

## Indice

---

Prefacio . . . . .	V
1. Bandas de energía en los sólidos . . . . .	1
1-1. Partículas cargadas, 1. — 1-2. Intensidad de campo. potencial, energía, 3. — <i>Potencial</i> , 2. — <i>Concepto de barrera de energía potencial</i> , 3. — 1-3. La unidad de energía eV, 4. — 1-4. Naturaleza del átomo, 5. — <i>El átomo de Bohr</i> , 6. — 1-5. Niveles de energía atómica, 7. — <i>Colisión de los electrones con los átomos</i> , 8. — <i>Naturaleza del fotón de luz</i> , 8. — <i>Líneas espectrales</i> , 9. — <i>Fotoionización</i> , 9. — <i>Mecánica ondulatoria</i> , 9. — 1-6. Estructura electrónica de los elementos, 10. — <i>El principio de exclusión</i> , 10. — <i>Capa electrónica</i> , 12. — 1-7. Teoría de las bandas de energía de los cristales, 13. — 1-8. Aislantes, semiconductores y metales, 15. — <i>Aislantes</i> , 15. — <i>Semiconductor</i> , 15. — <i>Metal</i> , 16. — Referencias, 16. — Temas de repaso, 17.	
2. El fenómeno del transporte en los semiconductores . . . . .	19
2-1. Movilidad y conductibilidad, 19. — <i>Densidad de corriente</i> , 20. — <i>Conductividad</i> , 21. — 2-2. Los huecos y los electrones en un semiconductor intrínseco, 22. — <i>El enlace covalente</i> , 22. — <i>El hueco</i> , 23. — <i>Masa efectiva</i> , 24. — 2-3. Impurezas donadoras y aceptadoras, 24. — <i>Donadores</i> , 25. — <i>Aceptadores</i> , 26. — <i>Ley de acción de masas</i> , 27. — 2-4. Densidades de carga en un semiconductor, 27. — 2-5. Propiedades electrónicas del Ge y del Si, 28. — <i>Conductividad</i> , 28. — <i>Concentración intrínseca</i> , 28. — <i>La banda vacía</i> , 29. — <i>La movilidad</i> , 29. — 2-6. El efecto Hall, 31. — <i>Determinación experimental de la movilidad</i> , 31. — <i>Aplicaciones</i> , 32. — 2-7. Modulación de la conductivi-	

dad, 32. — *Termistores*, 32. — *Fotoconductores*, 33. — *Respuesta espectral*, 34. — *Células fotoconductoras comerciales*, 35. — 2-8. Generación y recombinación de cargas, 35. — *Centros de recombinación*, 37. — 2-9. Difusión, 38. — *Relación de Einstein*, 38. — *Corriente total*, 39. — 2-10. La ecuación de continuidad, 39. — 2-11. Inyección de carga de portadores minoritarios, 40. — *Corrientes de difusión*, 42. — *Corrientes de desplazamiento*, 43. — 2-12. La variación de potencial en un semiconductor, 43. — *Ley de acción de masas*, 44. — *Unión abrupta en circuito abierto*, 45. — 2-13. Recapitulación, 45. — Referencias, 46. — Temas de repaso, 47.

### 3. Características de los diodos de unión . . . . . 49

3-1. Unión *p-n* en circuito abierto, 49. — *Región de la carga espacial*, 49. — *Intensidad de campo eléctrico*, 51. — *Potencial*, 51. — *Resumen*, 51. — 3-2. La unión *p-n* como rectificador, 52. — *Polarización inversa*, 52. — *Polarización directa*, 53. — *Contactos óhmicos*, 53. — *La unión p-n en circuito abierto y en cortocircuito*, 54. — *Grandes tensiones directas*, 54. — 3-3. Componentes de corriente en un diodo *p-n*, 54. — *Ley de la unión*, 55. — *La corriente total del diodo*, 56. — *Corriente de saturación inversa*, 56. — *Componentes de la corriente de los portadores mayoritarios*, 56. — *La región de transición*, 57. — 3-4. Característica tensión-corriente, 57. — *Tensión umbral*, 58. — *Características logarítmicas*, 59. — *Corriente de saturación inversa*, 60. — 3-5. Dependencia de la característica  $V/I$  con respecto a la temperatura, 60. — 3-6. Resistencia del diodo, 61. — *Característica lineal aproximada del diodo*, 62. — 3-7. Capacidad de la carga espacial o de transición  $C_T$ , 62. — *Unión brusca o abrupta*, 63. — *Unión gradual lineal*, 65. — *Diodos de capacidad variable (varicaps)*, 66. — 3-8. Modelo del control de la carga de un diodo, 67. — *Carga almacenada en la polarización inversa*, 68. — 3-9. Capacidad de difusión, 69. — *Obtención estática de  $C_D$* , 69. — *Capacidad de difusión para una entrada arbitraria*, 69. — *Capacidad de difusión para una entrada senoidal*, 71. — 3-10. Tiempo de conmutación del diodo de unión, 71. — *Tiempo de recuperación en inversa del diodo*, 71. — *Tiempos de transición y de almacenamiento*, 71. — 3-11. Diodos de avalancha, 73. — *Multipliación de la avalancha*, 74. — *Ruptura Zener*, 74. — *Características de temperatura*, 74. — *Resistencia y capacidad dinámicas*, 75. — *Diodos de referencia adicional*, 75. — 3-12. Diodo túnel, 76. — *Efecto-túnel*, 76. — *Características de un diodo túnel*, 76. — 3-13. Fotodiodo semiconductor, 78. — *Características de tensión-corriente*, 78. — *Variación de la sensibilidad según la posición de la iluminación*, 80. — 3-14. Efecto fotovoltaico, 80. — *Potencial fotovoltaico*, 81. — *Potencial de salida máxima*, 82. — *Corriente de cortocircuito*, 82. — *Convertidores de energía solar*, 82. — 3-15. Diodos emisores de luz, 82. — Referencias, 83. — Temas de repaso, 84.

### 4. Circuitos de diodos . . . . . 87

4-1. El diodo como elemento de un circuito, 87. — *Recta de carga*, 87. —

*Característica dinámica*, 88. — *Característica de transferencia*, 89. — 4-2. Concepto de recta de carga, 89. — 4-3. Modelo aproximado lineal de un diodo, 90. — *Aplicación elemental*, 91. — *Región de ruptura*, 92. — *Análisis de circuitos de diodos empleando el modelo aproximado lineal*, 93. — 4-4. Circuitos recortadores (limitadores), 93. — *Circuitos recortadores adicionales*, 95. — 4-5. Recorte a dos diferentes niveles, 96. — *Diodos de sujeción o de fijación*, 97. — 4-6. Comparadores, 98. — 4-7. Puerta de discriminación, 100. — *Condiciones de equilibrio*, 101. — 4-8. Rectificadores, 102. — *Rectificador de media onda*, 102. — *La tensión del diodo*, 103. — *La corriente (tensión) alterna*, 104. — *Regulación*, 105. — *Teorema de Thévenin*, 106. — *Rectificador de onda completa*, 106. — *Tensión inversa de pico*, 107. — 4-9. Otros circuitos de onda completa, 107. — *Rectificador en puente*, 107. — *Medidores con rectificación*, 108. — *Multiplicadores de tensión*, 108. — 4-10. Filtros de condensador, 109. — *Diodo en estado de conducción*, 110. — *Diodo en estado de bloqueo*, 111. — *Circuito de onda completa*, 111. — *Análisis aproximado*, 112. — 4-11. Circuitos de diodos adicionales, 113. — *Detector de picos*, 113. — *Circuito limitador*, 114. — *Circuitos de calculadoras digitales*, 114. — *Reguladores constituidos por diodos de avalancha*, 115. — Referencias, 115. — Temas de repaso, 115.

## 5. Características de los transistores

117

5-1. El transistor de unión, 117. — *El transistor en circuito abierto*, 118. — *Polarización del transistor en la región activa*, 118. — 5-2. Componentes de la corriente del transistor, 120. — *Ganancia de corriente  $\alpha$  con grandes señales*, 121. — *Ecuación generalizada del transistor*, 122. — 5-3. El transistor como amplificador, 122. — *El parámetro  $\alpha'$* , 123. — 5-4. Fabricación de transistores, 123. — *Tipo de crecimiento*, 123. — *Tipo de aleación*, 123. — *Tipo de difusión*, 124. — *Tipo epitaxial*, 124. — 5-5. Configuración en base común, 125. — *Efecto Early o modulación de la anchura de la base*, 126. — *Características de entrada*, 127. — *Características de salida*, 127. — *Región activa*, 128. — *Región de saturación*, 128. — *Región de corte*, 128. — 5-6. Configuración en emisor común, 128. — *Características de entrada*, 130. — *Características de salida*, 130. — 5-7. Región de corte en emisor común, 133. — *Corriente inversa de saturación de colector  $I_{CBO}$* , 133. — *Consideraciones del circuito al corte*, 134. — 5-8. Región de saturación en emisor común, 134. — *Resistencia de saturación*, 135. — *Resistencia de dispersión de la base  $r_{bb}$* , 136. — *El coeficiente de temperatura de las tensiones de saturación*, 136. — *Ganancia de corriente continua  $h_{FE}$* , 136. — 5-9. Valores típicos de las tensiones de los transistores de unión, 137. — *Región de corte*, 137. — *La base en cortocircuito*, 137. — *La base en circuito abierto*, 137. — *Tensión umbral*, 137. — *Tensiones de saturación*, 139. — *Resumen*, 140. — 5-10. Ganancia de corriente en emisor común, 141. — *Ganancia de corriente con señales grandes  $\beta$* , 141. — *Ganancia en corriente continua  $h_{FE}$* , 142. — *Ganancia de corriente con pequeña señal  $h_{fe}$* , 142. — 5-11. Configuración en colector común, 142. — 5-12. Expresiones analíticas de las características del transistor, 143. — *Polaridades de referencia*, 144. — *Modelo de Ebers-Moll*, 144. — *Tensiones en*

*función de las corrientes, 145. — 5-13. Máxima tensión alcanzable, 147. — Multiplicación de avalancha, 147. — Perforación, 148. — 5-14. El fototransistor, 149. — Referencias, 150. — Temas de repaso, 151.*

## 6. Circuitos digitales . . . . . 155

6-1. Operaciones digitales (binarias) de un sistema, 155. — *Sistemas lógicos, 157. — 6-2. Puerta O, 158. — Identidades de Boole, 160. — 6-3. Puerta Y, 160. — Identidades de Boole, 162. — 6-4. Circuito NO, o inversor, 162. — Limitaciones del transistor, 164. — Identidades de Boole, 165. — 6-5. Tiempos de conmutación del transistor, 165. — Tiempo de retardo, 166. — Tiempos de subida y de caída, 167. — Tiempo de almacenamiento, 167. — 6-6. Función de inhibición y habilitación, 168. — 6-7. Circuito O exclusivo, 169. — Lógica de dos niveles, 171. — 6-8. Leyes de Morgan, 171. — 6-9. Puertas lógicas NAND y NOR con diodos y transistores, 173. — 6-10. Puertas DTL modificadas (circuitos integrados), 178. — Fan-out, 180. — Interconexión lógica, 182. — 6-11. Puerta lógica de umbral elevado (HTL), 183. — 6-12. Puerta lógica transistor - transistor (TTL), 183. — 6-13. Etapas de salida, 184. — Interconexión lógica, 187. — Otras etapas de salida, 187. — 6-14. Lógica de transistores y resistencia (RTL) y lógica de transistores directamente acoplados (DCTL), 187. — Lógica de transistor resistencia (RTL), 188. — Lógica de transistores directamente acoplados (DCTL), 189. — 6-15. Comparación de familias lógicas, 190. — Retraso de la propagación, 190. — Funciones, 191. — Referencias, 192. — Temas de repaso, 193.*

## 7. Circuitos integrados: fabricación y características . . . . . 195

7-1. Tecnología de los circuitos integrados, 195. — 7-2. Circuitos integrados monolíticos básicos, 196. — 1.<sup>er</sup> paso. Crecimiento epitaxial, 197. — 2.<sup>o</sup> paso. Difusión del aislamiento, 197. — 3.<sup>er</sup> paso. Difusión de la base, 199. — 4.<sup>o</sup> paso. Difusión del emisor, 199. — 5.<sup>o</sup> paso. Metalización con aluminio, 200. — Resumen, 200. — 7-3. Crecimiento epitaxial, 200. — 7-4. Enmascarado y corrosión, 202. — 7-5. Difusión de impurezas, 202. — Ley de difusión, 202. — Función complementaria de error, 203. — Distribución de Gauss, 203. — Solubilidad del sólido, 204. — Coeficientes de difusión, 205. — Aparatos de difusión generalizados, 206. — 7-6. Transistores para circuitos monolíticos, 207. — Perfil de impurezas para un transistor integrado, 208. — Aspecto físico de los transistores monolíticos, 210. — Capa enterrada, 211. — Transistor lateral p-n-p, 212. — Transistor p-n-p vertical, 212. — Transistor p-n-p de superganancia, 212. — 7-7. Diodos monolíticos, 213. — Características del diodo, 213. — 7-8. Resistencias integradas, 214. — Resistencia pelicular, 214. — Valores de resistencia, 216. — Circuito equivalente, 216. — Resistencias de película delgada, 217. — 7-9. Condensadores e inductancias integrados, 217. — Condensadores de unión, 217. — Condensadores de película delgada, 218. — Inductancias, 219. — Características de los componentes integrados, 219. — 7-10. Esquema de circuitos monolíticos, 219. — Reglas para diseñar el esque-

*ma monolítico*, 219. — *Terminales de conexión*, 220. — *Cruces*, 220. — *Islas aisladas*, 220. — *Secuencia de fabricación*, 221. — 7-11. Otros métodos de aislamiento, 223. — *Aislamiento con dieléctrico*, 223. — *Haz de terminales*, 223. — *Circuitos híbridos*, 225. — 7-12. Integración a gran escala y a media escala (LSI y MSI), 225. — *Integración a media escala*, 225. — 7-13. Contacto metal semiconductor, 226. — *Transistor Schottky*, 227. — Referencias, 228. — Temas de repaso, 229.

## 8. El transistor a bajas frecuencias . . . . . 231

8-1. Análisis gráfico de la configuración en EC, 231. — *Observación*, 232. — *Forma de onda*, 233. — 8-2. El cuadripolo y el modelo híbrido, 235. — *Observaciones*, 236. — *El modelo*, 236. — 8-3. Modelo híbrido de un transistor, 237. — 8-4. Los parámetros, 239. — *El parámetro  $h_{fe}$* , 239. — *El parámetro  $h_{oe}$* , 240. — *Variaciones de los parámetros híbridos*, 240. — 8-5. Fórmulas de conversión para los parámetros de las tres configuraciones del transistor, 241. — 8-6. Análisis de un circuito amplificador a transistores empleando los parámetros  $h$ , 243. — *Ganancia de corriente, o amplificación de corriente*,  $A_i$ , 244. — *Impedancia de entrada  $Z_i$* , 244. — *Ganancia de tensión, o amplificación de tensión*,  $A_v$ , 245. — *Amplificación de tensión  $A_{vs}$* , 245. — *Amplificación de corriente  $A_{is}$* , teniendo en cuenta la resistencia de la fuente  $R_s$ , 246. — *Admitancia de salida*, 246. — *Resumen*, 247. — 8-7. Teoremas y corolarios de Thévenin y de Norton, 248. — *Corolarios*, 249. — 8-8. El seguidor de emisor, 250. — 8-9. Comparación de las configuraciones del amplificador a transistores, 251. — *Configuración en emisor común (EC)*, 251. — *Configuración en base común (BC)*, 252. — *Configuración en colector común (CC)*, 253. — *Resumen*, 253. — 8-10. Análisis lineal de un circuito a transistores, 253. — 8-11. Teorema de Miller y su dual, 254. — *Dual del teorema de Miller*, 256. — 8-12. Amplificador a transistores en cascada, 257. — *Elección de la configuración de los transistores en cascada*, 261. — 8-13. Modelo híbrido simplificado en emisor común, 262. — *Ganancia de corriente*, 262. — *Impedancia de entrada*, 263. — *Ganancia de tensión*, 263. — *Impedancia de salida*, 264. — 8-14. Cálculos simplificados para la configuración en colector común, 264. — *Ganancia de corriente*, 264. — *Resistencia de entrada*, 265. — *Ganancia de tensión*, 265. — *Impedancia de salida*, 265. — 8-15. El amplificador en emisor común con una resistencia de emisor, 268. — *La solución aproximada*, 268. — *Transistor visto desde la base y el emisor*, 269. — *Validez de las aproximaciones*, 270. — *La solución exacta*, 271. — *Efecto de una resistencia en el circuito de colector de un seguidor de emisor*, 272. — 8-16. Circuitos a transistores con alta resistencia de entrada, 273. — *El problema de la polarización*, 275. — *Circuito Darlington modificado*, 277. — Referencias, 278. — Temas de repaso, 279.

## 9. Polarización y estabilización térmica del transistor . . . . . 281

9-1. El punto de funcionamiento, 281. — *Acoplamiento capacitivo*, 282. —

*Rectas de carga estática y dinámica*, 282. — *Circuito de polarización fija*, 283. — 9-2. Estabilidad de la polarización, 284. — *Inestabilidad térmica*, 285. — 9-3. Autopolarización, o polarización por emisor, 286. — *Análisis del circuito de autopolarización*, 286. — 9-4. Estabilización frente a las variaciones de  $I_{CO}$ ,  $V_{BE}$ ,  $Y_{\beta}$ , 289. — *Característica de transferencia*, 289. — *Factor de estabilización S*, 290. — *Factor de estabilidad S'*, 291. — *Factor de estabilidad S''*, 292. — 9-5. Consideraciones generales sobre la estabilidad de la corriente del colector, 294. — *Consideraciones prácticas*, 296. — 9-6. Compensación de la polarización, 299. — *Compensación de  $V_{BE}$  por diodo*, 299. — *Compensación de  $I_{CO}$  por diodo*, 299. — 9-7. Técnicas de polarización de circuitos integrados lineales, 300. — 9-8. Compensación mediante termistor y sensistor, 302. — 9-9. Disipación térmica, 303. — *Resistencia térmica*, 303. — *Consideraciones sobre el punto de funcionamiento*, 304. — *Condición de estabilidad térmica*, 305. — 9-10. Estabilidad térmica, 305. — Referencias, 308. — Temas de repaso, 308.

## 10. Transistores de efecto de campo . . . . . 311

10-1. Transistores de unión de efecto campo, 312. — *Fuente*, 312. — *Drenaje*, 312. — *Puerta*, 312. — *Canal*, 313. — *Funcionamiento del FET*, 313. — *Características estáticas de los FET*, 313. — *Estructura práctica del FET*, 315. — 10-2. Tensión de contracción, 315. — 10-3. Características tensión-corriente de un JFET, 316. — *La resistencia en funcionamiento  $r_{d,ON}$* , 317. — *Región de contracción*, 317. — *Región antes de la contracción hasta saturación*, 318. — *Características de transferencia*, 318. — *Corte*, 319. — 10-4. Modelo FET de pequeña señal, 319. — *Transconductancia  $g_m$  y resistencia de drenaje  $r_d$* , 319. — *Dependencia con la temperatura*, 321. — *Modelo del FET*, 321. — 10-5. FET de metal-óxido-semiconductor, 323. — *MOSFET de acumulación*, 323. — *Tensión de umbral*, 324. — *Condicionamientos de la fuente de alimentación*, 325. — *Implantación de iones*, 325. — *MOSFET de depleción*, 326. — *Comparación de los FET de canal n con los de canal p*, 327. — *Protección de las puertas en los MOSFET*, 327. — *Símbolos del circuito*, 328. — *Modelo del circuito MOSFET para pequeña señal*, 328. — 10-6. Circuitos MOSFET digitales, 328. — *Inversor*, 329. — *Puerta NAND*, 330. — *Puerta NOR*, 331. — *MOS complementarios (CMOS)*, 332. — 10-7. Amplificadores de baja frecuencia con fuente común y con drenaje común, 333. — *Amplificador en fuente común con una resistencia de fuente sin desacoplar*, 334. — *Amplificador en drenaje común con una resistencia de drenaje*, 334. — 10-8. Polarización del FET, 335. — *Autopolarización de fuente*, 336. — *Polarización frente a la variabilidad de los elementos*, 337. — *Polarización de un MOSFET de acumulación*, 339. — 10-9. El FET como resistencia variable con la tensión (VVR), 340. — *Aplicaciones de la VVR*, 341. — 10-10. Amplificador en fuente común para altas frecuencias, 341. — *Ganancia de tensión*, 341. — *Admitancia de entrada*, 343. — *Capacidad de entrada (Efecto Miller)*, 343. — *Admitancia de salida*, 345. — 10-11. Amplificador en drenaje común para altas frecuencias, 345. — *Ganancia de tensión*, 345. — *Admitancia de entrada*, 346. — *Admitancia de salida*, 346. — Referencias, 346. — Temas de repaso, 347.

## 11. El transistor a altas frecuencias . . . . . 349

11-1. Modelo híbrido PI ( $\pi$ ) de transistor en emisor común, 349. — *Los componentes del circuito*, 350. — *Valores de los parámetros híbridos  $\pi$* , 350. — 11-2. Conductancias del modelo híbrido  $\pi$ , 350. — *Transconductancia del transistor  $g_m$* , 351. — *Conductancia de entrada  $g_{b,e}$* , 352. — *Conductancia de realimentación  $g_{b,c}$* , 353. — *Resistencia de dispersión de base  $r_{bb}$* , 353. — *Conductancia de salida  $g_{c,e}$* , 353. — *Resumen*, 354. — 11-3. Capacidades del modelo híbrido  $\pi$ , 354. — *Capacidad de difusión*, 355. — 11-4. Validez del modelo híbrido  $\pi$ , 356. — 11-5. Variación de los parámetros híbridos  $\pi$ , 357. — 11-6. Ganancia de corriente en corto circuito en emisor común, 357. — *Parámetro  $f_T$* , 359. — *Medición de  $f_T$* , 360. — 11-7. Ganancia de corriente con carga resistiva, 361. — 11-8. Respuesta de un amplificador a transistores en emisor común de una sola etapa, 362. — *Función de transferencia*, 363. — *Análisis aproximado*, 364. — *Impedancia de entrada de Miller*, 366. — 11-9. Producto de la anchura de banda por la ganancia, 367. — *Resumen*, 368. — 11-10. Seguidor de emisor a alta frecuencia, 369. — *Solución con un solo polo*, 370. — *Admitancia de entrada*, 371. — *Referencias*, 372. — *Temas de repaso*, 372.

## 12. Amplificadores multietapas . . . . . 373

12-1. Clasificación de los amplificadores, 373. — *Clases A, B, AB, C*, 374. — *Aplicaciones de los amplificadores*, 374. — 12-2. Distorsión en los amplificadores, 374. — *Distorsión no lineal*, 374. — *Distorsión de frecuencia*, 375. — 12-3. Respuesta en frecuencia de un amplificador, 375. — *Consideraciones sobre la fidelidad*, 375. — *Respuesta a baja frecuencia*, 376. — *Respuesta a alta frecuencia*, 377. — *Ancho de banda*, 378. — 12-4. Curvas de Bode, 378. — *Función de transferencia de un solo polo*, 379. — *Función de transferencia de un solo cero*, 380. — *Función de transferencia de dos polos*, 381. — *Polo dominante*, 383. — 12-5. Respuesta de un amplificador a un escalón, 383. — *Tiempo de subida*, 384. — *Pendiente*, 384. — *Prueba con onda cuadrada*, 386. — 12-6. Paso de banda de etapas en cascada, 387. — *Etapas con interacción*, 388. — *Respuesta a un escalón*, 389. — 12-7. Amplificador acoplado en RC, 389. — 12-8. Respuesta a baja frecuencia de una etapa acoplada en RC, 390. — 12-9. Efectos de un condensador de paso en emisor sobre la respuesta en baja frecuencia, 392. — *Respuesta a una onda cuadrada*, 395. — *Consideraciones prácticas*, 395. — *Respuesta debida a los condensadores de emisor y de acoplamiento*, 395. — 12-10. Respuesta a alta frecuencia de dos etapas en cascada a transistores en emisor común, 396. — *Polo dominante*, 398. — *Análisis simplificado de dos etapas en cascada*, 398. — 12-11. Amplificador multietapa en cascada en emisor común para altas frecuencias, 399. — *Análisis aproximado*, 401. — 12-12. Ruido, 402. — *Ruido térmico o de Johnson*, 402. — *Efecto Shot o Schottky*, 403. — *Figura o factor de ruido*, 403. — *Medición del factor de ruido*, 404. — *Ruido de un transistor*, 405. — *Ruido de los FET*, 406. — *Referencias*, 406. — *Temas de repaso*, 407.

### 13. Amplificadores realimentados . . . . . 409

13-1. Clasificación de los amplificadores, 409. — *Amplificador de tensión*, 409. — *Amplificador de corriente*, 410. — *Amplificador de transconductancia*, 410. — *Amplificador de transresistencia*, 411. — 13-2. Concepto de realimentación, 411. — *Fuente de señal*, 412. — *Red de realimentación*, 412. — *Circuito de muestreo*, 412. — *Red comparadora o mezcladora*, 413. — *Relación de transferencia, o ganancia*, 413. — *Ventajas de la realimentación negativa*, 413. — 13-3. Ganancia de transferencia con realimentación, 414. — *Ganancia del lazo*, 416. — *Suposiciones fundamentales*, 416. — 13-4. Características generales de los amplificadores con realimentación negativa, 417. — *Estabilidad de la amplificación de transferencia*, 417. — *Distorsión de frecuencia*, 418. — *Distorsión no lineal*, 419. — *Reducción del ruido*, 419. — 13-5. Resistencia de entrada, 420. — *Realimentación de tensión en serie*, 420. — *Realimentación de corriente en serie*, 421. — *Realimentación de corriente en paralelo*, 422. — *Realimentación de tensión en paralelo*, 423. — 13-6. Resistencia de salida, 423. — *Realimentación de tensión en serie*, 424. — *Realimentación de tensión en paralelo*, 424. — *Realimentación de corriente en paralelo*, 425. — *Realimentación de corriente en serie*, 425. — 13-7. Método de análisis de un amplificador realimentado, 426. — 13-8. Realimentación de tensión en serie, 427. — *El FET seguidor de fuente*, 427. — *El seguidor de emisor*, 429. — 13-9. Par con realimentación de tensión en serie, 431. — *Par con realimentación del segundo colector al primer emisor*, 431. — 13-10. Realimentación de corriente en serie, 433. — *La configuración con un transistor*, 433. — *Etapa de FET en fuente común con una resistencia de fuente R*, 437. — 13-11. Realimentación de corriente en paralelo, 439. — *El amplificador sin realimentación*, 440. — 13-12. Realimentación de tensión en paralelo, 443. — *El amplificador sin realimentación*, 444. — Referencias, 447. — Temas de repaso, 447.

### 14. Estabilidad y osciladores . . . . . 449

14-1. Efecto de la realimentación en el ancho de banda de los amplificadores, 449. — *Función de transferencia de un solo polo*, 450. — *Mejora del ancho de banda*, 452. — *Respuesta a un escalón*, 453. — 14-2. Función de transferencia de doble polo con realimentación, 453. — *Lugar de las raíces*, 454. — *Modelo de circuito*, 455. — *Respuesta en frecuencia*, 456. — *Respuesta a un escalón*, 457. — 14-3. Función de transferencia de tres polos con realimentación, 459. — 14-4. Análisis aproximado de un amplificador realimentado multipolo, 461. — *Polo dominante*, 461. — 14-5. Respuesta en frecuencia de un amplificador con realimentación de tensión en paralelo, 462. — *Polo dominante*, 464. — 14-6. Respuesta en frecuencia de un amplificador con realimentación de corriente en serie, 466. — *Polo dominante*, 467. — 14-7. Respuesta en frecuencia de un par con realimentación de corriente en paralelo, 469. — 14-8. Respuesta en frecuencia del par con realimentación de tensión en serie, 472. — *Solución aproximada*, 473. — *Solución exacta*, 473. — 14-9. Estabilidad, 474. — *Condición para la estabilidad*, 475. — *Criterio de Nyquist*, 475. — 14-10. Márgenes de ganancia y fase, 477. — *Margen de ganancia*, 477. —

*Margen de la fase*, 478. — 14-11. Compensación, 478. — *Amplificador de tres polos*, 478. — *Métodos generales de compensación*, 480. — 14-12. Compensación de polo dominante, 480. — 14-13. Compensación polo-cero (retraso-avance), 481. — 14-14. Compensación por modificación de la red  $\beta$ , 483. — 14-15. Osciladores senoidales, 486. — *Criterio de Barkhausen*, 487. — *Consideraciones prácticas*, 487. — 14-16. El oscilador de cambio de fase, 488. — *Oscilador de cambio de fase a transistores*, 489. — *Funcionamiento con frecuencia variable*, 491. — 14-17. Osciladores con circuito resonante, 491. — *Autopolarización y estabilización de la amplitud*, 492. — *Oscilador a transistores sintonizado en el colector*, 493. — 14-18. Forma general de un circuito oscilador, 493. — *Ganancia del lazo*, 493. — *Elementos reactivos*  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_3$ , 494. — 14-19. Oscilador de puente de Wien, 495. — *Estabilización de la amplitud*, 497. — 14-20. Oscilador a cristal, 497. — 14-21. Estabilidad de la frecuencia, 499. — *Criterio de estabilidad*, 499. — Referencias, 500. — Temas de repaso, 501.

## 15. Amplificadores operacionales . . . . . 503

15-1. El amplificador operacional básico, 503. — *Amplificador operacional ideal*, 503. — *Amplificador operacional inversor práctico*, 505. — *Amplificador operacional no inversor*, 506. — 15-2. El amplificador diferencial, 507. — *Relación de rechazo del modo común*, 507. — 15-3. El amplificador diferencial acoplado por emisor, 509. — *Amplificador diferencial alimentado con corriente constante*, 510. — *Consideraciones prácticas*, 512. — 15-4. Características de transferencia de un amplificador diferencial, 512. — 15-5. Ejemplo de un amplificador operacional integrado, 514. — *Resistencia de entrada*, 514. — *Ganancia de tensión en cadena abierta*, 516. — *Análisis en corriente continua*, 516. — *Etapa de salida*, 518. — *Oscilación de la tensión de modo común*, 519. — 15-6. Errores offset de tensiones y corrientes, 520. — *Corriente de polarización de entrada*, 520. — *Corriente offset de entrada*, 520. — *Variación de la corriente offset de entrada*, 520. — *Tensión offset de entrada*, 520. — *Variación de la tensión offset de entrada*, 520. — *Tensión offset de salida*, 520. — *Relación de rechazo de la alimentación*, 521. — *Relación de variación*, 521. — *Técnicas universales de equilibrado*, 521. — 15-7. Variación con la temperatura de las tensiones y corrientes offset de entrada, 522. — 15-8. Medición de los parámetros de un amplificador operacional, 524. — *Ganancia de tensión diferencial en cadena abierta*  $A_v = A_d$ , 524. — *Resistencia de salida*  $R_o$ , 524. — *Resistencia de entrada diferencial*  $R_i$ , 525. — *Tensión offset de entrada*, 525. — *Corriente de polarización de entrada*, 526. — *Relación de rechazo del modo común*, 526. — *Relación de variación*, 527. — 15-9. Respuesta en frecuencia de los amplificadores operacionales, 527. — *Estabilidad de un amplificador operacional*, 528. — 15-10. Compensación por polo dominante, 530. — 15-11. Compensación por polo-cero, 532. — *Modificación de la impedancia de entrada en cadena abierta*, 532. — *Compensación por efecto Miller*, 533. — 15-12. Compensación por avance, 535. — 15-13. Respuesta de los amplificadores operacionales a un escalón, 537. — *Respuesta a una gran señal escalón*, 537. — Referencias, 538. — Temas de repaso, 538.

## 16. Los circuitos integrados como bloques de construcción de sistemas analógicos 541

I. Sistemas analógicos lineales, 541. — 16-1. Aplicaciones del amplificador operacional básico, 541. — *Cambiador de signo o inversor*, 542. — *Cambiador de escala*, 542. — *Cambiador de fase*, 542. — *Sumador*, 542. — *Convertidor de tensión a corriente*, 543. — *Convertidor de corriente a tensión*, 544. — *Seguidor de tensión continua*, 544. — 16-2. Amplificador diferencial de corriente continua, 544. — *Puente amplificador*, 545. — 16-3. Amplificador estable acoplado en alterna, 546. — *Seguidor de tensión alterna*, 546. — 16-4. Diferenciación e integración antológica, 547. — *Corriente de polarización y offset en continua*, 548. — *Ganancia finita y ancho de banda*, 548. — *Circuito práctico*, 549. — *Diferenciador*, 550. — *Caso general*, 550. — 16-5. Cálculo analógico electrónico, 550. — 16-6. Filtros activos, 552. — *Filtro Butterworth*, 553. — *Realización práctica*, 555. — *Filtro de paso de banda*, 558. — *Filtro de rechazo de banda*, 558. — 16-7. Filtros pasabanda resonantes activos, 558. — *Simetría geométrica*, 559. — *Ancho de banda*, 560. — *Filtro pasabanda activo RC*, 560. — 16-8. Compensador de fase, 562. — 16-9. Amplificador sintonizado en circuito integrado, 563. — *Funcionamiento de un amplificador sintonizado*, 563. — *Parámetros y*, 565. — *Amplificador sintonizado práctico*, 567. — *Modulador de amplitud*, 568. — 16-10. Amplificador de video cascodo, 570. — II. Sistemas analógicos no lineales, 572. — 16-11. Comparadores, 572. — *Detector del cruce por cero*, 573. — *Ondas cuadradas a partir de ondas senoidales*, 573. — *Generador de señales de tiempo a partir de una onda senoidal*, 573. — *Fasómetro*, 573. — *Analizador de la distribución de amplitud*, 574. — *Modulación de impulsos de tiempo*, 574. — 16-12. Circuitos de retención de información, 574. — 16-13. Convertidores de precisión alterna/continua, 576. — *Acoplamiento de precisión*, 576. — *Rectificador rápido de media onda*, 576. — *Detector de media activo*, 577. — *Detector de picos activo*, 577. — 16-14. Amplificadores logarítmicos, 578. — *Amplificador logarítmico empleando transistores aparejados*, 579. — *Amplificador antilogaritmo*, 580. — *Multiplicador logarítmico*, 581. — *Amplificador multiplicador diferencial*, 582. — 16-15. Generadores de forma de onda, 583. — *Generador de onda cuadrada*, 583. — *Generador de impulsos*, 584. — *Generador de onda triangular*, 585. — 16-16. Comparador regenerativo (disparador de Schmitt), 587. — 16-17. Lógica del emisor acoplado, 590. — Referencias, 594. — Temas de repaso, 595.

## 17. Circuitos integrados como bloques constructivos de sistemas digitales . . . 597

I. Combinación de sistemas digitales, 598. — 17-1. Montajes de puertas normalizadas, 598. — 17-2. Sumadores binarios, 600. — *Semisumador*, 600. — *Funcionamiento en paralelo*, 601. — *Sumador completo*, 601. — *Sumadores MSI*, 603. — *Funcionamiento en serie*, 605. — 17-3. Funciones aritméticas, 606. — *Elemento real/complemento*, *Cero/Uno*, 607. — *Resta binaria*, 607. — *Comparador digital*, 609. — *Comprobador de paridad/generador*, 611. — 17-4. Decodificador/Demultiplex, 613. — *Sistema de codificación binario decimal (BCD)*, 613. — *Decodificador de BCD a decimal*, 613. — *Demultiplex*,

615. — *Decodificador/Demultiplex de 4 a 16 líneas*, 615. — *Excitadores decodificador/lámpara*, 615. — 17-5. *Selector de datos/multiplex*, 615. — *Conversión paralelo a serie*, 616. — *Selección de datos secuenciales*, 617. — 17-6. *Codificador*, 617. — 17-7. *Memoria de solo lectura (ROM)*, 620. — *Convertidores de código*, 621. — *Programación de la ROM*, 622. — 17-8. *Aplicaciones de los ROM*, 624. — *Tablas de recurrencia*, 624. — *Generadores de secuencia*, 624. — *Imagen visible con siete segmentos*, 624. — *Lógica combinatoria*, 626. — *Generador de caracteres*, 626. — II. *Sistemas digitales secuenciales*, 626. — 17-9. *Una memoria de 1 bit*, 626. — *Sistema secuencial*, 627. — *Célula de almacenamiento de 1 bit*, 627. — 17-10. *FLIP-FLOP*, 629. — *Puesta a 1 y a 0 (Preset and Clear)*, 630. — *Condición de auto-oscilación*, 631. — *FLIP-FLOP J-K ordenador seguidor*, 632. — *FLIP-FLOP tipo D*, 632. — *FLIP-FLOP tipo T*, 633. — *Resumen*, 633. — 17-11. *Registadores de desplazamiento*, 634. — *Convertidor de serie a paralelo*, 635. — *Registadores de entrada en serie y salida en serie*, 636. — *Convertidor de paralelo a serie*, 636. — *Entrada en paralelo, salida en paralelo*, 636. — *Registadores de desplazamiento a izquierda y derecha*, 636. — *Línea de retardo digital*, 637. — *Generador de secuencias*, 637. — *Contador en anillo con registrador de desplazamiento*, 637. — *Contador de anillo de Johnson*, 638. — 17-12. *Contadores asíncronos*, 638. — *Contador asíncrono*, 638. — *Contador reversible*, 640. — *Contador divisor por N*, 641. — 17-13. *Contadores síncronos*, 642. — *Transporte en serie*, 643. — *Transporte en paralelo*, 644. — *Contador síncrono reversible con transporte en paralelo*, 644. — *Contador síncrono de décadas*, 644. — 17-14. *Aplicaciones de los contadores*, 647. — *Contador directo*, 647. — *Divisor por N*, 647. — *Medición de frecuencia*, 647. — *Medición de tiempo*, 648. — *Medición de distancia*, 648. — *Medición de velocidad*, 648. — *Ordenador digital*, 648. — *Generador de ondas*, 649. — *Conversión entre informaciones analógicas y digitales*, 649. — III. *Sistemas digitales MOS/LSI*, 649. — 17-15. *Circuitos MOS dinámicos*, 649. — *Inversor MOS dinámico*, 649. — *MOS de dos fases*, 650. — 17-16. *Registadores de desplazamiento MOS*, 651. — *Registadores de desplazamiento MOS dinámicos*, 651. — *Registadores de desplazamiento MOS estáticos*, 652. — *Registrador de desplazamiento de cuatro fases*, 653. — 17-17. *Memoria MOS de solo lectura*, 655. — 17-18. *Memoria de acceso aleatorio (RAM)*, 657. — *Selección lineal*, 657. — *Selección coincidente*, 658. — *Elementos RAM básicos*, 659. — *RAM bipolar*, 660. — *RAM MOS estático*, 661. — *RAM MOS dinámico*, 662. — IV. *Sistemas D/A y A/D*, 663. — 17-19. *Convertidores digitales a analógicos*, 663. — *Convertidor D/A tipo escalera*, 664. — *Convertidor D/A multiplicador*, 666. — 17-20. *Convertidor analógico a digital*, 666. — *Convertidor A/D por aproximaciones sucesivas*, 668. — 17-21. *Generador de caracteres*, 668. — *Matriz de puntos de un carácter*, 668. — *Impresión de caracteres*, 670. — *Forma de onda para un solo carácter en un tubo de rayos catódicos*, 670. — *Representación de un carácter*, 671. — *Representación de una línea de caracteres*, 672. — *Referencias*, 672. — *Temas de repaso*, 673.

## 18. Sistemas y circuitos de potencia . . . . . 677

18-1. *Amplificadores clase A para grandes señales*, 678. — 18-2. *Distorsión*

del segundo armónico, 679. — 18-3. Generación de armónicos de orden superior, 681. — *Cálculo de las componentes de Fourier*, 682. — *Potencia de salida*, 684. — 18-4. Amplificador de potencia de audio con acoplamiento por transformador, 684. — *Adaptación de impedancia*, 685. — *Potencia de salida máxima*, 686. — 18-5. Rendimiento, 688. — *Rendimiento de la conversión*, 688. — *Valor máximo del rendimiento*, 689. — 18-6. Amplificadores en contrafase (push-pull), 690. — 18-7. Amplificadores clase B, 692. — *Consideraciones sobre la potencia*, 692. — *Distorsión*, 695. — *Circuitos especiales*, 695. — 18-8. Funcionamiento en clase AB, 696. — *Amplificadores de potencia integrados*, 697. — 18-9. Fuentes de alimentación reguladas, 699. — *Estabilización*, 700. — 18-10. Regulador de tensión serie, 701. — *Análisis simplificado*, 702. — *Consideraciones prácticas*, 705. — 18-11. Reguladores monolíticos, 707. — 18-12. El diodo de cuatro capas, 708. — 18-13. Características del *p-n-p-n*, 711. — *Efecto de la velocidad*, 712. — *Conmutador bidireccional a diodos*, 713. — 18-14. Rectificador gobernado de silicio, 713. — *Tiempos de conducción y de corte de la puerta*, 715. — *Características*, 715. — *El triac, o interruptor triodo de doble sentido*, 715. — 18-15. Regulación de potencia, 716. — *Regulación con SCR*, 716. — *Funcionamiento con onda completa rectificadas*, 720. — *Circuito de control*, 720. — *Gobierno de corriente alterna*, 722. — Referencias, 724. — Temas de repaso, 725.

## 19. Física de los sistemas semiconductores . . . . . 727

19-1. Distribución de la energía de los electrones en un metal, 727. — *Imagen simplificada de la energía potencial de un metal*, 727. — *Densidad en edad*, 728. — *Densidad de energía*, 729. — 19-2. Función de Fermi-Dirac, 729. — *Nivel de Fermi*, 731. — 19-3. Densidad de estados, 731. — *Estados cuánticos en un metal*, 732. — 19-4. Emisión electrónica de un metal, 734. — *Función trabajo*, 734. — *Emisión termoiónica*, 735. — *Energía de los electrones emitidos*, 735. — 19-5. Concentración de portadores en un semiconductor intrínseco, 736. — *Número de huecos en la banda de valencia*, 738. — *Nivel de Fermi en un semiconductor intrínseco*, 738. — *Concentración intrínseca*, 739. — 19-6. Nivel de Fermi en los semiconductores con impurezas, 740. — 19-7. Estructura de las bandas de una unión *p-n* en circuito abierto, 741. — *Diferencia de potencial del contacto*, 742. — *Relación de Einstein*, 743. — 19-8. Diodo túnel, 744. — *Estructura de las bandas de energía de un diodo p-n altamente dopado*, 744. — *Características tensión-corriente*, 745. — 19-9. Ecuaciones básicas de los semiconductores, 747. — *Concentración independiente de x con campo eléctrico nulo*, 749. — *Concentración independiente de t con campo eléctrico nulo*, 749. — *Concentración variable senoidalmente con t y campo eléctrico nulo*, 750. — 19-10. Ecuación tensión-corriente del diodo *p-n*, 751. — *Ley de la unión*, 751. — *Componentes de la corriente*, 752. — *Corriente inversa de saturación*, 753. — 19-11. Características *p-n* en función de la temperatura, 753. — 19-12. Capacidad dinámica de difusión, 755. — 19-13. Corrientes en un transistor, 757. — *Corriente de huecos en la región de base tipo n*, 757. — *Ecuaciones de Ebers-Moll*, 758. — 19-14. Alfa del transistor, 759. — 19-15. Análisis de un transistor al corte y en la región

de saturación, 760. — *Región de corte*, 760. — *Base corto circuitada*, 761. — *La base en circuito abierto*, 761. — *Tensión umbral*, 762. — *Región de saturación*, 762. — *Referencias*, 763. — *Temas de repaso*, 763.

Apéndice A. — Valores probables de las constantes físicas generales . . . . .	765
Apéndice B. — Factores de conversión y prefijos . . . . .	767
Apéndice C. — Problemas . . . . .	769