

# CONTENIDO

---

---

*Prefacio v*

*Introducción para el estudiante xi*

## **CAPITULO 1 CONCEPTOS BASICOS**

- 1.0 Introducción 1
- 1.1 Historia 2
- 1.2 Modelos de circuitos de estado sólido 3
- 1.3 Elementos de circuitos lineales y no lineales 4
- 1.4 Señales analógicas en comparación con las digitales 6
- 1.5 Fuentes dependientes 7
- 1.6 Efectos de la frecuencia 8
- 1.7 Análisis y diseño 10
  - 1.7.1 Comparación de diseño y análisis 10
  - 1.7.2 Origen de los requerimientos de diseño 10
  - 1.7.3 ¿Qué significan “extremo abierto” y “compromiso” (trade off)? 11
- 1.8 Simulaciones por computadora 13
- 1.9 Componentes del proceso de diseño 14
  - 1.9.1 Principios del diseño 15
  - 1.9.2 Definición del problema 16
  - 1.9.3 Subdivisión del problema 17
  - 1.9.4 Documentación 17
  - 1.9.5 El diagrama esquemático 18
  - 1.9.6 La lista de componentes 18
  - 1.9.7 Listas de control de avance del proyecto y otros documentos 19
  - 1.9.8 Uso de documentos 20
  - 1.9.9 Lista de verificación del diseño 20
  - 1.9.10 Prototipo del circuito 21
- Resumen 22

## **CAPÍTULO 2 AMPLIFICADORES OPERACIONALES IDEALES 24**

- 2.0 Introducción 24
- 2.1 Amplificadores operacionales ideales 25
  - 2.1.1 Fuentes dependientes 25
  - 2.1.2 Circuito equivalente de amplificador operacional 27
  - 2.1.3 Método de análisis 30
- 2.2 El amplificador inversor 30
- 2.3 El amplificador no inversor 33
- 2.4 Resistencia de entrada de circuitos de amplificador operacional 41
- 2.5 Entradas inversora y no inversora combinadas 44
- 2.6 Diseño de circuitos de amplificador operacional 46
- 2.7 Otras aplicaciones del amplificador operacional 52
  - 2.7.1 Circuito de impedancia negativa 52
  - 2.7.2 Generador de corriente dependiente 53
  - 2.7.3 Convertidor corriente-voltaje 54
  - 2.7.4 Convertidor voltaje-corriente 55
  - 2.7.5 Amplificador inversor con impedancias 56
  - 2.7.6 Aplicaciones de computadora analógica 57
  - 2.7.7 Integrador Miller no inversor 59

Resumen 60

Problemas 60

## **CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON DIODOS SEMICONDUCTORES 70**

- 3.0 Introducción 70
- 3.1 Teoría de semiconductores 71
  - 3.1.1 Conducción en materiales 73
  - 3.1.2 Conducción materiales semiconductores 75
  - 3.1.3 Estructura cristalina 76
  - 3.1.4 Generación y recombinación de electrones y huecos 78
  - 3.1.5 Semiconductores contaminados 79
  - 3.1.6 Semiconductor tipo  $n$  80
  - 3.1.7 Semiconductor tipo  $p$  80
  - 3.1.8 Concentraciones de portadores 80
  - 3.1.9 Portadores de exceso 82
  - 3.1.10 Recombinación y generación de portadores de exceso 82
  - 3.1.11 Transporte de corriente eléctrica 83
  - 3.1.12 Difusión de portadores 83
  - 3.1.13 Arrastre en campo eléctrico 84
- 3.2 Diodos semiconductores 87
  - 3.2.1 Construcción del diodo 89
  - 3.2.2 Relación entre la corriente y el voltaje del diodo 90
  - 3.2.3 Operación del diodo 92
  - 3.2.4 Efectos de la temperatura 93

3.2.5	Modelos de circuito equivalente de diodo	95
3.2.6	Análisis de circuitos con diodos	96
3.2.7	Capacidad de manejo de potencia	103
3.2.8	Capacitancia del diodo	104
3.3	Rectificación	104
3.3.1	Rectificación de media onda	105
3.3.2	Rectificación de onda completa	106
3.3.3	Filtrado	107
3.3.4	Circuito duplicador de voltaje	110
3.4	Diodos Zener	112
3.4.1	Regulador con Zener	113
3.4.2	Diodos Zener prácticos y regulación porcentual	117
3.5	Recortadores y fijadores	119
3.5.1	Recortadores	119
3.5.2	Fijadores	124
3.6	Circuitos con amplificadores operacionales que contienen diodos	127
3.7	Tipos alternativos de diodos	129
3.7.1	Diodos Schottky	129
3.7.2	Diodos emisores de luz (LED)	130
3.7.3	Fotodiodos	131
3.8	Especificaciones del fabricante	132
	Resumen	133
	Problemas	134

## **CAPÍTULO 4 CIRCUITOS CON TRANSISTOR DE UNIÓN BIPOLAR 148**

4.0	Introducción	149
4.1	Estructura de transistores bipolares	149
4.2	Modelo del BJT para señal grande	153
4.3	Deducción de modelos para $ca$ de señal pequeña	154
4.4	Modelos de $ca$ para señal pequeña de dos puertos	156
4.5	Curvas características	158
4.6	Hojas de datos de fabricantes para BJT	160
4.7	Modelos de BJT para simulaciones por computadora	161
4.8	Configuraciones de amplificador de una etapa	164
4.9	Polarización de amplificadores de una etapa	166
4.10	Consideraciones de potencia	169
4.10.1	Deducción de las ecuaciones de potencia	170
4.11	Análisis y diseño de circuitos de polarización de amplificadores de voltaje	172
4.11.1	Procedimiento de análisis	172
4.11.2	Procedimiento de diseño	177
4.11.3	Fuentes de potencia del amplificador	183
4.11.4	Selección de componentes	184
4.12	Análisis y diseño de circuitos de polarización de amplificadores de corriente	184

4.13	No linealidades de transistores de unión bipolar	188
4.14	Características de encendido/apagado de los circuitos con BJT	190
4.15	Fabricación de circuitos integrados	192
4.15.1	Transistores y diodos	192
4.15.2	Resistores	193
4.15.3	Capacitores	193
4.15.4	Transistores laterales	194
	Resumen	194
	Problemas	195

## CAPITULO 5 AMPLIFICADORES CON TRANSISTORES DE UNIÓN BIPOLAR 207

5.0	Introducción	207
5.1	Amplificador en emisor común	208
5.1.1	Fórmula de impedancia de ganancia	208
5.1.2	Resistencia de entrada, $R_{in}$	209
5.1.3	Ganancia de corriente, $A_i$	210
5.1.4	Ganancia de voltaje, $A_v$	210
5.1.5	Resistencia de salida, $R_o$	211
5.2	Amplificador en emisor común con resistor en el emisor (amplificador Con resistor en el emisor)	213
5.2.1	Resistencia de entrada, $R_{in}$	213
5.2.2	Ganancia de corriente, $A_i$	215
5.2.3	Ganancia de voltaje, $A_v$	215
5.2.4	Resistencia de salida, $R_o$	215
5.3	Amplificador en colector común (seguidor de emisor)	224
5.3.1	Resistencia de entrada, $R_{in}$	224
5.3.2	Ganancia de corriente, $A_i$	225
5.3.3	Ganancia de voltaje, $A_v$	225
5.3.4	Resistencia de salida, $R_o$	226
5.4	Amplificador en base común	230
5.4.1	Resistencia de entrada, $R_{in}$	231
5.4.2	Ganancia de corriente, $A_i$	231
5.4.3	Ganancia de voltaje, $A_v$	232
5.4.4	Resistencia de salida, $R_o$	232
5.5	Aplicaciones de los amplificadores con transistor	236
5.6	Divisor de fase	237
5.7	Acoplamiento de amplificadores	238
5.7.1	Acoplamiento capacitivo	238
5.7.2	Acoplamiento directo	238
5.7.3	Acoplamiento con transformador	241
5.7.4	Acoplamiento óptico	243
5.8	Análisis de amplificadores multietapa	245
5.9	Configuración <b>cascodo</b>	250

5.10 Fuentes de corriente y cargas activas	252
5.10.1 Una fuente de corriente simple	252
5.10.2 Fuente de corriente Widlar	253
5.10.3 Fuente de corriente Wilson	256
5.10.4 Fuentes de corriente múltiples empleando espejos de corriente	258
Resumen	259
Problemas	262

## **CAPITULO 6 AMPLIFICADORES CON TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO 277**

6.0 Introducción	277
6.1 Ventajas y desventajas de los FET	278
6.2 FET de semiconductor de óxido metálico (MOSFET)	279
6.2.1 Características terminales del MOSFET en modo de enriquecimiento	281
6.2.2 MOSFET en modo de agotamiento	284
6.2.3 Circuito equivalente para señal grande	287
6.2.4 Modelo para señal pequeña del MOSFET	287
6.3 Transistor de efecto de campo de unión (JFET)	290
6.3.1 Variación del voltaje compuerta a fuente del JFET	293
6.3.2 Características de transferencia del JFET	293
6.3.3 Modelo de $ca$ para señal pequeña del JFET	296
6.4 Configuraciones y polarización de amplificadores con FET	299
6.4.1 Polarización del MOSFET de componentes discretos	299
6.5 Circuitos integrados con MOSFET	302
6.5.1 Polarización de circuitos integrados con MOSFET	303
6.5.2 Efecto cuerpo	305
6.6 Comparación del MOSFET con el JFET	306
6.7 Modelos del FET para simulaciones por computadora	308
6.8 Configuraciones canónicas de amplificadores con FET	312
6.9 Análisis de amplificadores con FET	314
6.9.1 El amplificador CS (y con resistor en fuente)	314
6.9.2 El amplificador CG	319
6.9.3 El amplificador CD (SF)	323
6.10 Diseño de amplificadores con FET	326
6.10.1 El amplificador CS	
6.10.2 El amplificador CD	336
6.10.3 El amplificador bootstrap SF	340
6.11 Otros dispositivos	343
6.11.1 Transistor de unión de barrera semiconductor metálica	343
6.11.2 VMOSFET (VMOS)	344
6.11.3 Otros dispositivos MOS	344

Resumen	345
Problemas	346

## CAPÍTULO 7 ESTABILIDAD DE POLARIZACIÓN DE AMPLIFICADORES CON TRANSISTOR 358

- 7.0 Introducción 358
- 7.1 Tipos de polarización 359
  - 7.1.1 Polarización con retroalimentación de corriente 359
  - 7.1.2 Polarización de voltaje y de corriente 360
- 7.2 Efectos de los cambios de parámetros-estabilidad de polarización 362
  - 7.2.1 Configuración CE 363
  - 7.2.2 Configuración SE 369
- 7.3 Compensación con diodo 372
- 7.4 Diseño para obtener estabilidad de polarización en amplificadores BJT 374
- 7.5 Efectos de la temperatura en el FET 375
- 7.6 Reducción de las variaciones de temperatura 377

Resumen 379

Problemas 380

## CAPÍTULO 8 AMPLIFICADORES Y FUENTES DE POTENCIA 384

- 8.0 Introducción 384
- 8.1 Clases de amplificadores 384
  - 8.1.1 Operación clase A 385
  - 8.1.2 Operación clase B 385
  - 8.1.3 Operación clase AB 387
  - 8.1.4 Operación clase C 388
- 8.2 Circuitos amplificadores de potencia-operación clase A 389
  - 8.2.1 Amplificador acoplado inductivamente 389
  - 8.2.2 Amplificador de potencia acoplado con transformador 391
- 8.3 Circuitos amplificadores de potencia-operación clase B 395
  - 8.3.1 Amplificadores de potencia clase B y AB de simetría complementaria 395
  - 8.3.2 Amplificadores de potencia clase B de simetría complementaria compensados por diodo (SCCD) 398
  - 8.3.3 Cálculos de potencia para el amplificador push-pull clase B 401
- 8.4 Circuito Darlington 408
- 8.5 Fuentes de potencia empleando transistores de potencia 413
  - 8.5.1 Fuente de potencia empleando componentes discretos 413
  - 8.5.2 Fuente de potencia empleando regulador de CI (regulador de tres terminales) 417
  - 8.5.3 Fuente de potencia utilizando un regulador ajustable de tres terminales 421
  - 8.5.4 Regulador de corrientes más altas 422
- 8.6 Reguladores de conmutación 423
  - 8.6.1 Eficiencia de los reguladores de conmutación 425

Resumen 425

Problemas 426

**CAPÍTULO 9 AMPLIFICADORES OPERACIONALES PRÁCTICOS 437**

- 9.0 Introducción 437
- 9.1 Amplificadores diferenciales 438
  - 9.1.1 Características de transferencia de *cd* 438
  - 9.1.2 Ganancias en modo común y en modo diferencial 439
  - 9.1.3 Amplificador diferencial con fuente de corriente constante 442
  - 9.1.4 Amplificador diferencial con entrada y salida en un solo extremo 445
- 9.2 Desplazadores de nivel 451
- 9.3 El amplificador operacional típico 454
  - 9.3.1 Empaque 455
  - 9.3.2 Requerimientos de potencia 456
  - 9.3.3 El amplificador operacional 741 456
- 9.4 Especificaciones del fabricante 459
- 9.5 Amplificadores operacionales prácticos 459
  - 9.5.1 Ganancia de voltaje (G) en malla abierta 460
  - 9.5.2 Modelo del amplificador operacional modificado 461
  - 9.5.3 Voltaje de desbalance de entrada ( $V_{io}$ ) 461
  - 9.5.4 Corriente de polarización de entrada ( $I_{pol}$ ) 463
  - 9.5.5 Rechazo en modo común 467
  - 9.5.6 Relación de rechazo a fuentes de potencia 467
  - 9.5.7 Resistencia de salida 468
- 9.6 Simulación por computadora de circuitos con amplificador operacional 471
- 9.7 Amplificador no inversor 473
  - 9.7.1 Resistencias de entrada y salida 473
  - 9.7.2 Ganancia de voltaje 475
  - 9.7.3 Amplificadores de entrada múltiple 478
- 9.8 Amplificador inversor 479
  - 9.8.1 Resistencia de entrada y de salida 479
  - 9.8.2 Ganancia de voltaje 480
  - 9.8.3 Amplificadores de entrada múltiple 482
- 9.9 Sumador diferencial 485
- 9.10 Amplificadores con entradas o salidas balanceadas 489
- 9.11 Acoplamiento entre entradas múltiples 492
- 9.12 Amplificador de potencia de audio 493
  - 9.12.1 Amplificador operacional de potencia en puente 494
  - 9.12.2 Intercomunicador 495
- Resumen 496
- Problemas 496

**CAPÍTULO 10 COMPORTAMIENTO EN FRECUENCIA DE AMPLIFICADORES CON TRANSISTORES 508**

- 10.0 Introducción 509
- 10.1 Respuesta de amplificadores en baja frecuencia 513

10.1.1	Respuesta de baja frecuencia del amplificador con resistor de emisor	5 13
10.1.2	Diseño para una característica de frecuencia dada	5 18
10.1.3	Respuesta en baja frecuencia del amplificador en emisor común	522
10.1.4	Respuesta en baja frecuencia del amplificador en fuente común	525
10.1.5	Respuesta en baja frecuencia del amplificador en base común	528
10.1.6	Respuesta en baja frecuencia del amplificador seguidor de emisor	529
10.1.7	Respuesta en baja frecuencia del amplificador seguidor de fuente (drenaje común)	530
10.2	Modelos de transistores para alta frecuencia	532
10.2.1	Teorema de Miller	533
10.2.2	Modelo BJT para alta frecuencia	534
10.2.3	Modelo del FET para alta frecuencia	536
10.3	Respuesta en alta frecuencia de amplificadores	538
10.3.1	Respuesta en alta frecuencia del amplificador en emisor común	538
10.3.2	Respuesta en alta frecuencia del amplificador en fuente común	542
10.3.3	Respuesta en alta frecuencia del amplificador en base común	544
10.3.4	Respuesta en alta frecuencia del amplificador seguidor de emisor	546
10.3.5	Respuesta en alta frecuencia del amplificador en drenaje común (CD o SF)	548
10.3.6	Amplificadores <b>casco</b>	549
10.4	Diseño de amplificadores para alta frecuencia	550
10.5	Respuesta de frecuencia de los circuitos con amplificadores operacionales	550
10.5.1	Respuesta del amplificador operacional en malla abierta	554
10.5.2	Corrimiento de fase	557
10.5.3	Velocidad de respuesta ( <b>Slew-Rate</b> )	557
10.5.4	Diseño de amplificadores utilizando múltiples amplificadores operacionales	560
10.5.5	Amplificador <b>IOI</b>	567
Resumen		570
Problemas		57 1

## **CAPÍTULO II RETROALIMENTACIÓN Y ESTABILIDAD 585**

II .0	Introducción	585
II .1	Consideraciones del amplificador retroalimentado	586
II .2	Tipos de retroalimentación	587
II .3	Amplificadores retroalimentados	588
II .3.1	Retroalimentación de <b>corriente-sustracción</b> de voltaje en amplificadores discretos	588
II .3.2	Retroalimentación de voltaje-sustracción de corriente en un amplificador discreto	592
II .4	Amplificadores retroalimentados multietapa	594
II .5	Retroalimentación en amplificadores operacionales	595
II .6	Estabilidad de amplificadores retroalimentados	599

II.6.1	Estabilidad y respuesta de frecuencia del sistema	601
II.6.2	Diagramas de Bode y estabilidad del sistema	605
II.7	Respuesta de frecuencia-amplificador retroalimentado	610
II.7.1	Amplificador de un polo	610
II.7.2	Amplificador de dos polos	611
II.8	Diseño de un amplificador de tres polos con ecualizador de adelanto	617
II.9	Ecualizador por atraso de fase	623
111 10	Efectos de la carga capacitiva	624
II. 11	Osciladores	625
II. 11. 1	Los osciladores Colpitts y Hartley	625
II. 11. 2	Oscilador puente de Wien	626
111 11. 3	El oscilador por corrimiento de fase	628
II. 11. 4	El oscilador con cristal	629
II. 1. 5	Generador de tonos por contacto	63 1
Resumen		631
Problemas		633

## **CAPÍTULO 12 FILTROS ACTIVOS 640**

12.0	Introducción	641
12.1	Integradores y diferenciadores	641
12.2.	Diseño de redes activas	645
12.3	Filtros activos	648
12.3.1	Propiedades y clasificación de filtros	649
12.3.2	Filtros activos de primer orden	655
12.4	Amplificador de señales, tipo general	666
12.5	Filtros analógicos clásicos	668
12.5.1	Filtros Butterworth	669
12.5.2	Filtros Chebyshev	672
12.6	Transformaciones	674
12.6.1	Transformación de pasabajos a pasaaltos	674
12.6.2	Transformación pasabajos a pasabanda	675
12.7	Diseño de filtros Butterworth y Chebyshev	676
12.7.1	Diseño del filtro pasabajos	677
12.7.2	Orden del filtro	677
12.7.3	Factores de escala de parámetros	680
12.7.4	Filtro pasaaltos	688
12.7.5	Diseño de filtros pasabanda y rechazabanda	690
12.8	Filtros en circuitos integrados	694
12.8.1	Filtros de <b>capacitor</b> conmutable	695
12.8.2	Filtro pasabajos Butterworth de sexto orden con <b>capacitor</b> conmutable	697
12.9	Comentarios finales	699
Resumen		699
Problemas		700

## **CAPÍTULO 13 CIRCUITOS CUASILINEALES 706**

- 13 .O Introducción 706
- 13.1 Rectificadores 706
- 13.2 Limitadores retroalimentados 717
- 13.3 Comparadores 73 1
- 13.4 Disparadores Schmitt 735
  - 13.4.1 Disparadores de Schmitt con limitadores 738
  - 13.4.2 Disparador Schmitt de circuito integrado 744
- 13.5 Conversión entre analógico y digital 746
  - 13.5.1 Convertidor digital-analógico (D/A) 746
  - 13.5.2 Convertidor analógico-digital (A/D) 747
- Resumen 75 1
- Problemas 752

## **CAPÍTULO 14 FORMAS DE ONDA PULSÁTILES Y CIRCUITOS TEMPORIZADORES 760**

- 14.0 Introducción 760
- 14.1 Red RC pasaalto 762
  - 14.1 .|| Respuesta en estado estable de la red pasaalto a un tren de pulsos 766
- 14.2 Respuesta en estado estable de la red RC pasabajos a un tren de pulsos 771
- 14.3 Diodos 777**
  - 14.3.1 Respuesta en estado estable del circuito con diodo un tren de pulsos 777
- 14.4 Circuitos de disparo 781
  - 14.4.1 Respuesta a un tren de pulsos 782
- 14.5 El temporizador 555 783
  - 14.5.1 El oscilador de relajación 784
  - 14.5.2 El 555 como un oscilador 787
  - 14.5.3 El 555 como un circuito monoestable 794
- Resumen 796
- Problemas 797

## **CAPÍTULO 15 FAMILIAS LÓGICAS DIGITALES 805**

- 15 .O Introducción 805
- 15.1 Conceptos básicos de lógica digital 805
  - 15.1 .|| Definiciones de estado - lógica positiva y negativa 806
  - 15.1.2 Lógica independiente del tiempo o sin reloj 807
  - 15.1.3 Lógica dependiente del tiempo o de reloj 807
  - 15.1.4 Funciones lógicas elementales 807
  - 15.1.5 Álgebra booleana 8 ||
- 15.2 Construcción y empaque de CI 812
- 15.3 Consideraciones prácticas en el diseño digital 814
- 15.4 Características de circuitos digitales con BJT 817

15.5	Familias lógicas bipolares	818
15.6	Lógica transistor-transistor (TTL)	818
15.6.1	Configuraciones de colector abierto	820
15.6.2	Pull up activo	823
15.6.3	Compuertas H-TTL	828
15.6.4	Compuertas TTL Schottky	828
15.6.5	Compuertas de tres estados	829
15.6.6	Lista de dispositivos	831
15.7	Lógica de emisor acoplado (ECL)	832
15.7.1	Lista de dispositivos	834
15.8	Características de circuitos digitales con FET	834
15.8.1	El MOSFET de enriquecimiento de canal $n$	834
15.8.2	El MOSFET de enriquecimiento de canal $p$	835
15.9	Familias de transistores FET	836
15.9.1	MOS de canal $n$	836
15.9.2	MOS de canal $p$	837
15.10	MOS complementaria (CMOS)	837
15.10.1	Interruptor analógico CMOS	841
15.10.2	Lista de dispositivos CMOS y reglas de uso	843
15.11	Comparación de familias lógicas	845
	Resumen	848
	Problemas	848

## **CAPÍTULO 16 CIRCUITOS INTEGRADOS DIGITALES 856**

16.0	Introducción	856
16.1	Decodificadores y codificadores	857
16.1.1	Selector de datos/multiplexor	860
16.1.2	Decodificadores/codificadores de teclado	862
16.1.3	Generadores/verificadores de paridad	864
16.2	Manejadores y sistemas asociados	864
16.2.1	Visualizador de cristal líquido (LCD)	867
16.3	Flip-flops, cerrojos y registros de corrimiento	868
16.3.1	Flip-flops	870
16.3.2	Cerrojos y memorias	874
16.3.3	Registros de corrimiento	877
16.4	Contadores	879
16.4.1	Medición de frecuencia	886
16.5	Relojes	889
16.5.1	Oscilador controlado por voltaje (OCV)	889
16.6	Memorias	892
16.6.1	Memorias en serie	892
16.6.2	Memoria de acceso aleatorio (RAM)	895
16.6.3	ROM y PROM	896
16.6.4	EPROM	897

16.7	Circuitos más complejos	899
16.7.1	Unidad de lógica aritmética (ULA)	899
16.7.2	Sumadores completos	900
16.7.3	Generadores de acarreo anticipado	900
16.7.4	Comparador de magnitud	902
16.8	Lógica de arreglo programable (PAL).	903
16.9	Introducción a problemas	903
16.9.1	Generación de números aleatorios	904
16.9.2	Medición de ángulo mecánico o velocidad	904
16.9.3	El interruptor de efecto Hall	905
16.9.4	Uso de ventanas de tiempo	906
16.10	Comentarios finales	907
	Problemas	908

## **APÉNDICES**

<b>A</b>	Micro-Cap y Spice	929
<b>B</b>	Valores estándar de componentes	944
<b>C</b>	Hojas de datos de fabricantes	946
<b>D</b>	Respuestas a los problemas seleccionados	985

## **Índice 993**