

# Índice de materias

Prólogo . . . . .	XV
Observación . . . . .	XIX
<b>Capítulo 1 Análisis de los circuitos con diodos</b> . . . . .	<b>1</b>
Introducción . . . . .	1
1.1 Propiedades no lineales — El diodo ideal . . . . .	15
1.2 Introducción a la teoría del diodo semiconductor . . . . .	20
1.2-1 Otra forma de considerar la característica $v_i$ . . . . .	21
1.2-2 Circuito equivalente lineal por trozos . . . . .	21
1.3 Análisis de los circuitos simples con diodos; recta de carga de corriente continua . . . . .	24
1.4 Análisis de señal débil; concepto de resistencia dinámica . . . . .	30
1.5 Análisis de señal débil; recta de carga de corriente alterna . . . . .	31
1.6 El sistema de diodos . . . . .	38
1.7 Generación de función . . . . .	44
1.8 Capacidad del diodo . . . . .	46
1.9 Diodos Schottky . . . . .	48
1.10 Diodos Zener . . . . .	54
1.11 Efectos de la temperatura . . . . .	60
1.12 Características de los fabricantes . . . . .	60
1.12-1 El diodo rectificador . . . . .	62
1.12-2 El diodo Zener . . . . .	64
Referencias . . . . .	64
Problemas . . . . .	64
<b>Capítulo 2 Introducción a los circuitos con transistores</b> . . . . .	<b>78</b>
Introducción . . . . .	78
2.1 Forma en que circula la corriente en el transistor de unión . . . . .	80
2.1-1 La unión emisor-base . . . . .	83
2.1-2 La unión colector-base . . . . .	85
2.2 Amplificación de corriente en el transistor . . . . .	91
2.2-1 Modelo Ebers-Moll de transistor . . . . .	97
2.2-2 El transistor Schottky . . . . .	98
2.3 Análisis gráfico de los circuitos con transistores . . . . .	103
2.3-1 Máxima excursión simétrica . . . . .	107
2.3-2 Ubicación arbitraria del punto $Q$ . . . . .	108
2.4 Cálculos de potencia . . . . .	114
2.5 Condensador de desacople infinito . . . . .	114

2.6	Condensador de acoplamiento infinito . . . . .	118
2.7	Seguidor de emisor . . . . .	121
	2.7-1 Seguidor de emisor en saturación . . . . .	127
	Referencias . . . . .	128
	Problemas . . . . .	128
<b>Capítulo 3</b>	<b>El transistor de efecto de campo . . . . .</b>	<b>135</b>
	Introducción . . . . .	135
3.1	Introducción a la teoría de funcionamiento del JFET . . . . .	136
3.2	Introducción a la teoría de funcionamiento del MOSFET . . . . .	140
3.3	Reversibilidad del drenador y el surtidor . . . . .	146
3.4	FET de canal $p$ . . . . .	147
3.5	MOSFET del modo de empobrecimiento . . . . .	150
	3.5-1 Comparación de los tres tipos de MOSFET . . . . .	150
3.6	El inversor MOSFET . . . . .	151
3.7	MOS de simetría complementaria . . . . .	154
3.8	El interruptor FET . . . . .	157
3.9	Efectos de la temperatura en los MOSFET . . . . .	162
3.10	El dispositivo de acoplamiento de carga . . . . .	163
3.11	Protección de la entrada en el MOSFET . . . . .	167
3.12	FET de potencia . . . . .	168
	Referencias . . . . .	169
	Problemas . . . . .	169
<b>Capítulo 4</b>	<b>Estabilidad de la polarización . . . . .</b>	<b>175</b>
	Introducción . . . . .	175
4.1	Desplazamiento del punto de reposo debido a la variación de $\beta$ . . . . .	176
4.2	Efecto de la temperatura sobre el punto de reposo . . . . .	180
4.3	Análisis del factor de estabilidad . . . . .	182
4.4	Compensación de las variaciones de temperatura mediante la polarización por diodo . . . . .	189
4.5	Estabilidad de polarización en el FET . . . . .	193
4.6	Consideraciones térmicas ambientales en los amplificadores con transistores . . . . .	198
	4.6-1 Condiciones térmicas para el uso del FET de potencia . . . . .	200
4.7	Especificaciones de los fabricantes para transistores de alta potencia ( $P_{Cmax} > 1$ W) . . . . .	202
	Problemas . . . . .	203
<b>Capítulo 5</b>	<b>Amplificadores lineales de potencia en audiofrecuencia . . . . .</b>	<b>210</b>
	Introducción . . . . .	210
5.1	El amplificador de potencia de emisor común clase A . . . . .	210
	5.1-1 Situación del punto de reposo . . . . .	211
	5.1-2 Cálculos de potencia . . . . .	213
	5.1-3 Hipérbola de disipación máxima . . . . .	216
5.2	Amplificador acoplado por transformador . . . . .	222
	5.2-1 Cálculos de potencia . . . . .	224
5.3	Amplificadores de potencia simétricos clase B (push-pull) . . . . .	226
	5.3-1 Determinación de la recta de carga . . . . .	228
	5.3-2 Cálculos de potencia . . . . .	229
	5.3-3 Amplificador push-pull directamente acoplado . . . . .	233
5.4	Amplificadores simétricos complementarios . . . . .	236
	Resumen . . . . .	238
	Problemas . . . . .	239
<b>Capítulo 6</b>	<b>Análisis y proyecto de amplificadores de baja frecuencia para señal débil . . . . .</b>	<b>244</b>
	Introducción . . . . .	244

6.1	Los parámetros híbridos; transistor bipolar de unión . . . . .	245
6.2	Configuración de emisor común (EC) . . . . .	247
6.3	Configuración de base común (BC) . . . . .	256
6.4	Configuración de colector común (CC) (seguidor de emisor) . . . . .	261
6.5	Tabla de parámetros importantes de las tres configuraciones básicas . . . . .	273
6.6	Interpretación de las especificaciones dadas por los fabricantes para transistores de baja potencia ( $P_c < 1$ W) . . . . .	273
6.7	Circuito equivalente del FET para señal débil . . . . .	275
6.8	El amplificador de tensión en configuración de surtidor común . . . . .	277
6.9	El seguidor de surtidor (amplificador en configuración de drenador común) . . . . .	279
6.10	Reflexión de impedancia en el FET . . . . .	283
6.11	El circuito divisor de fase . . . . .	287
6.12	El amplificador en configuración de puerta común . . . . .	289
6.13	El FET de doble puerta . . . . .	290
6.14	Especificaciones de los fabricantes . . . . .	292
	Problemas . . . . .	295
<b>Capítulo 7</b>	<b>Circuitos con varios transistores . . . . .</b>	<b>303</b>
7.1	El amplificador diferencial . . . . .	303
7.2	Relación de rechazo de modo común . . . . .	311
7.3	Amplificador diferencial con fuente de corriente constante . . . . .	313
7.4	Amplificador diferencial con resistores de emisor para el equilibrio . . . . .	318
7.5	Amplificador diferencial utilizando FET . . . . .	320
7.6	El amplificador Darlington . . . . .	323
7.7	El amplificador cascode . . . . .	328
7.8	El amplificador operacional . . . . .	332
7.9	Ejemplo de un amplificador operacional completo . . . . .	333
	Problemas . . . . .	341
<b>Capítulo 8</b>	<b>Aplicaciones de los amplificadores operacionales . . . . .</b>	<b>348</b>
8.1	El amplificador inversor lineal . . . . .	348
8.2	Amplificador lineal no inversor . . . . .	353
8.3	Realimentación . . . . .	355
8.4	Operaciones lineales utilizando el operacional . . . . .	356
8.4.1	El amplificador diferencial . . . . .	356
8.4.2	El amplificador de suma . . . . .	357
8.4.3	Integrador . . . . .	359
8.4.4	Filtro pasatodo . . . . .	360
8.5	Aplicaciones no lineales de los operacionales . . . . .	362
8.5.1	Rectificador de media onda . . . . .	362
8.5.2	Circuito recortador . . . . .	365
8.5.3	Rectificador de onda completa . . . . .	365
8.5.4	Circuito fijador de nivel . . . . .	368
8.5.5	Detector de envolvente . . . . .	371
8.5.6	Limitador . . . . .	372
8.6	Generador de barrido con autoelevación . . . . .	374
8.7	Amplificador logarítmico . . . . .	376
8.8	Fuentes de alimentación reguladas por realimentación . . . . .	380
8.9	Multiplicador analógico de cuatro cuadrantes . . . . .	383
8.10	Control automático de ganancia . . . . .	387
8.11	Consideraciones prácticas en los circuitos con amplificador operacional . . . . .	392
8.12	Otros amplificadores lineales en circuitos integrados . . . . .	397
	Problemas . . . . .	397
<b>Capítulo 9</b>	<b>Limitaciones de frecuencia y de velocidad de conmutación . . . . .</b>	<b>405</b>
9.1	La respuesta de baja frecuencia del amplificador transistorizado . . . . .	407
9.1.1	Condensador de desacoplo de emisor . . . . .	407

9.1.2	Gráficos asintóticos (de Bode) de las funciones transferencia de amplificador . . . . .	409
9.1.3	El condensador de acoplo . . . . .	414
9.1.4	Los condensadores de acoplo de base y colector . . . . .	416
9.1.5	Efecto combinado de los condensadores de desacoplo y de acoplo . . . . .	420
9.2	Respuesta de baja frecuencia del amplificador FET . . . . .	421
9.2.1	El condensador de desacoplo de surtidor . . . . .	421
9.3	El amplificador transistorizado en altas frecuencias . . . . .	423
9.3.1	Circuito híbrido $\pi$ equivalente . . . . .	424
9.3.2	Comportamiento en alta frecuencia del amplificador en configuración de emisor común; capacidad Miller . . . . .	428
9.3.3	El seguidor de emisor en frecuencias altas . . . . .	432
9.4	El FET en altas frecuencias . . . . .	436
9.4.1	Comportamiento en alta frecuencia del amplificador en configuración de surtidor común; capacidad Miller . . . . .	437
9.4.2	Comportamiento en alta frecuencia del seguidor de surtidor . . . . .	440
9.5	Amplificadores sintonizados . . . . .	443
9.5.1	Amplificadores de sintonía única . . . . .	444
9.5.2	Adaptación de impedancias para mejorar la ganancia . . . . .	448
9.5.3	Circuitos resonantes serie . . . . .	451
9.5.4	El amplificador sintonizado sincrónicamente . . . . .	454
9.6	El producto ganancia-ancho de banda . . . . .	456
9.6.1	Producto ganancia-ancho de banda de un amplificador RC . . . . .	456
9.6.2	Producto ganancia-ancho de banda de un amplificador sintonizado . . . . .	459
9.7	El interruptor a transistor . . . . .	459
	Referencias . . . . .	461
	Problemas . . . . .	461
<b>Capítulo 10 Realimentación, compensación de frecuencia de los amplificadores operacionales y osciladores . . . . .</b>		<b>472</b>
10.1	Conceptos básicos de realimentación . . . . .	472
10.1.1	Ganancia de un amplificador realimentado con diferenciación de corriente . . . . .	474
10.1.2	La ganancia de bucle $T$ . . . . .	477
10.1.3	Amplificadores realimentados y función de sensibilidad . . . . .	478
10.2	Respuesta de frecuencia de un amplificador realimentado . . . . .	479
10.2.1	Ancho de banda y producto ganancia-ancho de banda . . . . .	480
10.3	El problema de la estabilidad: un amplificador con tres polos . . . . .	483
10.4	Criterio Nyquist de estabilidad: gráficos de Bode . . . . .	486
10.5	Redes estabilizadoras . . . . .	488
10.5.1	Ausencia de compensación de frecuencia . . . . .	488
10.5.2	Compensación simple del retardo . . . . .	491
10.5.3	Compensación más complicada del retardo . . . . .	494
10.5.4	Compensación del adelanto . . . . .	496
10.6	Compensación de frecuencia de amplificadores operacionales . . . . .	502
10.6.1	Compensación aplicada exteriormente . . . . .	502
10.7	Osciladores senoidales . . . . .	504
10.7.1	El oscilador variador de fase . . . . .	504
10.7.2	El oscilador puente Wien . . . . .	507
10.7.3	El oscilador de circuito sintonizado . . . . .	509
10.7.4	El oscilador Colpitts . . . . .	510
10.7.5	El oscilador Hartley . . . . .	512
	Referencias . . . . .	513
	Problemas . . . . .	513

<b>Capítulo 11</b>	<b>Funciones lógicas y álgebra de Boole</b>	518
	Introducción	518
11.1	Funciones lógicas	518
	11.1-1 La función NO	519
	11.1-2 La tabla de verdad	521
	11.1-3 La función Y	523
	11.1-4 La función O	524
	11.1-5 Combinaciones de las funciones lógicas básicas	526
11.2	Álgebra booleana	527
	11.2-1 Teoremas de Boole	530
11.3	Las funciones NO-Y, NO-O	530
	11.3-1 La función NO-Y	531
	11.3-2 La función NO-O	531
	11.3-3 La función O-exclusiva	532
	11.3-4 Expresiones con todas las operaciones NO-Y o todas las NO-O	533
11.4	Formas normalizadas de funciones lógicas	535
	11.4-1 Sumas de productos	535
	11.4-2 Producto de sumas	537
	11.4-3 Síntesis utilizando expresiones canónicas	537
	11.4-4 Síntesis utilizando únicamente puertas NO-Y o NO-O	538
11.5	Tablas de Karnaugh	539
	11.5-1 Tablas de tres variables	542
	11.5-2 Tablas de cuatro variables	543
11.6	Ejemplo de diseño: una máquina de escrutinio	547
11.7	El sistema de números binarios	549
	11.7-1 Números de los sistemas octal y hexadecimal	552
	Referencias	553
	Problemas	553
		558
<b>Capítulo 12</b>	<b>Puertas lógicas</b>	558
	Introducción	558
12.1	El inversor (puerta NO)	559
	12.1-1 Margen de ruido	562
	12.1-2 Cargabilidad de salida ( <i>fan-out</i> )	563
12.2	Lógica transistor-transistor (TTL)	564
	12.2-1 Etapas de salida: carga activa ( <i>pull-up</i> )	566
	12.2-2 Lógica Y cableada	569
	12.2-3 Características de transferencia TTL	572
	12.2-4 TTL Schottky con fijación de tensión	573
	12.2-5 Interpretación de las hojas de datos de los fabricantes	575
12.3	Lógica de emisor acoplado (ECL)	583
	12.3-1 Una puerta ECL comercial, Motorola Semiconductor MECL 10 000	586
	12.3-2 Cálculo de los niveles de corriente y de tensión	588
	12.3-3 Circuito de la tensión de referencia	590
	12.3-4 Conexión O cableada	591
	12.3-5 Reducción del ruido de la fuente de alimentación	591
	12.3-6 Interconexión de puertas utilizando líneas de transmisión	593
	12.3-7 Especificaciones del fabricante	597
12.4	Lógica CMOS	602
	12.4-1 Puertas básicas CMOS	603
	12.4-2 Especificaciones del fabricante	604
12.5	Acoplamiento (interface)	608
12.6	Comparación de familias lógicas	612
	Referencias	612
	Problemas	614
		615

<b>Capítulo 13</b>	<b>Flip-flops</b>	618
	Introducción	618
13.1	El flip-flop <i>RS</i>	620
	13.1-1 El flip-flop <i>RS</i> sincronizado	627
13.2	El flip-flop <i>RS</i> principal-subordinado (master-slave)	630
13.3	El flip-flop <i>JK</i>	632
13.4	Flip-flop <i>JK</i> activado por flancos	634
13.5	El flip-flop <i>D</i> (retardado)	636
13.6	Flip-flops existentes en el mercado	638
	13.6-1 TTL	638
	13.6-2 ECL	642
	13.6-3 CMOS	642
13.7	Comparación de los flip-flops de las diversas familias	643
	Problemas	644
<b>Capítulo 14</b>	<b>Registros, contadores y circuitos aritméticos</b>	649
	Introducción	649
14.1	Registros de desplazamiento	649
	14.1-1 Registros de desplazamiento en serie	650
	14.1-2 Registros de desplazamiento en paralelo	651
	14.1-3 Registro universal de desplazamiento	652
	14.1-4 Registro de desplazamiento primero en entrar-primero en salir	655
14.2	Contadores	657
	14.2-1 El contador asíncrono	658
	14.2-2 Contadores síncronos	662
	14.2-3 Contador síncrono no binario: módulo 3	664
	14.2-4 Contadores de registro de desplazamiento	665
	14.2-5 Contadores de circuito integrado existentes en el mercado	669
14.3	Circuitos aritméticos	670
	14.3-1 Adición de dos dígitos binarios: el semisumador	670
	14.3-2 Adición de más de dos bits: el sumador completo	671
	14.3-3 Sumadores de acarreo anticipado	675
	14.3-4 Adición de una sucesión o secuencia de números: acumulación	678
	14.3-5 Sustracción	679
	14.3-6 Números con signo	681
	14.3-7 Adición y sustracción utilizando la notación de complemento a dos	683
	14.3-8 Multiplicación por una constante	684
14.4	Filtros digitales	686
	14.4-1 Respuesta senoidal	689
	14.4-2 Realización del circuito de filtro digital de primer orden	694
	Referencias	694
	Problemas	694
<b>Capítulo 15</b>	<b>Circuitos de muestreo y mantenimiento, convertidores digital-analógico y analógico-digital, y circuitos temporizadores</b>	702
15.1	Circuitos de muestreo y mantenimiento	702
	15.1-1 Un circuito práctico	705
15.2	Convertidores digital-analógicos	707
	15.2-1 El convertidor D/A con resistor ponderado	707
	15.2-2 El convertidor en escalera <i>R-2R</i>	709
	15.2-3 Conmutadores utilizados en los convertidores D/A	713
	15.2-4 Especificaciones de los fabricantes	718
15.3	Convertidores analógico-digitales	719
	15.3-1 Comparadores analógicos	720

	15.3.2	Convertidor A/D controlado por contador . . . . .	720
	15.3.3	Convertidor D/A por aproximaciones sucesivas . . . . .	722
	15.3.4	Especificaciones de los fabricantes . . . . .	725
15.4		Circuitos de temporización . . . . .	725
	15.4.1	Multivibrador monoestable . . . . .	726
	15.4.2	Multivibrador astable . . . . .	727
	15.4.3	El temporizador de circuito integrado 555 . . . . .	729
		Referencias . . . . .	731
		Problemas . . . . .	731
<b>Capítulo 16</b>		<b>Circuitos integrados . . . . .</b>	<b>737</b>
		Introducción . . . . .	737
16.1		Introducción a la fabricación de un transistor de circuito integrado . . . . .	739
16.2		Circuito equivalente del transistor integrado . . . . .	741
16.3		El diodo integrado . . . . .	743
16.4		El condensador integrado . . . . .	745
	16.4.1	El condensador de unión . . . . .	745
	16.4.2	El condensador de película delgada . . . . .	746
16.5		El resistor integrado . . . . .	747
	16.5.1	El resistor de unión . . . . .	747
	16.5.2	El resistor de película delgada . . . . .	749
16.6		El inductor integrado . . . . .	751
16.7		Cálculo de un circuito integrado sencillo . . . . .	751
16.8		Integración en gran escala . . . . .	751
16.9		Lógica integrada de inyección (I <sup>2</sup> L) . . . . .	754
		Referencia . . . . .	757
		Problemas . . . . .	758
<b>Apéndice A</b>		<b>Ganancia expresada en unidades logarítmicas; el decibelio . . . . .</b>	<b>761</b>
<b>Apéndice B</b>		<b>Valores estándar de resistencia y capacidad . . . . .</b>	<b>763</b>
	B.1	Resistores . . . . .	763
	B.2	Condensadores . . . . .	763
<b>Apéndice C</b>		<b>Características de dispositivos . . . . .</b>	<b>765</b>
	C.1	Especificaciones del diodo Zener . . . . .	765
	C.2	Características de transistor . . . . .	766
	C.3	Características de los FET . . . . .	777