 698  
 — Convertidor A/D por aproximaciones sucesivas . . . . . 700  
 — Convertidor A/D comparador en paralelo (Flash) . . . . . 700  
 — Convertidor A/D de relación o de doble pendiente . . . . . 702

16-6. Circuitos de integración y diferenciación . . . . . 703  
 — Corriente de polarización y offset en continua . . . . . 703  
 — Ganancia finita y ancho de banda . . . . . 704  
 — Circuito práctico . . . . . 705  
 — Integrador diferencial . . . . . 706  
 — Diferenciador . . . . . 706

16-7. Cálculo analógico electrónico . . . . . 706

16-8. Filtros activos RC . . . . . 708  
 — Características ideales . . . . . 708  
 — Características reales de respuesta en frecuencia . . . . . 710  
 — Especificación de filtros . . . . . 710

16-9. Funciones Butterworth y Chebyshev . . . . . 711  
 — La función bicuadrada . . . . . 711  
 — Polinomios de Butterworth . . . . . 712  
 — Filtros Chebyshev . . . . . 714  
 — Transformación de frecuencia . . . . . 716

16-10. Secciones del amplificador simple . . . . . 717  
 — Secciones paso-bajo . . . . . 717  
 — Secciones paso-alto . . . . . 720  
 — Secciones paso-banda . . . . . 720  
 — Secciones de rechazo de banda . . . . . 722  
 — Redes pasa-todo . . . . . 723  
 — Sección general bicuadrada de Friend . . . . . 726

16-11. Secciones bicuadradas del Amp-Op múltiple . . . . . 726

- La sección de filtro universal o de estado variable . . . . . 727

- 16-12. Filtros gobernados por condensador . . . . . 729
- Resistencia simulada . . . . . 729
  - Integradores . . . . . 730
  - Etapa de ganancia . . . . . 731
  - Secciones unipolares . . . . . 731

- 16-13. Amplificadores logarítmicos y exponenciales . . . . . 733
- Amplificador logarítmico con transistores aparejados . . . . . 734
  - Amplificador exponencial (antilogarítmico) . . . . . 736
  - Multiplicador logarítmico . . . . . 737

- 16-14. Multiplicadores analógicos . . . . . 738
- Cuadrados y raíces cuadradas . . . . . 739
  - Modulador equilibrado . . . . . 740

- 16-15. Convertidores alterna-continua de precisión . . . . . 740
- Limitador de precisión . . . . . 741
  - Rectificador rápido de media onda . . . . . 741
  - Rectificador de onda completa . . . . . 742
  - Detector activo de media . . . . . 743
  - Detector activo de pico . . . . . 743

- Referencias . . . . . 744
- Temas de repaso . . . . . 745

## QUINTA PARTE

### Electrónica de grandes señales

17. Circuitos y sistemas de potencia . . . . . 749

- 17-1. Conversión de alterna a continua . . . . . 749
- 17-2. Rectificadores . . . . . 750
- Rectificador de media onda . . . . . 750
  - Tensión de diodo . . . . . 751
  - Corriente (o tensión) alterna . . . . . 752
  - Regulación . . . . . 752
  - Rectificador de onda completa . . . . . 754
  - Tensión inversa de pico . . . . . 754

- 17-3. Otros circuitos de onda completa . . . . . 755

- Rectificador de puente . . . . . 756
- Medidor rectificador . . . . . 756
- Multiplicadores de tensión . . . . . 756

- 17-4. Filtros capacitivos . . . . . 756
- Tensión de salida en carga . . . . . 758
  - Circuito de onda completa . . . . . 759
  - Análisis aproximado . . . . . 759
  - Filtros de entrada capacitiva e inductiva . . . . . 760

- 17-5. Suministro de potencia regulado . . . . . 760
- Estabilización . . . . . 762

- 17-6. Reguladores monolíticos . . . . . 762

- 17-7. Regulador de conmutación . . . . . 764
- Topología del regulador de conmutación básico . . . . . 765
  - Tensión de salida regulada . . . . . 766
  - Rendimiento . . . . . 766
  - El interruptor de potencia . . . . . 766

- 17-8. Topologías adicionales del regulador de conmutación . . . . . 767
- Tensiones de salida negativas . . . . . 768
  - Convertidor continua-continua a contrafase acoplado por transformador . . . . . 769
  - Generación de las ondas de conmutación . . . . . 770

- 17-9. Amplificadores de gran señal . . . . . 772

- 17-10. Distorsión armónica . . . . . 773
- Distorsión de segundo armónico . . . . . 773
  - Generación de armónicos de orden superior . . . . . 775
  - Potencia de salida . . . . . 775

- 17-11. Clasificación de los amplificadores . . . . . 776

- Clase A . . . . . 776
- Clase B . . . . . 776
- Clase AB . . . . . 777
- Clase C . . . . . 777

- 17-12. Rendimiento de un amplificador clase A . . . . . 777
- Rendimiento de la conversión . . . . . 777

- 17-13. Amplificadores en contrafase (push-pull) clase B . . . . . 778

- Rendimiento . . . . . 779
- Disipación . . . . . 780
- Distorsión . . . . . 780

17-14. Funcionamiento clase AB . . . . . 781  
 17-15. Amplificadores de potencia integra-  
 dos . . . . . 782  
 17-16. Consideraciones térmicas . . . . . 783  
 — Temperatura máxima de la unión . . . . . 783  
 — Resistencia térmica . . . . . 783  
 — Curva de reducción de la disipa-  
 ción . . . . . 784  
 17-17. Transistores de potencia de efecto  
 campo (VMOS) . . . . . 786  
 — Características del VMOS . . . . . 788  
 — Aplicaciones . . . . . 788  
 Referencias . . . . . 789  
 Temas de repaso . . . . . 789

APENDICES

**A. Constantes y factores de conversión . . . . . 791**  
 A-1. Valor probable de constantes físicas . . . . . 791  
 A-2. Factores de conversión y prefijos . . . . . 792  
**B. Fabricantes y especificaciones de semicon-  
 ductores . . . . . 793**  
 B-1. Fabricantes de dispositivos electróni-  
 cos . . . . . 793  
 B-2. Especificaciones del diodo de silicio 1N  
 4153 . . . . . 794  
 B-3. Especificaciones del transistor bipolar  
 de unión *n-p-n* de silicio 2N2222A . . . . . 795  
 B-4. Especificaciones para el transistor de si-  
 licio de unión, de efecto campo, de de-  
 flexión y de canal N 2N 4869 . . . . . 797  
 B-5. Especificaciones del transistor de sili-  
 cios MOS de efecto campo, de acumu-  
 lación y canal-P 3N163 . . . . . 798  
 B-6. Especificaciones de la puerta NA-ND  
 positiva TTL Schottky de baja poten-  
 cia (LS7410 o LS5410) con salida en  
 totem . . . . . 799  
 B-7. Especificaciones del amplificador ope-  
 racional LM741 . . . . . 800  
 B-8. Especificaciones para el transistor en  
 potencia N-P-N de silicio 2N5671 . . . . . 801  
 B-9. Especificaciones de los dispositivos de  
 transistores de uso general CA 3045 y  
 CA 3046 . . . . . 803

**C. Resumen de teoría de circuitos . . . . . 805**  
 C-1. Redes resistivas . . . . . 805  
 — Fuentes de tensión y de corriente . . . . . 805  
 — Resistencia . . . . . 806  
 — Ley de Kirchhoff de las corrientes . . . . . 806  
 — Ley de Kirchhoff de las tensiones . . . . . 807  
 — Combinación de resistencias en serie  
 y en paralelo . . . . . 810  
 C-2. Teoremas sobre circuitos . . . . . 811  
 — Teorema de superposición . . . . . 811  
 — Teorema de Thèvenin . . . . . 812  
 — Teorema de Norton . . . . . 813  
 — Análisis por el método nodal . . . . . 814  
 — Análisis de mallas . . . . . 815  
 C-3. Estado senoidal en régimen perma-  
 nente . . . . . 816  
 — Fasores . . . . . 818  
 — El operador *j* . . . . . 819  
 C-4 Análisis simplificado de una red senoi-  
 dal . . . . . 820  
 — Reactancia . . . . . 820  
 — Impedancia . . . . . 821  
 — Admitancia . . . . . 822  
 — Análisis de redes . . . . . 822  
 — Teorema de Miller . . . . . 823  
 C-5. Excitación exponencial . . . . . 823  
 C-6. Respuesta de un circuito *RC* a un esca-  
 lón . . . . . 825  
 — Circuito *RC* paso-alto . . . . . 825  
 — Descarga de un condensador a través  
 de una resistencia . . . . . 827  
 — Circuito *RC* paso-bajo . . . . . 827  
 C-7. El diagrama asintótico de Bode . . . . . 828  
 C-8. Cuadripolos . . . . . 832  
 — Parámetro *z* . . . . . 834  
 — Parámetro *h* . . . . . 834  
 C-9. Gráfico de recorrido de la señal . . . . . 838  
**D. Problemas . . . . . 843**  
**E. Soluciones de una selección de problemas . . . . . 951**