



## CONTENIDO CONDENSADO

PRÓLOGO v

**Capítulo 1** INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓNICA 1

### PRIMERA PARTE DISPOSITIVOS Y CIRCUITOS BÁSICOS 58

**Capítulo 2** AMPLIFICADORES OPERACIONALES 60

**Capítulo 3** DIODOS 122

**Capítulo 4** TRANSISTORES DE UNIÓN BIPOLAR (BJT) 221

**Capítulo 5** TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO (FET) 353

### SEGUNDA PARTE CIRCUITOS ANALÓGICOS 484

**Capítulo 6** AMPLIFICADORES DIFERENCIALES Y DE VARIAS ETAPAS 487

**Capítulo 7** RESPUESTA EN FRECUENCIA 583

**Capítulo 8** RETROALIMENTACIÓN 667

**Capítulo 9** ETAPAS DE SALIDA Y AMPLIFICADORES DE POTENCIA 751

**Capítulo 10** CIRCUITOS INTEGRADOS ANALÓGICOS 810

**Capítulo 11** FILTROS Y AMPLIFICADORES SINTONIZADOS 884

**Capítulo 12** GENERADORES DE SEÑALES Y CIRCUITOS CONFORMADORES DE ONDAS 973

### TERCERA PARTE CIRCUITOS DIGITALES 1040

**Capítulo 13** CIRCUITOS DIGITALES MOS 1042

**Capítulo 14** CIRCUITOS DIGITALES BIPOLARES Y DE TECNOLOGÍA AVANZADA 1158

### APÉNDICES

**A** TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN VLSI A-1

**B** PARÁMETROS DE RED DE DOS PUERTOS B-1

**C** UNA INTRODUCCIÓN AL SPICE C-1

**D** ARCHIVOS DE ENTRADA PARA EJEMPLOS DEL SPICE D-1

**E** ALGUNOS TEOREMAS ÚTILES DE REDES E-1

**F** CIRCUITOS DE UNA CONSTANTE DE TIEMPO F-1

**G** DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE PARÁMETRO DEL MODELO HÍBRIDO  $\pi$  BJT G-1

**H** VALORES ESTÁNDAR DE RESISTENCIA Y PREFIJOS DE UNIDADES H-1

**I** RESPUESTAS A PROBLEMAS SELECCIONADOS I-1

ÍNDICE IN-1



## CONTENIDO DETALLADO

### PRÓLOGO v

### Capítulo 1 INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓNICA 1

#### Introducción 1

- 1.1 Señales 2
- 1.2 Espectro de frecuencias de señales 3
- 1.3 Señales analógicas y digitales 6
- 1.4 Amplificadores 9
- 1.5 Modelos de circuitos para amplificadores 19
- 1.6 Respuesta en frecuencia de amplificadores 28
- 1.7 El inversor lógico digital 39
- Resumen 47
- Bibliografía 48
- Problemas 48

### PRIMERA PARTE DISPOSITIVOS Y CIRCUITOS BÁSICOS 58

### Capítulo 2 AMPLIFICADORES OPERACIONALES 60

#### Introducción 60

- 2.1 Los terminales del op amp 61
- 2.2 El op amp ideal 62
- 2.3 Análisis de circuitos con op amps ideales; la configuración inversora 64
- 2.4 Otras aplicaciones de la configuración inversora 71
  - 2.4.1 La configuración inversora con impedancias generales  $Z_1$  y  $Z_2$  71
  - 2.4.2 El integrador inversor 73
  - 2.4.3 El op amp diferenciador 78
  - 2.4.4 El sumador ponderado 80
- 2.5 La configuración no inversora 81
- 2.6 Ejemplos de circuitos con op amp 85
- 2.7 Efecto de ganancia finita a circuito abierto y ancho de banda en el funcionamiento de un circuito 92
- 2.8 Operación de op amps a gran señal 97
- 2.9 Imperfecciones de cd 101
- Resumen 108
- Bibliografía 109
- Problemas 110

**Capítulo 3 DIODOS 122**

- Introducción 122
- 3.1 El diodo ideal 123
- 3.2 Curvas características terminales de diodos de unión 131
- 3.3 Operación física de diodos 137
  - 3.3.1 Conceptos básicos de semiconductores 138
  - 3.3.2 La unión  $pn$  en condiciones de circuito abierto 143
  - 3.3.3 La unión  $pn$  en condiciones de polarización inversa 146
  - 3.3.4 La unión  $pn$  en la región de ruptura 149
  - 3.3.5 La unión  $pn$  en condiciones de polarización directa 151
  - 3.3.6 Resumen 155
- 3.4 Análisis de circuitos con diodos 155
- 3.5 El modelo a pequeña señal y su aplicación 163
- 3.6 Operación en la región de ruptura inversa. Diodos Zener 172
- 3.7 Circuitos rectificadores 179
- 3.8 Circuitos limitadores y de fijación de amplitud 191
- 3.9 Tipos especiales de diodos 196
- 3.10 El modelo SPICE de un diodo y ejemplos de simulación 199
- Resumen 206
- Bibliografía 206
- Problemas 207

**Capítulo 4 TRANSISTORES DE UNIÓN BIPOLAR (BJT) 221**

- Introducción 221
- 4.1 Estructura física y modos de operación 222
- 4.2 Operación del transistor  $nnp$  en el modo activo 223
- 4.3 El transistor  $pnp$  232
- 4.4 Símbolos y convenciones de circuitos 234
- 4.5 Representación gráfica de curvas características de transistores 238
- 4.6 Análisis de circuitos transistorizados con cd 241
- 4.7 El transistor como amplificador 253
- 4.8 Modelos de circuito equivalente a pequeña señal 259
- 4.9 Análisis gráfico 272
- 4.10 Polarización del BJT para diseño de un circuito discreto 276
- 4.11 Configuraciones básicas de amplificadores de BJT de una etapa 282
- 4.12 El transistor como interruptor; corte y saturación 295
- 4.13 Un modelo general a gran señal para el BJT: el modelo Ebers-Moll (EM) 303
- 4.14 El inversor lógico básico de BJT 310
- 4.15 Curvas características estáticas completas, capacitancias internas y efectos de segundo orden 315
- 4.16 El modelo SPICE de un BJT y ejemplos de simulación 326
- Resumen 331
- Bibliografía 332
- Problemas 333

## xvi CONTENIDO DETALLADO

**Capítulo 5 TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO (FET) 353**

- Introducción 353
- 5.1 Estructura y operación física del MOSFET del tipo de enriquecimiento 354
- 5.2 Curvas características de corriente contra voltaje del MOSFET de enriquecimiento 366
- 5.3 El MOSFET del tipo de agotamiento 376
- 5.4 Circuitos con MOSFET en cd 380
- 5.5 El MOSFET como amplificador 389
- 5.6 Polarización en circuitos amplificadores MOS 400
  - 5.6.1 Polarización de amplificadores MOSFET discretos 400
  - 5.6.2 Polarización en amplificadores MOS de circuitos integrados 402
- 5.7 Configuraciones básicas de amplificadores de una etapa con MOS de circuito integrado 408
  - 5.7.1 El amplificador CMOS de fuente común 409
  - 5.7.2 El amplificador CMOS de compuerta común 413
  - 5.7.3 La configuración de dren común o seguidor de fuente 416
  - 5.7.4 Etapas amplificadoras con NMOS 419
  - 5.7.5 Una observación final 425
- 5.8 El inversor lógico digital CMOS 425
- 5.9 El MOSFET como interruptor analógico 436
- 5.10 Capacitancias internas del MOSFET y modelo de alta frecuencia 441
- 5.11 El transistor de unión de efecto de campo (JFET) 447
- 5.12 Dispositivos de arseniuro de galio (GaAs); el MESFET 452
- 5.13 El modelo MOSFET de SPICE y ejemplos de simulación 458
- Resumen 464
- Bibliografía 464
- Problemas 466

**SEGUNDA PARTE CIRCUITOS ANALÓGICOS 484****Capítulo 6 AMPLIFICADORES DIFERENCIALES Y DE VARIAS ETAPAS 487**

- Introducción 487
- 6.1 El par diferencial BJT 487
- 6.2 Operación del amplificador diferencial BJT a pequeña señal 492
- 6.3 Otras características no ideales del amplificador diferencial 504
- 6.4 Polarización en circuitos integrados con BJT 508
- 6.5 El amplificador diferencial BJT con carga activa 522
- 6.6 Amplificadores diferenciales con MOS 527
- 6.7 Amplificadores BiCMOS 537
- 6.8 Amplificadores de GaAs 542
- 6.9 Amplificadores de varias etapas 551
- 6.10 Ejemplo de simulación en el programa SPICE 558
- Resumen 563
- Bibliografía 564
- Problemas 564

**Capítulo 7 RESPUESTA EN FRECUENCIA 583**

## Introducción 583

- 7.1 Análisis del dominio  $s$ : polos, ceros y diagramas de Bode 584
- 7.2 Función de transferencia del amplificador 590
- 7.3 Respuesta a baja frecuencia de amplificadores de fuente común y emisor común 602
- 7.4 Respuesta a alta frecuencia de amplificadores de fuente común y emisor común 610
- 7.5 Las configuraciones de base común, compuerta común y cascode 619
- 7.6 Respuesta en frecuencia de seguidores de emisor y de fuente 626
- 7.7 Cascada de colector común y emisor común 630
- 7.8 Respuesta en frecuencia de un amplificador diferencial 635
- 7.9 Ejemplos de simulación SPICE 645
- Resumen 649
- Bibliografía 650
- Problemas 650

**Capítulo 8 RETROALIMENTACIÓN 667**

## Introducción 667

- 8.1 Estructura general de retroalimentación 668
- 8.2 Algunas propiedades de la retroalimentación negativa 670
- 8.3 Cuatro topologías básicas de retroalimentación 675
- 8.4 Amplificador de retroalimentación en serie-paralelo 679
- 8.5 Amplificador de retroalimentación en serie-serie 688
- 8.6 Amplificadores con retroalimentación en paralelo-paralelo y paralelo-serie 696
- 8.7 Determinación de la ganancia de bucle 708
- 8.8 El problema de la estabilidad 713
- 8.9 Efecto de la retroalimentación en los polos de un amplificador 715
- 8.10 Estudio de estabilidad usando diagramas de Bode 725
- 8.11 Compensación de frecuencia 729
- 8.12 Ejemplos de simulación del SPICE 735
- Resumen 740
- Bibliografía 740
- Problemas 741

**Capítulo 9 ETAPAS DE SALIDA Y AMPLIFICADORES DE POTENCIA 751**

## Introducción 751

- 9.1 Clasificación de etapas de salida 752
- 9.2 Etapa de salida clase A 753
- 9.3 Etapa de salida clase B 758

## xviii CONTENIDO DETALLADO

- 9.4 Etapa de salida clase AB 764
- 9.5 Polarización del circuito clase AB 767
- 9.6 Los BJT de potencia 773
- 9.7 Variaciones en la configuración clase AB 780
- 9.8 Amplificadores de potencia de circuito integrado (IC) 785
- 9.9 Transistores MOS de potencia 792
- 10 Ejemplo de simulación del SPICE 797
- Resumen 802
- Bibliografía 802
- Problemas 803

**Capítulo 10** CIRCUITOS INTEGRADOS ANALÓGICOS 810

- Introducción 810
- 10.1 El circuito op amp 741 811
- 10.2 Análisis de cd del 741 815
- 10.3 Análisis a pequeña señal de la etapa de entrada del 741 822
- 10.4 Análisis a pequeña señal de la segunda etapa del 741 828
- 10.5 Análisis de la etapa de salida del 741 830
- 10.6 Ganancia y respuesta en frecuencia del 741 835
- 10.7 Op amps de CMOS 840
- 10.8 Configuraciones alternativas para op amps de CMOS y BiCMOS 850
- 10.9 Convertidores de datos; introducción 856
- 10.10 Circuitos convertidores D/A 860
- 10.11 Circuitos convertidores A/D 864
- 10.12 Ejemplo de simulación del SPICE 870
- Resumen 874
- Bibliografía 875
- Problemas 876

**Capítulo 11** FILTROS Y AMPLIFICADORES SINTONIZADOS 884

- Introducción 884
- 11.1 Transmisión de filtro, tipos y especificación 885
- 11.2 Función de transferencia de un filtro 889
- 11.3 Filtros Butterworth y Chebyshev 892
- 11.4 Funciones de filtro de primer orden y segundo orden 900
- 11.5 El resonador LCR de segundo orden 909
- 11.6 Filtros activos de segundo orden basados en cambio de inductor 915
- 11.7 Filtros activos de segundo orden basados en topología de lazo de dos integradores 923
- 11.8 Filtros activos bicuadráticos de un solo amplificador 930
- 11.9 Sensibilidad 938

- 11.10 Filtros de condensador conmutado 941
- 11.11 Amplificadores sintonizados 946
- 11.12 Ejemplos de simulación del SPICE 959
  - Resumen 965
  - Bibliografía 966
  - Problemas 967

## **Capítulo 12** GENERADORES DE SEÑALES Y CIRCUITOS CONFORMADORES DE ONDAS 973

- Introducción 973
- 12.1 Principios básicos de osciladores senoidales 974
- 12.2 Circuitos osciladores con op amp-RC 980
- 12.3 Osciladores LC y cristal 988
- 12.4 Multivibradores biestables 994
- 12.5 Generación de ondas cuadradas y triangulares por medio de multivibradores astables 1002
- 12.6 Generación de un pulso estandarizado; el multivibrador monoestable 1007
- 12.7 Temporizadores de circuito integrado 1009
- 12.8 Circuitos conformadores de onda no lineales 1014
- 12.9 Circuitos rectificadores de precisión 1018
- 12.10 Ejemplos de simulación del SPICE 1026
  - Resumen 1030
  - Bibliografía 1030
  - Problemas 1031

## **TERCERA PARTE CIRCUITOS DIGITALES 1040**

### **Capítulo 13** CIRCUITOS DIGITALES MOS 1042

- Introducción 1042
- 13.1 Diseño de circuitos digitales: un repaso 1043
  - 13.1.1 Tecnologías de IC digitales y familias de circuitos lógicos 1043
  - 13.1.2 Caracterización de circuito lógico 1045
  - 13.1.3 Estilos para diseño de sistemas digitales 1048
  - 13.1.4 Abstracción de diseño y ayudas de computadora 1048
- 13.2 Análisis de diseño y operación del inversor CMOS 1049
- 13.3 Circuitos CMOS de compuertas lógicas 1058
- 13.4 Circuitos lógicos pseudo-NMOS 1070
- 13.5 Circuitos lógicos de transistor de paso 1080
- 13.6 Circuitos lógicos dinámicos 1090
- 13.7 Elementos de memoria (candados) y flip-flops 1097
- 13.8 Circuitos multivibradores 1106
- 13.9 Memorias de semiconductor: tipos y arquitecturas 1113

## xx CONTENIDO DETALLADO

- 13.10 Celdas de memoria de acceso aleatorio (RAM) 1116
- 13.11 Amplificadores de salida y decodificadores de dirección 1125
  - 13.11.1 El amplificador de salida 1125
  - 13.11.2 El decodificador de dirección de fila 1131
  - 13.11.3 El decodificador de dirección de columna 1133
- 13.12 Memoria de sólo lectura (ROM) 1134
- 13.13 Ejemplo de simulación del SPICE 1140
  - Resumen 1144
  - Bibliografía 1146
  - Problemas 1146

**Capítulo 14** CIRCUITOS DIGITALES BIPOLARES Y DE TECNOLOGÍA AVANZADA 1158

- Introducción 1158
- 14.1 Operación dinámica del interruptor BJT 1159
- 14.2 Primeras formas de circuitos digitales BJT 1163
- 14.3 Circuitos lógicos de transistor-transistor (TTL o T<sup>2</sup>L) 1167
- 14.4 Curvas características de un TTL estándar 1180
- 14.5 Familias TTL con rendimiento mejorado 1187
- 14.6 Circuitos lógicos acoplados por emisor (ECL) 1195
- 14.7 Circuitos digitales con BiCMOS 1211
- 14.8 Circuitos digitales de arseniuro de galio 1216
- 14.9 Ejemplo de simulación del SPICE 1224
  - Resumen 1230
  - Bibliografía 1231
  - Problemas 1232

**APÉNDICES**

- A** TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN VLSI A-1
- B** PARÁMETROS DE RED DE DOS PUERTOS B-1
- C** UNA INTRODUCCIÓN AL SPICE C-1
- D** ARCHIVOS DE ENTRADA PARA EJEMPLOS DEL SPICE D-1
- E** ALGUNOS TEOREMAS ÚTILES DE REDES E-1
- F** CIRCUITOS DE UNA CONSTANTE DE TIEMPO F-1
- G** DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE PARÁMETRO DEL MODELO HÍBRIDO  $\pi$  BJT G-1
- H** VALORES ESTÁNDAR DE RESISTENCIA Y PREFIJOS DE UNIDADES H-1
- I** RESPUESTAS A PROBLEMAS SELECCIONADOS I-1

ÍNDICE IN-1