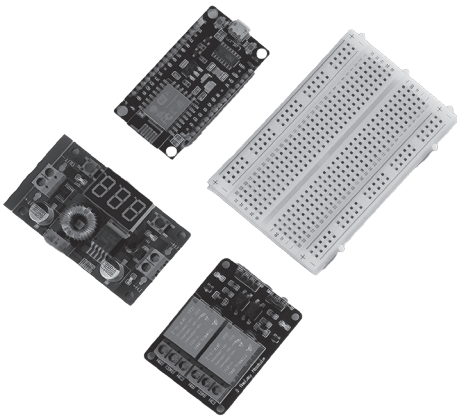


▪ Carlos Omar Ramos Linares ▪

Electrónica práctica para telecomunicaciones




Editorial
Neogranadina

Ramos Linares, Carlos Omar

Electrónica práctica para telecomunicaciones / Carlos Omar Ramos Linares. -- 1a. ed. -- Bogotá : Universidad Militar Nueva Granada : Editorial Neogranadina, 2020.

459 páginas (Colección docencia)

Incluye índice analítico.

ISBN 9789585103214

1. Electrónica 2. Telecomunicaciones 3. Sistemas de telecomunicación I. Título
II. Serie

621.381 SCDD21

Catalogación en la fuente. Biblioteca Universidad Militar Nueva Granada. Mayo de 2021



Electrónica práctica para telecomunicaciones
© Carlos Omar Ramos Linares

ISBN: 978-958-5103-21-4

© Universidad Militar Nueva Granada
Colección Docencia

© Vicerrectoría de Investigaciones
© Editorial Neogranadina

Bogotá, Colombia
editorial.neogranadina@unimilitar.edu.co

▪ Carlos Omar Ramos Linares ▪

ELECTRÓNICA PRÁCTICA PARA TELECOMUNICACIONES

Cómo citar:

APA:

Ramos Linares, C. (2020). *Electrónica práctica para telecomunicaciones*. Bogotá: Editorial Neogranadina.

MLA:

Ramos Linares, Carlos Omar. *Electrónica práctica para telecomunicaciones*. Bogotá: Editorial Neogranadina, 2020.

Chicago:

Ramos Linares, Carlos Omar. *Electrónica práctica para telecomunicaciones*. Colección Docencia. Bogotá: Editorial, Neogranadina, 2020.



Electrónica práctica para telecomunicaciones

Carlos Omar Ramos Linares*

RESUMEN

Este libro es el resultado de la experiencia académica adquirida en las clases de electrónica en más de 20 años. Se basa en los siguientes aspectos pedagógicos: teoría y conceptualización, cálculos y diseño de circuitos electrónicos, programas electrónicos de simulación o de matemáticas que generan confianza al lector o estudiante en su aprendizaje para corroborar resultados esperados en los límites de tolerancia y sugerencia de prácticas que llevan a montajes de laboratorio para desarrollo de habilidades o competencias en cada uno de los temas tratados. Los temas que se incluyen son diodos, transistores, amplificadores operaciones, filtros activos, osciladores, electrónica industrial y aplicaciones en telecomunicaciones. Está dirigido a estudiantes de ingenierías que contengan electrónica como asignatura como apoyo a las diversas temáticas de electrónica y sus aplicaciones. Aunque se dedica un capítulo a aplicaciones de telecomunicaciones, este texto realiza un enfoque general de aplicabilidad de la electrónica en múltiples aspectos. Los conceptos particulares de los dispositivos estudiados se basan en aquellos comerciales de amplio uso para que las prácticas propuestas estén acordes a la realidad con un enfoque al desarrollo de habilidades y competencias del diseño, análisis, simulación y montaje.

PALABRAS CLAVE

Semiconductores, diodo, transistor, amplificadores, tiristores.

DOI: <https://doi.org/10.18359/9789585103214>

*Magíster en Teleinformática – Universidad Distrital,
Ingeniero electrónico – Universidad Antonio Nariño.

Contacto: carlos.ramos@unimilitar.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7974-8078>



Practical Electronics for Telecommunications

Carlos Omar Ramos Linares*

ABSTRACT This book derives from the academic experience gained in electronics classes over 20 years. It is aimed at students of engineering programs that contain electronics as a subject to understand various electronics concepts and applications. It intends to bolster the reader's or student's confidence in their learning, corroborate expected results within the limits of tolerance, suggest practices that result in laboratory assemblies, and enhance skills or abilities in each topic covered. The topics included are diodes, transistors, operational amplifiers, active filters, oscillators, industrial electronics, and telecommunications applications. It also builds on the following pedagogical aspects: theory and conceptualization, calculations and design of electronic circuits, and electronic simulation or mathematics programs. Although a chapter is dedicated to telecommunications applications, the book generally approaches electronics applicability to multiple scenarios. The particular devices studied are based on those widely marketed so that the proposed practices resemble reality, focusing on developing design, analysis, simulation, and assembly skills and abilities.

KEYWORDS

Semiconductors, diode, transistor, amplifiers, thyristors.

DOI: <https://doi.org/10.18359/9789585103214>

* E-mail: carlos.ramos@unimilitar.edu.co

Contenido

Primera parte. Fundamentos	41
Capítulo 1. Conceptos básicos para electrónica	43
1.1 Definiciones	45
1.1.1 Voltaje	45
1.1.2 Corriente	46
1.1.3 Concepto de señal eléctrica	47
1.1.4 Resistencia	50
1.1.5 Ley de <i>Ohm</i>	53
1.1.6 Potencia eléctrica	53
1.1.7 Reactancia	54
1.1.8 Impedancia	56
1.1.9 Conductancia	59
1.1.10 Susceptancia	59
1.1.11 Admitancia	59
1.1.12 Leyes de Kirschhoff	59
1.2. Concepto de átomo	63
1.2.1 Comportamiento electrónico en los átomos de los semiconductores	64
1.2.2 Principios de conducción y no conducción	66
1.2.3 Iones	66
Capítulo 2. El diodo	71
2.1 Principios de funcionamiento	73
2.2 Especificaciones del diodo	77
2.2.1 Verificación del diodo con un multímetro digital	77
2.2.2 Presentaciones comerciales	79

2.3 Polarización del diodo	79
2.3.1 Polarización directa	79
2.3.2 Polarización inversa	81
2.4 Curvas del diodo y clases de diodos	81
2.4.1 Curva general para diodos	83
2.4.2 Zona de polarización directa, región lineal	87
2.4.3 Resistencia dinámica del diodo	90
2.4.4 Zona de polarización directa, región no lineal	92
2.4.5 Zona de polarización inversa, no conducción	94
2.4.6 Zona de polarización inversa, región Zener	97
2.5 Aplicaciones con diodos	100
2.5.1 Idealización del diodo	100
2.5.2 Rectificador de media onda	103
2.5.3 Rectificador de onda completa a dos diodos	105
2.5.4 Rectificador de onda completa con puente de diodos	107
2.5.5 Fuente rectificadora de onda completa	111
2.5.6 Aplicaciones con diodo Zener	115
2.5.7 Diodos emisores de luz (LED)	117
Capítulo 3. El transistor de unión bipolar (BJT)	125
3.1 Principio de funcionamiento	127
3.1.1 Empaques del transistor	129
3.1.2 Identificación de terminales	129
3.1.3 Características del transistor para polarización	132
3.1.4 Zonas de polarización	134
3.2 Polarización del transistor BJT	136
3.2.1 Polarización con dos fuentes	137
3.2.2 Polarización con retroalimentación de voltaje	140
3.2.3 Polarización por divisor de voltaje	142
3.3 Recta de carga del transistor	152

3.3.1	Condiciones de diseño de polarización	156
3.3.2	Programación de cálculos DC en hoja de cálculo	160
Capítulo 4.	El transistor de efecto de campo (FET)	171
4.1	Principios de funcionamiento	173
4.1.1	Características del JFET	174
4.1.2	Comparativos con el BJT	176
4.2	Polarización del FET	177
4.2.1	Elaboración de la curva de transconductancia	180
4.2.2	Transconductancia del JFET y resistencia en conducción	183
4.3	El MOSFET	186
4.3.1	Polarización fija del JFET	189
4.3.3	Línea de autopolarización del FET	195
4.3.4	Polarización por divisor de tensión	197
4.4	Regla de diseño en polarización de los FET	208
Capítulo 5.	Amplificadores para pequeña señal	215
5.1	Señales en un amplificador a transistor	218
5.2	Amplificadores de pequeña señal con BJT	219
5.2.1	Modelado del transistor	220
5.2.2	Modelo híbrido	221
5.2.3	Modelo r_e	224
5.2.4	Configuración emisor común	225
5.2.5	Cálculos aproximados	229
5.2.6	Programación de cálculos AC en hoja de cálculo	237
5.2.7	Configuración base común	241
5.2.8	Configuración de colector común	244
5.2.9	Configuración Darlington	248
5.3	Amplificadores de pequeña señal con FET	250
5.4	Concepto del bloque amplificador	257

Capítulo 6. El amplificador operacional	263
6.1 Características y funcionamiento	265
6.2 Circuitos operacionales	267
6.2.1 Amplificador inversor	268
6.2.2 Amplificador no inversor	272
6.2.3 Amplificador sumador	275
6.2.4 Amplificador restador	278
6.2.5 Amplificador integrador	285
6.2.6 Amplificador derivador	288
6.2.7 Amplificador logarítmico	289
6.2.8 Amplificador exponencial	291
6.2.9 Casos combinados con amplificadores	292
6.3 Comparadores de voltaje	296
6.3.1 Comparador inversor	296
6.3.2 Comparador no inversor	297
6.3.3 Comparador de ventana	297
6.3.4 Otras aplicaciones de los comparadores	301
Segunda parte. Aplicaciones en telecomunicaciones	307
Capítulo 7. Filtros activos	309
7.1 Tipos de filtros activos	312
7.1.1 Características y orden de los filtros	316
7.1.2 Función de transferencia	317
7.2 Diseño de circuitos para filtros de primer orden	318
7.2.1 Filtro pasa bajo de primer orden	320
7.2.2 Consideración de frecuencia	323
7.2.3 Filtro pasa alto	327
7.3 Diseño de circuitos para filtros de orden superior	329
7.3.1 Filtros de orden superior	330

7.3.2 Características de filtros pasa banda	335
7.3.3 Filtro pasa banda con circuitos RC	341
7.4 Filtros activos de topología Sallen-Key de orden superior	343
7.4.1 Filtros de orden superior Butterworth	344
7.4.2 Filtros pasa banda con topología Sallen-Key	348
Capítulo 8. Osciladores	353
8.1 Osciladores sinusoidales	357
8.1.1 Oscilador puente de Wien	358
8.1.2 Oscilador de cambio de fase	362
8.1.3 Oscilador Hartley	366
8.1.4 Oscilador Colpitts	367
8.2 Osciladores de onda cuadrada	373
Capítulo 9. Elementos básicos de electrónica industrial	379
9.1 Tiristores	381
9.1.1 Rectificador controlado de silicio (SCR)	382
9.1.2 Características principales del tiristor	383
9.1.3 Tiristor de apagado y encendido por compuerta (GTO)	388
9.1.4 Diodo conmutador de corriente alterna (DIAC)	388
9.1.5 Triodo para corriente alterna (TRIAC)	389
9.1.6 TRIAC con engatillado interno (QUADRAC)	395
9.2 Fundamentos de dispositivos eléctricos	395
9.2.1 Relevos	395
9.2.2 Contactores	397
Capítulo 10. Moduladores y Transmisores	401
10.1 Fundamentos de modulación	404
10.2 Moduladores de amplitud modulada (AM)	406
10.2.1 Modulador am por diodo	406

10.2.2 Modulador AM por transistor	407
10.3 Demodulador de AM	408
10.3.1 Demodulador AM por detección de envolvente	408
10.3.2 Demodulador AM por detección coherente	409
10.4 Modulador de frecuencia modulada (FM)	411
10.4.1 Micrófono electret	412
10.4.2 Cálculo de una antena transmisora-receptora	413
10.5 Demodulador de FM	414
Referencias	417
Apéndice A	423
A.1 Transformadores	425
A.2 Configuración de los transformadores en Proteus	429
Apéndice B	431
B.1 Tabla AWG para alambres	433
Apéndice C	435
C.1 Justificación del voltaje de rizo	437
Índice analítico	441

Índice de tablas y figuras

Figuras

Figura 1.1. Símbolos para fuentes de voltaje. (a) Batería de corriente directa, (b) fuente de voltaje de corriente directa y (c) fuente de voltaje de corriente alterna.	46
Figura 1.2. Elementos y equipos que proporcionan voltaje: (a) baterías, (b) fuente dual de voltaje y (c) generador de señales.	46
Figura 1.3. Símbolos para fuentes de corriente: (a) fuente independiente y (b) fuente dependiente.	47
Figura 1.4. Denominación de una diferencia de potencial según la dirección de la corriente: (a) $V_{ab} = V_a - V_b$, (b) $V_{ba} = V_b - V_a$.	47
Figura 1.5. Gráfica que representa una señal periódica.	48
Figura 1.6. Señal para el ejemplo 1.1.	49
Figura 1.7. Símbolos usados para la resistencia.	50
Figura 1.8. Diferentes presentaciones de resistencias.	50
Figura 1.9. Presentación comercial de inductores: (a) sin núcleo, (b) con núcleo y (c) en paquete.	54
Figura 1.10. Presentaciones comerciales de algunos condensadores: (a) electrolítico, (b) cerámico y (c) de montaje superficial.	55
Figura 1.11. Plano cartesiano imaginario aplicado a un circuito RC.	57
Figura 1.12. Circuito RC: (a) circuito resistivo y capacitivo, (b) circuito de resistencia y reactancia y (c) circuito de impedancia.	57
Figura 1.13. Componentes de un lazo o malla Mx.	60
Figura 1.14. Corrientes en un nodo.	61
Figura 1.15. Circuito para ejemplo 1.7.	61
Figura 1.16. Circuito reducido del ejemplo 1.7.	62
Figura 1.17. (a) Distribución electrónica del silicio, (b) red de covalencia de un material de silicio.	64

Figura 2.1. Material de silicio dopado con átomos de antimonio.	74
Figura 2.2. Material de silicio dopado con átomos de boro.	74
Figura 2.3. Unión PN para formar un semiconductor.	75
Figura 2.4. Incremento de la región iónica debido a polarización inversa.	76
Figura 2.5. Reducción de la región iónica debido a una polarización directa.	76
Figura 2.6. (a) Correspondencia de la unión PN, (b) presentación comercial típica y (c) símbolo.	77
Figura 2.7. Prueba del diodo en posición correcta.	78
Figura 2.8. Prueba del diodo en inverso.	78
Figura 2.9. Varias presentaciones de diodos comerciales.	79
Figura 2.10. Circuito con diodo polarizado en directo.	80
Figura 2.11. Circuito para el ejemplo 2.1.	80
Figura 2.12. Circuito con diodo polarizado en inverso.	81
Figura 2.13. Curva típica de un diodo.	84
Figura 2.14. Circuito para obtener la curva del diodo.	85
Figura 2.15. Transformador típico comercial para voltajes bajos.	85
Figura 2.16. Gráfica ilustrativa del montaje para obtener la curva del diodo.	86
Figura 2.17. Montaje del circuito de curvas para diodos en protoboard.	87
Figura 2.18. Circuito para el ejemplo 2.3.	89
Figura 2.19. Circuito para el ejemplo 2.4.	90
Figura 2.20. Determinación de la resistencia dinámica del diodo.	91
Figura 2.21. Zona de polarización directa, región no lineal: (a) en los diodos normales, (b) en diodos especiales.	92
Figura 2.22. Diodos de resistencia negativa: (a) diodo túnel y su símbolo, (b) diodo Gunn y su símbolo.	93
Figura 2.23. Región de no conducción, tercera curva.	94
Figura 2.24. Estructura básica de un condensador.	94
Figura 2.25. Comportamiento del diodo según su polarización: (a) sin aplicar potencial, barrera iónica normal; (b) polarizado en directo, la barrera iónica se reduce o desaparece; (c) polarizado en inverso, la barrera iónica se incrementa.	95

Figura 2.26. Diodo varactor: (a) comportamiento de la barrera iónica, (b) símbolo y (c) variación capacitiva de acuerdo con el voltaje inverso V_R .	96
Figura 2.27. Curvas que muestran el comportamiento de dos diodos varactores comerciales, respecto del voltaje inverso aplicado.	97
Figura 2.28. (a) Curva de la región Zener, (b) presentación comercial de un diodo Zener, (c) símbolo de un diodo Zener.	97
Figura 2.29. El diodo y su circuito equivalente simplificado.	101
Figura 2.30. Curva ideal para los diodos.	101
Figura 2.31. Circuito para el ejemplo 2.6.	101
Figura 2.32. Circuito equivalente para el ejemplo 2.6.	102
Figura 2.33. Circuito para el ejemplo 2.7.	102
Figura 2.34. (a) Circuito equivalente del ejemplo 2.7, (b) circuito simplificado.	103
Figura 2.35. (a) Señal de entrada seno y su ecuación, (b) circuito rectificador de media onda, (c) señal de salida rectificada.	104
Figura 2.36. (a) Señal senoidal, (b) rectificador de onda completa con dos diodos.	105
Figura 2.37. (a) Análisis de la media onda negativa, (b) recorrido adecuado de la media onda, (c) señal de salida vista en R_L .	106
Figura 2.38. (a) Análisis de la media onda positiva, (b) recorrido adecuado de la media onda, (c) señal de salida vista en R_L junto a la primera media onda.	106
Figura 2.39. (a) Señal de entrada en V_2 , (b) circuito rectificador con puente de diodos.	107
Figura 2.40. (a) Análisis de la media onda negativa, (b) recorrido adecuado de la media onda, (c) señal de salida vista en R_L .	108
Figura 2.41. (a) Análisis de la media onda positiva, (b) recorrido adecuado de la media onda, (c) señal de salida vista en R_L junto a la primera media onda.	108
Figura 2.42. Circuito rectificador para el ejemplo 2.9.	109
Figura 2.43. (a) Comportamiento del circuito en el momento de la onda positiva de la señal de entrada, (b) circuito equivalente para análisis.	109

Figura 2.44. (a) Comportamiento del circuito en el momento de la onda negativa de la señal de entrada, (b) circuito equivalente para análisis.	110
Figura 2.45. Forma de onda resultante del ejemplo 2.9.	111
Figura 2.46. Fuente DC.	111
Figura 2.47. Voltaje de rizo provocado por la carga en el condensador y la resistencia R_L .	112
Figura 2.48. Fuente de voltaje DC para la Práctica 2.2.	113
Figura 2.49. Circuito sujetador.	114
Figura 2.50. (a) Comportamiento del circuito en pulso positivo, (b) comportamiento del circuito en pulso negativo, (c) señal resultante sobre la resistencia R.	115
Figura 2.51. Uso del diodo Zener como regulador de voltaje.	115
Figura 2.52. Diseño final para el regulador de 5,1 V.	116
Figura 2.53. Circuito limitador de voltaje.	117
Figura 2.54. (a) Componentes de un LED y (b) símbolo.	118
Figura 2.55. Diversas presentaciones y bloques de LED.	118
Figura 2.56. Circuito típico para encender un LED.	119
Figura 2.57. Circuito con solución para el ejemplo 2.13.	120
Figura 3.1. Tipos de transistor y polarización: (a) tipo <i>nnp</i> , (b) símbolo para el <i>nnp</i> ; (c) tipo <i>pnp</i> , (d) símbolo para <i>pnp</i> .	128
Figura 3.2. Efecto amplificador del transistor.	128
Figura 3.3. Algunos tipos de empaques para transistores.	129
Figura 3.4. Identificación y verificación de terminales en un transistor. (a) Identificación de B-C. (b) Identificación de B-E.	130
Figura 3.5. Identificación de terminales con la selección HFE. (a) No correcta. (b) Inserción en los terminales correctos.	131
Figura 3.6. Identificación de un transistor en empaque TO 39.	131
Figura 3.7. Característica estática que relaciona implícitamente el valor HFE del transistor BC546.	133
Figura 3.8. Características de la corriente de base.	134
Figura 3.9. Zonas de operación del transistor.	134
Figura 3.10. Ubicación de los puntos de voltaje colector-emisor y corriente de base.	135
Figura 3.11. Polarización para configuración de emisor común.	136

Figura 3.12. Variables eléctricas para considerar en el análisis de configuración de emisor común.	137
Figura 3.13. Circuito para el ejemplo 3.2.	139
Figura 3.14. Circuito del ejemplo de polarización por retroalimentación de voltaje.	140
Figura 3.15. Circuito reducido de polarización por retroalimentación del ejemplo.	141
Figura 3.16. Circuito de polarización por divisor de tensión.	143
Figura 3.17. Circuito equivalente al circuito de polarización por divisor de tensión.	143
Figura 3.18. Circuito del ejemplo de polarización por divisor de tensión.	144
Figura 3.19. Simulación en el programa Proteus	146
Figura 3.20. Polarización por divisor de tensión con fuente dual.	147
Figura 3.21. Análisis de la red de entrada para valores Thèvenin.	148
Figura 3.22. Circuito equivalente de polarización con fuente dual.	149
Figura 3.23. Ejemplo de polarización universal con fuente dual.	151
Figura 3.24. Ubicación de la recta de carga en las curvas del transistor.	152
Figura 3.25. Circuito de salida de un amplificador BJT.	153
Figura 3.26. Recta de carga del transistor.	154
Figura 3.27. Comportamiento de la recta de carga con variaciones de sus variables. (a) En variación de $R_C + R_E$, (b) Variación de V_{CC} .	154
Figura 3.28. Ejemplo de aplicación de la recta de carga.	155
Figura 3.29. Gráfica de curvas para el ejemplo 3.7.	157
Figura 3.30. Trazado de la recta de carga y búsqueda de valores del punto Q.	158
Figura 3.31. Circuito del ejemplo con los valores comerciales.	159
Figura 3.32. Disposición de la hoja de cálculo para ingresar valores para cálculos.	161
Figura 3.33. Resultado de la programación en hoja de cálculo para verificación de la polarización universal del transistor.	162
Figura 3.34. Circuito de polarización para el ejemplo 3.8.	164
Figura 4.1. (a) Esquema de la estructura de un JFET. (b) Símbolos.	174

Figura 4.2. Polarización del JFET, mostrando sus principales variables.	174
Figura 4.3. Curvas de transferencia del JFET 2N3819. (a) Características de salida. (b) Características de transferencia (Fairchild Semiconductor, 2002).	176
Figura 4.4. Analogía de obstrucción del canal con una manguera.	177
Figura 4.5. Curvas de transferencia del JFET.	178
Figura 4.6. Práctica para hallar los parámetros de transconductancia. (a) Circuito para hallar el I_{DSS} . (b) Circuito para hallar el $V_{GS(off)}$. (c) Disposición de las fuentes para tener voltaje dual.	179
Figura 4.7. Dibujo de la curva de transferencia de manera rápida conociendo solo cinco puntos.	180
Figura 4.8. Disposición de las celdas en la hoja de cálculo.	181
Tabla 4.4. Procedimiento para elegir valores en hoja de cálculo	181
Figura 4.9. Datos de la tabla realizada en la hoja de cálculo para obtener la curva de transferencia.	182
Figura 4.10. Curva de transferencia de la Práctica 4.2.	183
Figura 4.11. Prueba de no conducción de un FET entre drenaje y fuente.	184
Figura 4.12. Activación de la compuerta con un pulso positivo proporcionado por el DMM.	184
Figura 4.13. Prueba de enganche y conducción entre drenaje y fuente.	185
Figura 4.14. Inserción de un pulso negativo a la compuerta para desenganchar el FET.	185
Figura 4.15. Prueba de no conducción entre drenaje y fuente luego de aplicar un pulso negativo a la compuerta.	185
Figura 4.16. MOSFET de vaciamiento. (a) Configuración interna del MOSFET, (b) símbolo y (c) curvas de transferencia.	186
Figura 4.17. MOSFET de enriquecimiento.	187
Figura 4.18. CMOS (del inglés, <i>Complementary MetalOxide Semiconductor</i>). (a) Estructura y composición. (b) Símbolo y salida lógica en V_{OUT} .	188
Figura 4.19. Circuito básico de polarización de un JFET usando dos fuentes.	189

Figura 4.20. Circuito con JFET de polarización fija.	191
Figura 4.21. Autopolarización del JFET.	192
Figura 4.22. Circuito de autopolarización para el ejemplo 4.2.	193
Figura 4.23. Curva de transferencia y línea de autopolarización para la práctica 4.4.	197
Figura 4.24. Circuito de polarización por divisor de tensión para el FET.	197
Figura 4.25. Circuito equivalente para el circuito de polarización por divisor de tensión del JFET.	198
Figura 4.26. Ejemplo de circuito de polarización por divisor de tensión.	200
Figura 4.27. Circuito equivalente del ejemplo.	201
Figura 4.28. Curva de transferencia y recta de polarización para un circuito JFET, en divisor de tensión, obtenido en Matlab.	204
Figura 4.29. Circuito de polarización por divisor de tensión para un MOSFET de enriquecimiento de canal N.	205
Figura 4.30. Circuito equivalente de polarización por división de tensión de un MOSFET.	206
Figura 4.31. Curva de transferencia y línea de polarización del ejemplo.	207
Figura 5.1. Proceso de amplificación de una señal en un circuito a transistor.	219
Figura 5.2. Disposición del circuito en (a) DC y (b) AC.	220
Figura 5.3. Circuito equivalente.	220
Figura 5.4. Circuito a transistor equivalente en AC.	221
Figura 5.5. Modelado del transistor como una red de cuatro puertas.	221
Figura 5.6. Caja negra del transistor poniendo la salida en corto.	222
Figura 5.7. Caja negra del transistor con el circuito abierto a la entrada.	223
Figura 5.8. Circuito de transistor con parámetros híbridos.	224
Figura 5.9. Configuración de emisor. (a) Disposición del transistor, (b) modelo híbrido, (c) modelo re.	225
Figura 5.10. Circuito en configuración de emisor común para el ejemplo 5.1.	227

Figura 5.11. Modelo híbrido para señal AC del circuito del ejemplo 5.1.	228
Figura 5.12. Circuito para el ejemplo 5.2.	229
Figura 5.13. Circuito equivalente AC para el ejemplo 5.2.	230
Figura 5.14. Circuito de polarización por divisor de tensión para cálculo de AC.	232
Figura 5.15. Circuito híbrido para el BJT de polarización por divisor de tensión.	232
Figura 5.16. Circuito híbrido simplificado.	233
Figura 5.17. Circuito para la práctica de laboratorio 5.1.	236
Figura 5.18. Disposición completa de la hoja de cálculo para hallar valores en DC y AC para un sistema de polarización universal en BJT.	238
Figura 5.19. Circuito en Multisim, donde se aprecian los valores de DC y AC.	240
Figura 5.20. Pantalla del osciloscopio del simulador mostrando las dos señales.	241
Figura 5.21. Configuración base común.	241
Figura 5.22. Modelo híbrido de la configuración base común.	242
Figura 5.23. Modulador AM en configuración combinada emisor común y base común.	243
Figura 5.24. Resultado de las señales que ingresan por emisor y por base para conformar una señal AM.	243
Figura 5.25. Configuración de colector común.	244
Figura 5.26. Amplificador de configuración de colector común.	244
Figura 5.27. Circuito híbrido para la configuración de colector común.	245
Figura 5.28. Ejemplo de configuración de colector común.	247
Figura 5.29. Simulación del ejemplo de colector común.	248
Figura 5.30. Señales de entrada y salida. Las escalas son de 2 V para el canal 1 y de 1 V para el canal 2.	248
Figura 5.31. Configuración Darlington. (a) Disposición interna. (b) Presentación comercial.	249
Figura 5.32. Aplicación de transistores Darlington para un amplificador estéreo.	250

Figura 5.33. Modelo AC equivalente para el FET.	251
Figura 5.34. Circuito de autopolarización para análisis AC.	251
Figura 5.35. Circuito de JFET en AC.	252
Figura 5.36. Circuito de ejemplo para cálculo de ganancias en AC.	254
Figura 5.37. Simulación del circuito del ejemplo (Programa Multisim).	256
Figura 5.38. Señales del amplificador con JFET en el osciloscopio para el ejemplo 5.5.	256
Figura 5.39. Concepto del bloque amplificador de ganancia Av.	257
Figura 5.40. Amplificadores en cascada.	257
Figura 6.1. Presentación comercial de un amplificador operacional (a) Tipo DIP. (b) Tipo SOP o SOIC.	266
Figura 6.2. Símbolos usados para el amplificador operacional: (a) estándar, (b) alternativo.	266
Figura 6.3. Configuración interna del amplificador operacional.	267
Figura 6.4. Circuito de amplificador inversor.	268
Figura 6.5. Circuito inversor para el ejemplo 6.1.	269
Figura 6.6. Simulación del ejemplo, realizado en LTspice.	270
Figura 6.7. Señal de entrada para el ejemplo 6.2.	271
Figura 6.8. Señal de salida para el circuito del ejemplo 6.2.	271
Figura 6.9. Simulación del ejemplo en LTspice con señal AC a la entrada, mostrando corrientes y voltajes.	272
Figura 6.10. Circuito amplificador no inversor.	273
Figura 6.11. Amplificador no inversor del ejemplo 6.3.	274
Figura 6.12. Amplificador sumador inversor.	276
Figura 6.13. Circuito sumador para el ejemplo 6.4.	277
Figura 6.14. Circuito restador inversor.	278
Figura 6.15. Circuito para el ejemplo de restador.	281
Figura 6.16. Circuito combinado de amplificador operacional para el ejemplo 6.6.	282
Figura 6.17. Identificación del sumador en A1.	282
Figura 6.18. Identificación del divisor de tensión con el amplificador operacional A3.	283
Figura 6.19. Identificación del amplificador no inversor del ejemplo 6.6.	283

Figura 6.20. Identificación del amplificador operacional A3 como un amplificador inversor.	284
Figura 6.21. Identificación de A4 como un sumador.	284
Figura 6.22. Circuito simulado en Multisim.	285
Figura 6.23. Circuito integrador básico.	286
Figura 6.24. Circuito generador de señales a partir de integradores. (b) Señal cuadrada de entrada, (c) señal de salida del primer integrador, (d) señal de salida del segundo integrador.	287
Figura 6.25. (a) Circuito integrador práctico. (b) Circuito simplificado.	288
Figura 6.26. (a) Circuito diferenciador. (b) Símbolo.	288
Figura 6.27. (a) Bloque diferenciador. (b) Señal de entrada en triangular. (c) Señal cuadrada obtenida a la salida.	289
Figura 6.28. Amplificador logarítmico.	290
Figura 6.29. Amplificador logarítmico con transistor.	291
Figura 6.30. Circuito amplificador exponencial.	291
Figura 6.31. Circuito alternativo exponencial usando transistor.	292
Figura 6.32. Circuito de amplificadores en cascada del ejemplo 6.7.	292
Figura 6.33. Circuito para el ejemplo 6.8.	294
Figura 6.34. Comparador inversor. (a) Circuito con amplificador operacional. (b) Señales de entrada y de salida.	296
Figura 6.35. Comparador no inversor. (a) Circuito con amplificador operacional. (b) Señales de entrada y de salida.	297
Figura 6.36. (a) Circuito comparador de ventana. (b) Señales de referencia, señal de entrada y señal de salida.	298
Figura 6.37. Comparador de ventana usando el circuito integrado LM339.	299
Figura 6.38. Sensor de temperatura LM35 en empaque TO-92. (a) Disposición de terminales. (b) Circuito básico.	300
Figura 6.39. Circuito de alarma cuando la temperatura está fuera de rango.	301
Figura 7.1. Tipos de filtros activos (a) Filtro pasa bajos. (b) Filtro pasa altos. (c) Filtro pasa banda. (d) Filtro atenúa banda.	312
Figura 7.2. Ejemplo de aplicación de los filtros LPF y HPF.	313

Figura 7.3. Representación de los filtros ideales (a) LPF. (b) HPF. (c) BPF y (d) <i>notch</i> .	313
Figura 7.4. Bloque amplificador en dB para el ejemplo 7.1.	314
Figura 7.5. Bloque amplificador en dB para el ejemplo 7.2.	315
Figura 7.6. Bloque amplificador para el ejemplo 7.3.	315
Figura 7.7. Detalles de un filtro con sus características.	316
Figura 7.8. Afectación del filtro debido al orden n .	318
Figura 7.9. Tipos de filtros y sus curvas respectivas de respuesta en frecuencia.	318
Figura 7.10. Ejemplos de <i>roll-off</i> que muestra la pendiente en dB por década. No se muestra la banda permitida.	320
Figura 7.11. (a) Filtro pasa bajo de primer orden. (b) Circuito equivalente como amplificador inversor.	321
Figura 7.12. Diagrama de Bode de un LPF.	322
Figura 7.13. Simulación del diseño de LPF de 1 kHz.	323
Figura 7.14. LPF pasivo.	323
Figura 7.15. LPF en un amplificador no inversor.	325
Figura 7.16. Diagrama de Bode normalizado para el LPF no inversor.	326
Figura 7.17. Diagrama de Bode para el ejemplo 7.5.	327
Figura 7.18. HPF. (a) Circuito activo. (b) Respuesta en frecuencia.	327
Figura 7.19. Montaje para la práctica de filtros básicos.	328
Figura 7.20. Circuitos para filtros Butterworth: (a) de segundo orden, (b) de tercer orden.	330
Figura 7.21. (a) Circuito final del filtro pasa bajo de segundo orden tipo Butterworth. (b) Diagrama de Bode.	333
Figura 7.22. Filtro Butterworth de 5° orden. (a) Circuito en dos etapas de 3 x 2. (b) Diagrama de Bode.	334
Figura 7.23. Características principales de un BPF.	335
Figura 7.24. Circuito eléctrico de segundo orden.	336
Figura 7.25. Circuito para hallar curva del factor de calidad.	338
Figura 7.26. Disposición de la hoja de cálculo para crear el programa sobre el factor de calidad.	339
Figura 7.27. Gráfica de los tres valores de Q , en diferentes valores de resistencias.	340
Figura 7.28. Filtro pasa banda compuesto por un LPF y un HPF.	341

Figura 7.29. BPF activo a partir de LPF y HPF.	341
Figura 7.30. Circuito final para el BPF del ejemplo 7.8.	342
Figura 7.31. Disposición de topología Sallen-Key para filtros LPF. (a) Circuito de un solo polo y ganancia unitaria. (b) Circuito de dos polos y con Ganancia $K = 1 + R_f / R_i$.	343
Figura 7.32. Disposición de topología Sallen-Key para filtros HPF. (a) Circuito de un solo polo y ganancia unitaria. (b) Circuito de dos polos y con Ganancia $K = 1 + R_f / R_i$.	344
Figura 7.33. Distribución de las secciones para la tipología Sallen-Key.	346
Figura 7.34. Circuito final para el ejemplo del LPF de 3400 Hz de 4° orden.	347
Figura 7.35. Diagrama de Bode para el LPF del ejemplo 7.9.	347
Figura 7.36. BPF de segundo orden para frecuencias entre 5 kHz y 50 kHz.	349
Figura 7.37. Respuesta en frecuencia para el BPF del ejemplo 7.10.	349
Figura 8.1. Diagrama en bloques para el funcionamiento de un oscilador.	355
Figura 8.2. Red R-C como principio del oscilador Puente de Wien.	358
Figura 8.3. Circuito anterior equivalente en impedancias.	358
Figura 8.4. Circuito oscilador Puente de Wien.	360
Figura 8.5. Espectros de frecuencia (a) de amplitud y (b) de fase.	361
Figura 8.6. Circuito oscilador de 5 kHz, para el ejemplo 8.1.	362
Figura 8.7. Red de realimentación para el oscilador por cambio de fase.	363
Figura 8.8. Oscilador con amplificador operacional de 25 kHz.	365
Figura 8.9. Oscilador por desplazamiento de fase con transistor.	366
Figura 8.10. Oscilador Hartley con transistor.	367
Figura 8.11. Oscilador Colpitts usando transistor.	368
Figura 8.12. Circuito híbrido parcial del transistor. (a) Circuito de entrada. (b) Filtro en el emisor. (c) Circuito de salida hacia la carga. (d) Filtro de salida.	371
Figura 8.13. Oscilador Colpitts para generar frecuencia de 40 kHz.	372
Figura 8.14. Visualización de la pantalla del osciloscopio para el oscilador de 40 kHz.	372

Figura 8.15. Circuito para onda cuadrada con amplificador operacional.	373
Figura 9.1. Tiristor: (a) composición, (b) circuito electrónico equivalente y (c) símbolo característico para el SCR.	382
Figura 9.2. Presentaciones comerciales del SCR para las referencias TC106D1 y C106D.	383
Figura 9.3. Curva de características del SCR.	383
Figura 9.4. Prueba inicial entre los terminales cátodo y ánodo del SCR C106D.	385
Figura 9.5. Uniendo al tiempo ánodo y compuerta, el SCR conduce.	385
Figura 9.6. Luego de que al SCR se le ha dado una excitación inicial, se mantiene en conducción.	386
Figura 9.7. Circuito para el ejemplo 9.1.	386
Figura 9.8. Circuito práctico para encender bombillo de 3 W.	387
Figura 9.9. GTO. (a) Presentación comercial para altas corrientes. (b) Símbolos usados.	388
Figura 9.10. DIAC. (a) Presentaciones comerciales. (b) Símbolo. (c) Curva de características.	389
Figura 9.11. TRIAC. (a) Presentaciones comerciales. (b) Circuito equivalente y (c) símbolo.	390
Figura 9.12. Curva de características del TRIAC.	390
Figura 9.13. Circuito para el ejemplo 9.2.	391
Figura 9.14. Circuito para mostrar el funcionamiento del TRIAC.	392
Figura 9.15. Circuito de práctica de laboratorio para ajuste de fase con TRIAC.	393
Figura 9.16. El relevo. (a) Composición interna. (b) Algunas presentaciones comerciales. (c) Símbolo.	395
Figura 9.17. Circuito de encendido de motor con autosostenido.	397
Figura 9.18. Contactor para tres líneas de voltaje. (a) Aspecto comercial. (b) Esquema de contactos.	398
Figura 10.1. Sistema de comunicación.	403
Figura 10.2. Sistema de modulación y transmisión.	405
Figura 10.3. Modulador AM usando un diodo y sistema sintonizado.	406
Figura 10.4. Circuito modulador AM con transistor.	407

Figura 10.5. Demodulador AM por envolvente usando diodo.	408
Figura 10.6. Efecto de la selección de los valores para el filtro de recuperación de la moduladora. (a) Valor muy bajo para el condensador.	
(b) Valor recomendado para una buena recuperación.	409
Figura 10.7. Simulación por bloques del detector coherente para AM.	410
Figura 10.8. Demodulador AM coherente usando un transistor.	411
Figura 10.9. Transmisor de FM usando dos transistores.	412
Figura 10.10. Configuración interna de un micrófono electret.	
(a) Estructura mecánica. (b) Esquema eléctrico.	413
Figura A.1. Símbolo de un transformador básico.	425
Figura A.2. Detalle del núcleo de un transformador.	427
Figura A.3. Configuración de transformadores en Proteus.	430
Figura A.4. Configuración de un transformador para uso con derivación (TAP) central.	430
Figura C.1. Análisis de un circuito RC.	437
Figura C.2. Parámetros para cálculo del voltaje de rizo para t_x cercano a T.	438

Tablas

Tabla 1.1. Colores en las resistencias de cuatro bandas y sus equivalentes numéricos	51
Tabla 1.2. Colores en las resistencias de cinco bandas y sus equivalentes numéricos	52
Tabla 1.3. Valores comerciales para resistencias, según serie E24 de la IEC	53
Tabla 1.4. Colores para los inductores comerciales en paquete	55
Tabla 1.5. Valores comerciales de tolerancia y voltajes para los condensadores cerámicos y electrolíticos	56
Tabla 1.6. Valores de voltajes en las resistencias	63
Tabla 1.7. Tabla periódica mostrando la clasificación de conducción eléctrica	65
Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del diodo 1N914	88
Tabla 2.2. Especificaciones para los diodos rectificadores 1N400x	89
Tabla 2.3. Características para dos diodos comerciales	96
Tabla 2.4. Características de los diodos normales Zener comerciales. Parte 1	98
Tabla 2.5. Características de los diodos normales Zener comerciales. Parte 2	98
Tabla 2.6. Características de los LED más comunes	119
Tabla 3.1. Parámetros para polarización en DC para el transistor 2N3904	132

Tabla 3.2. Cálculo de error en cada parámetro del diseño	160
Tabla 3.3. Comandos para las fórmulas en la hoja de cálculo para calcular polarización DC en el BJT	161
Tabla 4.1. Parámetros del JFET	175
Tabla 4.2. Comparativos del BJT contra el JFET	176
Tabla 4.3. Datos para dibujo rápido de la curva de transferencia	180
Tabla 5.1. Comandos de fórmulas en la hoja de cálculo para obtener valores de ganancias y de las variables híbridas	239
Tabla 7.1. Valores de amplitud en salidas para cada filtro	329
Tabla 7.2. Valores normalizados para la red de elementos del filtro	330
Tabla 7.3 . Lista de comandos para graficar el factor Q	339
Tabla 7.4. Distribución de polinomios para los filtros Butterworth	344
Tabla 7.5. Tabla para diseño de Filtros Butterworth con topología sallen-Key	345
Tabla 9.1. Características del scr C106D	384
Tabla 9.2. Principales características del TRIAC	391
Tabla B.1. AWG, calibre 0000 hasta calibre 40	433