

# Contenido

## PREFACIO

xxvii

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION A LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES</b>	<b>1</b>
	Objetivos de aprendizaje	1
1-0	Introducción	2
1-1	Breve bosquejo histórico	2
	1-1.1 <i>Los primeros años,</i>	2
	1-1.2 <i>Nacimiento y desarrollo del amplificador operacional del circuito integrado,</i>	2
	1-1.3 <i>Progreso en el desarrollo de los amplificadores operacionales,</i>	3
	1-1.4 <i>Los amplificadores operacionales se especializan,</i>	3
1-2	El amplificador operacional de propósito general 741	4

1-2.1	<i>Símbolo y terminales del circuito,</i>	4
1-2.2	<i>Esquema del circuito,</i>	5
1-3	<b>Encapsulado y terminales</b>	6
1-3.1	<i>Encapsulado,</i>	6
1-3.2	<i>Combinación de símbolo y terminales,</i>	7
1-4	<b>Cómo identificar o especificar un amplificador operacional</b>	8
1-4.1	<i>El código de identificación,</i>	8
1-4.2	<i>Ejemplo de especificación de pedido,</i>	10
1-5	<b>Fuentes secundarias</b>	10
1-6	<b>Conexión de circuitos de amplificadores operacionales</b>	11
1-6.1	<i>Fuente de poder,</i>	11
1-6.2	<i>Sugerencias para conectar amplificadores operacionales,</i>	12
	<b>Problemas</b>	13

## **2 PRIMERAS EXPERIENCIAS CON UN AMPLIFICADOR OPERACIONAL 14**

	<b>Objetivos de aprendizaje</b>	14
2-0	<b>Introducción</b>	15
2-1	<b>Terminales de los amplificadores operacionales</b>	15
2-1.1	<i>Terminales de alimentación de corriente,</i>	16
2-1.2	<i>Terminales de salida,</i>	18
2-1.3	<i>Terminales de entrada,</i>	18
2-1.4	<i>Corrientes de polarización de entrada y desviación del voltaje ("offset"),</i>	20
2-2	<b>Ganancia de voltaje en lazo abierto</b>	20
2-2.1	<i>Definición,</i>	20
2-2.2	<i>Voltaje diferencial de entrada, <math>E_d</math>,</i>	21
2-2.3	<i>Conclusiones,</i>	21
2-3	<b>Detectores de cruce por cero</b>	23
2-3.1	<i>Detector no inversor de cruce por cero,</i>	23
2-3.2	<i>Detector inversor de cruce por cero,</i>	24
2-4	<b>Detectores de nivel de voltaje positivo y negativo</b>	25
2-4.1	<i>Detectores de nivel positivo,</i>	25
2-4.2	<i>Detectores de nivel negativo,</i>	25
2-5	<b>Aplicación de los detectores de nivel de voltaje</b>	25
2-5.1	<i>Voltaje de referencia ajustable,</i>	25
2-5.2	<i>Interruptor activado por sonido,</i>	27

- 2-5.3 *Voltímetro luminoso, 28*
- 2-5.4 *Detector de humo, 28*
- 2-6 **Procesamiento de señales con detectores de nivel de voltaje, 30**
  - 2-6.1 *Introducción, 30*
  - 2-6.2 *Convertidor de onda senoidal a cuadrada, 31*
- 2-7 **Conexión de una computadora a detectores de nivel de voltaje 31**
  - 2-7.1 *Introducción, 31*
  - 2-7.2 *Comparador de voltaje cuádruple, LM339, 32*
  - 2-7.3 *Modulador de ancho de pulso no inversor, 34*
  - 2-7.4 *Moduladores de ancho de pulso inversores y no inversores, 36*
- 2-8 **Conversión analógica a digital con una microcomputadora y con un modulador de ancho de pulso 38**
  - Ejercicios de laboratorio 38
  - Problemas 40

### 3

## AMPLIFICADORES INVERSORES Y NO INVERSORES

43

- Objetivos de aprendizaje 43
- 3-0 **Introducción 44**
- 3-1 **Amplificador inversor 44**
  - 3-1.1 *Introducción, 45*
  - 3-1.2 *Voltaje positivo aplicado a la entrada inversora, 45*
  - 3-1.3 *Corrientes de carga y de salida, 46*
  - 3-1.4 *Voltaje negativo aplicado a la entrada inversora, 47*
  - 3-1.5 *Voltaje de ca aplicado a la entrada inversora, 49*
  - 3-1.6 *Procedimiento de diseño, 50*
  - 3-1.7 *Procedimiento de análisis, 50*
- 3-2 **Sumador inversor y mezclador de audio 52**
  - 3-2.1 *Sumador inversor, 52*
  - 3-2.2 *Mezclador de audio, 53*
  - 3-2.3 *Nivel de cd para desviar una señal de ca, 53*
- 3-3 **Amplificador multicanal 54**
  - 3-3.1 *Necesidad de un amplificador multicanal, 54*
  - 3-3.2 *Análisis del circuitos, 54*
  - 3-3.3 *Procedimiento de diseño, 57*

- 3-4 Amplificador inversor de promedio 57
- 3-5 Seguidor de voltaje 58
  - 3-5.1 *Introducción* 58
  - 3-5.2 *Empleo del seguidor de voltaje*, 60
- 3-6 Amplificador no inversor 62
  - 3-6.1 *Análisis del circuito*. 62
  - 3-6.2 *Procedimiento de diseño*, 64
- 3-7 Fuente "ideal" de voltaje 66
  - 3-7.1 *Definición*, 66
  - 3-7.2 *Fuente "ideal" de voltaje*, 66
  - 3-7.3 *Fuente de voltaje "ideal" práctica*, 66
- 3-8 Sumador no inversor 67
- 3-9 Operación con alimentación única 68
- 3-10 Amplificadores diferenciales 70
  - 3-10.1 *Restador* 70
  - 3-10.2 *Amplificador inversor y no inversor*, 72
- 3-11 Servoamplificador 72
  - 3-11.1 *Introducción*, 72
  - 3-11.2 *Análisis del circuito del servoamplificador*, 72
  - 3-11.3 *Acción de retardo*, 74
- Ejercicios de laboratorio 75
- Problemas 76

## **4 COMPARADORES Y CIRCUITOS DE CONTROL**

80

- Objetivos de aprendizaje 80
- 4-0 Introducción 81
- 4-1 Efectos del ruido sobre los circuitos comparadores 81
- 4-2 Retroalimentación positiva 83
  - 4-2.1 *Introducción*, 83
  - 4-2.2 *Voltaje de umbral superior*, 83
  - 4-2.3 *Voltaje de umbral inferior*, 83
- 4-3 Detector de cruce por cero con histéresis 86
  - 4-3.1 *Definición de histéresis*, 86
  - 4-3.2 *Detector de cruce por cero con histéresis como un elemento de memoria*, 87
- 4-4 Detectores de nivel de voltaje con histéresis 88

- 4-4.1 *Introducción, 88*
- 4-4.2 *Detector no inversor de nivel de voltaje con histéresis, 89*
- 4-4.3 *Detector inversor de nivel de voltaje con histéresis, 91*
- 4-5 **Detector de nivel de voltaje con ajuste independiente de histéresis y voltaje central 93**
  - 4-5.1 *Introducción, 93*
  - 4-5.2 *Circuito de control de un cargador de batería, 95*
- 4-6 **Principios del control apagado-encendido (on-off) 97**
  - 4-6.1 *Comparadores en el control de proceso, 97*
  - 4-6.2 *El termostato como comparador, 97*
  - 4-6.3 *Directrices para la selección y diseño, 97*
- 4-7 **Controlador con 2 puntos de ajuste independientemente 98**
  - 4-7.1 *Principio de operación, 98*
  - 4-7.2 *Características de entrada-salida de un controlador con dos puntos independientemente ajustables, 98*
  - 4-7.3 *Selección de los voltaje de los puntos de ajuste, 98*
  - 4-7.4 *Circuito de los voltajes de los puntos de ajuste independientes, k98*
  - 4-7.5 *Precauciones, 100*
- 4-8 **Comparador de precisión, 111/311 102**
  - 4-8.1 *Introducción, 102*
  - 4-8.2 *Operación de la terminal de salida, 102*
  - 4-8.3 *Operación de la terminal de habilitación, 103*
- 4-9 **Detector de ventana 105**
  - 4-9.1 *Introducción, 105*
  - 4-9.2 *Operación del circuito, 105*
- 4-10 **Tiempo de propagación 107**
  - 4-10.1 *Definición, 107*
  - 4-10.2 *Medición del tiempo de propagación, 107*
- Ejercicio de laboratorio 108**
- Problemas 109**

## **5 ALGUNAS APLICACIONES DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES**

112

- Objetivos de aprendizaje 112**
- 5-0 **Introducción 113**
- 5-1 **Voltímetro cd de alta resistencia 113**

- 5-1.1 *Circuito básico de medición de voltajes, 113*
- 5-1.2 *Cambio de escala en el voltímetro, 114*
- 5-2 **Voltímetro universal de alta resistencia 115**
  - 5-2.1 *Operación del circuito, 115*
  - 5-2.2 *Procedimiento de diseño, 116*
- 5-3 **Convertidores de voltaje a corriente: cargas flotantes 117**
  - 5-3.1 *Control de voltaje de la corriente de carga, 117*
  - 5-3.2 *Probador de diodo zener, 117*
  - 5-3.3 *Probador de diodo, 118*
- 5-4 **Probador de diodo emisor de luz 119**
- 5-5 **Alimentación de corriente constante a una carga conectada a tierra 120**
  - 5-5.1 *Convertidor de voltaje diferencial a corriente, 120*
  - 5-5.2 *Fuente de corriente constante alta con carga conectada a tierra, 122*
  - 5-5.3 *Conexión de una microcomputadora a una teleimpresora, 123*
  - 5-5.4 *Fuente de corriente de 4 a 20 mA con control digital, 124*
- 5-6 **Medición de corriente en cortocircuito y conversión de corriente a voltaje 125**
  - 5-6.1 *Introducción 125*
  - 5-6.2 *Utilización del amplificador operacional para medir corriente de cortocircuito 127*
- 5-7 **Medición de la corriente de fotodetectores 127**
  - 5-7.1 *Celda fotoconductora, 127*
  - 5-7.2 *Fotodiodo, 128*
- 5-8 **Amplificador de corriente 128**
- 5-9 **Mediciones de energía de la celda solar 130**
  - 5-9.1 *Introducción a los problemas, 130*
  - 5-9.2 *Conversión de la corriente de cortocircuito de una celda solar a voltaje, 130*
  - 5-9.3 *Circuito divisor de corriente (convertidor de corriente a corriente), 131*
- 5-10 **Desfasador 132**
  - 5-10.1 *Introducción, 132*
  - 5-10.2 *Circuito desfasador, 132*
- 5-11 **Proceso de grabación a velocidad constante 132**
  - 5-11.1 *Introducción a los problemas del corte de discos, 134*
  - 5-11.2 *Modulación del surco con grabación a velocidad constante, 135*

- 5-11.3 *Ruido y sobrecorte de grabación, 136*
- 5-11.4 *Solución a los problemas de ruido y sobrecorte en grabación, 137*
- 5-12 **Reproducción de la grabación 138**
  - 5.12.1 *Necesidad de ecualización para la reproducción, 138*
  - 5.12.2 *Niveles de voltaje de señal y ganancia en el preamplificador, 139*
  - 5.12.3 *Operación de circuito preamplificador de reproducción, 139*
- 5-13 **Control de tono 141**
  - 5.13.1 *Introducción, 141*
  - 5.13.2 *Circuito de control de tono, 141*
- 5-14 **Convertidores de temperatura a voltaje 143**
  - 5-14.1 *Transductor de temperatura AD590, 143*
  - 5-14.2 *Termómetro Celsius, 143*
  - 5-14.3 *Termómetro Fahrenheit, 144*
- Ejercicios de laboratorio 145**
- Problemas 145**

## **6 GENERADORES DE SEÑAL**

149

- Obejetivos de aprendizaje 149
- 6.0 **Introducción 150**
- 6-1 **Multivibrador de oscilación libre 150**
  - 6-1.1 *Acción del multivibrador, 150*
  - 6-1.2 *Frecuencia de oscilación, 152*
- 6-2 **Multivibrador de un disparo 154**
  - 6-2.1 *Introducción, 154*
  - 6-2.2 *Estado estable, 154*
  - 6-2.3 *Transición al estado temporizado, 157*
  - 6-2.4 *Estado temporizado, 157*
  - 6-2.5 *Duración del pulso de salida, 157*
  - 6-2.6 *Tiempo de recuperación, 158*
- 6-3 **Generadores de onda triangular 158**
  - 6-3.1 *Teoría de operación, 158*
  - 6-3.2 *Frecuencia de operación, 159*
  - 6-3.3 *Generador unipolar de onda triangular, 161*
- 6-4 **Generador de onda diente de sierra, 163**
  - 6-4.1 *Operación del circuito, 163*
  - 6-4.2 *Análisis de la forma de onda de diente de sierra, 165*
  - 6-4.3 *Procedimiento de diseño, 165*

- 6-4.4 *Convertidor de voltaje a frecuencia, 166*
- 6-4.5 *Modulación de frecuencia y codificación por corrimiento de frecuencia, 167*
- 6-4.6 *Desventajas, 167*
- 6-5 **Modulador demodulador balanceado, el AD630 168**
  - 6-5.1 *Introducción, 168*
  - 6-5.2 *Terminales de entrada-salida, 168*
  - 6-5.3 *Formas de onda de entrada-salida. 168*
- 6-6 **Generador de onda triangular y cuadrada de precisión 170**
  - 6-6.1 *Operación del circuito, 170*
  - 6-6.2 *Frecuencia de oscilación, 170*
- 6-7 **Estudio sobre la generación de onda senoidal 172**
- 6-8 **Generador de función trigonométrica universal, el AD639 172**
  - 6-8.1 *Introducción, 172*
  - 6-8.2 *Operación con la función senoidal, 173*
- 6-9 **Generador de onda senoidal de precisión 175**
  - 6-9.1 *Operación del circuito, 175*
  - 6-9.2 *Frecuencia de oscilación, 178*
- Ejercicios de laboratorio 178**
- Problemas 180**

**7****AMPLIFICADORES OPERACIONALES CON DIODOS****182**

- Objetivos de aprendizaje 182**
- 7-0 **Introducción a los rectificadores de precisión 183**
- 7-1 **Rectificadores lineales de media onda 185**
  - 7-1.1 *Introducción, 185*
  - 7-1.2 *Rectificador inversor lineal de media onda, con salida positiva, 185*
  - 7-1.3 *Rectificador inversor lineal de media onda, con salida negativa, 188*
  - 7-1.4 *Separador de polaridad de señal, 190*
- 7-2 **Rectificadores de precisión: circuito de valor absoluto, 190**
  - 7-2.1 *Introducción, 190*
  - 7-2.2 *Tipos de rectificadores de precisión de onda completa, 191*



- 7-3 Detectores de pico 194
  - 7-3.1 *Seguidor y retenedor de pico positivo, 194*
  - 7-3.2 *Seguidor y retenedor de pico negativo, 195*
- 7-4 Convertidor de ca a cd 196
  - 7-4.1 *Conversión de ca a cd o circuito MAV, 196*
  - 7-4.2 *Rectificador de precisión con entradas conectadas a tierra, 198*
  - 7-4.3 *Convertidor de ca a cd, 198*
- 7-5 Circuitos con zona muerta 200
  - 7-5.1 *Introducción, 200*
  - 7-5.2 *Circuito con zona muerta y salida negativa, 200*
  - 7-5.3 *Circuito con zona muerta y salida positiva, 203*
  - 7-5.4 *Circuito con zona muerta y salida bipolar, 203*
- 7-6 Recortador de precisión 203
- 7-7 Convertidor de onda triangular a onda senoidal 205
  - Ejercicios de laboratorio 206
  - Problemas 207

## 8

### AMPLIFICADORES DIFERENCIALES, DE INSTRUMENTACION Y DE PUENTE

209

- Objetivos de aprendizaje 208
- 8-0 Introducción 209
- 8-1 Amplificador diferencial básico 209
  - 8-1.1 *Introducción, 209*
  - 8-1.2 *Voltaje en modo común, 211*
- 8-2 Comparación entre amplificadores diferenciales y amplificadores de una sola entrada 212
  - 8-2.1 *Medición con amplificador de entrada única, 212*
  - 8-2.2 *Medición con un amplificador diferencial, 213*
- 8-3 Mejoras en el amplificador diferencial básico 214
  - 8-3.1 *Incremento de la resistencia de entrada, 214*
  - 8-3.2 *Ganancia ajustable, 214*
- 8-4 Amplificador de instrumentación 216
  - 8-4.1 *Operación del circuito, 216*
  - 8-4.2 *Voltaje referencial de salida, 218*

- 8-5 Detección y medición con el amplificador de instrumentación 220
  - 8-5.1 *Terminal sensora, 220*
  - 8-5.2 *Mediciones de voltaje diferencial, 221*
  - 8-5.3 *Convertidor de voltaje diferencial a corriente, 223*
- 8-6 Amplificador básico de puente 224
  - 8-6.1 *Introducción, 224*
  - 8-6.2 *Operación del circuito básico de puente, 225*
  - 8-6.3 *Medición de temperatura con un circuito puente, 226*
  - 8-6.4 *Amplificador de puente y computadoras, 229*
- 8-7 Aumento de flexibilidad al amplificador de puente 230
  - 8-7.1 *Transductores conectados a tierra, 230*
  - 8-7.2 *Transductores de alta corriente, 230*
- 8-8 Sensor de deformaciones y medición de pequeños cambios de resistencia 231
  - 8-8.1 *Introducción al sensor de deformaciones, 231*
  - 8-8.2 *Material de los sensores de deformación, 232*
  - 8-8.3 *Utilización de información obtenida con el sensor de deformación, 233*
  - 8-8.4 *Montaje de los sensores de deformación, 234*
  - 8-8.5 *Cambios de resistencia del sensor de deformación, 234*
- 8-9 Medición de pequeños cambios de resistencia 234
  - 8-9.1 *Necesidad de un puente de resistencia, 234*
  - 8-9.2 *Puente básico de resistencia, 234*
  - 8-9.3 *Efectos térmicos en el balance del puente, 236*
- 8-10 Balanceo de un puente de sensores de deformación 236
  - 8-10.1 *Técnica obvia, 237*
  - 8-10.2 *Una técnica mejor, 238*
- 8-11 Aumento en la salida del puente de detectores de deformación 239
- 8-12 Una aplicación práctica del detector de deformaciones 241
- 8-13 Medición de presión, fuerza y peso 242
  - Ejercicios de laboratorio 243
  - Problemas 244

## 9

### **FUNCIONAMIENTO PARA CORRIENTE CONTINUA: POLARIZACION, DESVIACIONES Y DERIVA**

- Objetivos de aprendizaje 247
- 9-0 Introducción 248
- 9-1 Corrientes de polarización de entrada 249
- 9-2 Desviación de corriente de entrada 251
- 9-3 Efectos de las corrientes de polarización en el voltaje de salida 252
  - 9-3.1 *Simplificación, 252*
  - 9-3.2 *Efecto de una corriente de polarización en entrada (-), 252*
  - 9-3.3 *Efecto de la corriente de polarización de entrada (+), 254*
- 9-4 Efecto de la desviación de corriente en el voltaje de salida 255
  - 9-4.1 *Seguidor de voltaje compensado por corriente, 255*
  - 9-4.2 *Otros amplificadores compensados por corriente, 256*
  - 9-4.3 *Resumen sobre la compensación de la corriente de polarización, 254*
- 9-5 Desviación del voltaje de entrada 255
  - 9-5.1 *Definición y modelo, 257*
  - 9-5.2 *Efecto de la desviación del voltaje de entrada en el voltaje de salida, 258*
  - 9-5.3 *Medición de la desviación del voltaje de entrada, 258*
- 9-6 Desviación del voltaje de entrada para el circuito sumador 260
  - 9-6.1 *Comparación de la ganancia de señal y de la desviación de voltaje, 260*
  - 9-6.2 *Cómo no eliminar los efectos de la desviación de voltaje, 262*
- 9-7 Anulación del efecto de la desviación de voltaje y las corrientes de polarización 262
  - 9-7.1 *Diseño o análisis de secuencia, 262*
  - 9-7.2 *Circuitos para la anulación de la desviación de voltaje, 262*
  - 9-7.3 *Procedimiento para la anulación del voltaje de salida, 263*
- 9-8 Deriva 264
- 9-9 Medición de la desviación de voltaje y las corrientes de polarización, 266
  - Ejercicios de laboratorio 268
  - Problemas 268

<b>10</b>	<b>FUNCIONAMIENTO EN CA: ANCHO DE BANDA, VELOCIDAD DE RESPUESTA, RUIDO Y COMPENSACION DE FRECUENCIA</b>	<b>270</b>
	Objetivos de aprendizaje	270
10-0	Introducción	271
10-1	Respuesta en frecuencia del amplificador operacional	271
	10-1.1 Compensación interna de frecuencia,	271
	10-1.2 Curva de respuesta en frecuencia,	272
	10-1.3 Ancho de banda con ganancia unitaria,	272
	10-1.4 Tiempo de crecimiento,	275
10-2	Ganancia del amplificador y respuesta en frecuencia	275
	10-2.1 Efecto de la ganancia en lazo abierto sobre la ganancia en lazo cerrado de un amplificador para la operación en cd,	275
	10-2.2 Ancho de banda para pequeña señal; límites de alta y baja frecuencia,	278
	10-2.3 Medición de la respuesta en frecuencia,	278
	10-2.4 Ancho de banda de amplificadores inversores y no inversores,	279
	10-2.5 Obtención del ancho de banda por el método gráfico,	280
10-3	Velocidad de respuesta y voltaje de salida	281
	10-3.1 Definición de la velocidad de respuesta,	281
	10-3.2 Causa de la limitación en la velocidad de respuesta,	282
	10-3.3 Límite de la velocidad de respuesta para ondas senoidales,	283
	10-3.4 Simplificación de la velocidad de respuesta,	285
10-4	Ruido en el voltaje de salida	286
	10-4.1 Introducción,	286
	10-4.2 Ruido en los circuitos de amplificadores operacionales,	286
	10-4.3 Ganancia de ruido,	286
	10-4.4 Ruido en el sumador inversor,	286
	10-4.5 Resumen,	288
10-5	Compensación externa de frecuencia	288
	10-5.1 Necesidad de compensación externa de frecuencia,	288
	10-5.2 Compensación con un solo capacitor,	289
	10-5.3 Compensación de frecuencia con prealimentación,	290
	Ejercicios de laboratorio	291
	Problemas	292

# 11 FILTROS ACTIVOS 294

- Objetivos de aprendizaje 294
- 11-0 Introducción 295
- 11-1 Filtro básico pasabajas 297
  - 11-1.1 *Introducción, 297*
  - 11-1.2 *Diseño del filtro, 298*
  - 11-1.3 *Respuesta del filtro, 299*
- 11-2 Introducción al filtro Butterworth 300
- 11-3 Filtro Butterworth de  $-40$  db/década, 301
  - 11-3.1 *Procedimiento simplificado de diseño, 301*
  - 11-3.2 *Respuesta del filtro, 303*
- 11-4 Filtro Butterworth pasabajas de  $-60$  db/década 304
  - 11-4.1 *Procedimiento de diseño simplificado, 304*
  - 11-4.2 *Respuesta del filtro, 306*
- 11-5 Filtros Butterworth pasa-altas 307
  - 11-5.1 *Introducción, 307*
  - 11-5.2 *Filtro de 20 dB/década, 308*
  - 11-5.3 *Filtro de 40 dB/década, 310*
  - 11-5.4 *Filtro de 60 dB/década, 312*
  - 11-5.5 *Comparación de las magnitudes y ángulos de fase, 314*
- 11-6 Introducción a los filtros pasa-banda 315
  - 11-6.1 *Respuesta en frecuencia, 315*
  - 11-6.2 *Ancho de banda, 316*
  - 11-6.3 *Factor de calidad, 317*
  - 11-6.4 *Filtros de banda angosta y de banda ancha, 317*
- 11-7 Filtro básico de banda ancha 318
  - 11-7.1 *En cascada, 318*
  - 11-7.2 *Circuito del filtro de banda ancha, 318*
  - 11-7.3 *Respuesta en frecuencia, 318*
- 11-8 Filtros pasa-banda de banda angosta 320
  - 11-8.1 *Circuito del filtro de banda angosta, 320*
  - 11-8.2 *Funcionamiento, 321*
  - 11-8.3 *Filtro de octava para ecualizador estéreo, 321*
- 11-9 Filtros de muesca, 322
  - 11-9.1 *Introducción, 322*
  - 11-9.2 *Teoría de los filtros de muesca, 323*
- 11-10 Filtro de muesca de 120 Hz 324

- 11-10.1 Necesidad de un filtro de muesca, 324
- 11-10.2 Planteamiento del problema, 324
- 11-10.3 Procedimiento para construir un filtro de muesca, 324
- 11-10.4 Componentes del filtro pasa banda, 325
- 11-10.5 Montaje final, 325
- Ejercicios de laboratorio 326
- Problemas 330

## **12 MODULACION, DEMODULACION Y CAMBIO DE FRECUENCIA CON EL MULTIPLICADOR**

332

- Objetivos de aprendizaje 332
- 12-0 Introducción 333
- 12-1 Multiplicación de voltajes de cd 333
  - 12-1.1 Factor de escala del multiplicador, 333
  - 12-1.2 Multiplicadores por cuadrantes, 334
  - 12-1.3 Calibración del multiplicador, 336
- 12-2 Elevación al cuadrado de un número o de un voltaje de cd 337
- 12-3 Duplicación de frecuencia 338
  - 12-3.1 Principio del duplicador de frecuencia, 338
  - 12-3.2 Elevación al cuadrado de un voltaje senoidal, 339
- 12-4 Detección el ángulo de fase 340
  - 12-4.1 Teoría básica, 340
  - 12-4.2 Medidor del ángulo de fase, 343
  - 12-4.3 Angulos de fase mayores que  $\pm 90^\circ$ , 343
- 12-5 Introducción a la modulación de amplitud 344
  - 12-5.1 Necesidad de la amplitud modulada, 344
  - 12-5.2 Definición de la modulación de amplitud 344
  - 12-5.3 El multiplicador usado como modulador, 346
  - 12-5.4 Matemáticas del modulador balanceado, 346
  - 12-5.5 Suma y diferencia de frecuencias, 347
  - 12-5.6 Frecuencias y bandas laterales 349
- 12-6 Amplitud modulada estándar 350
  - 12-6.1 Circuito modulador de amplitud 350
  - 12-6.2 Espectro de frecuencias del modulador estándar de AM, 353
  - 12-6.3 Comparación entre moduladores estándar de AM y los balanceados 353

- 12-7 Demodulación de un voltaje en amplitud modulada 355
- 12-8 Demodulación de un voltaje modulado balanceado 355
- 12-9 Modulación y demodulación de banda lateral única 355
- 12-10 Corrimiento de frecuencia 358
- 12-11 Divisor analógico 359
- 12-12 Extractor de raíz cuadrada 361
- 12-13 Receptor universal de amplitud modulada 362
  - 12-13.1 Sintonizador y mezclador, 362
  - 12-13.2 Amplificador de frecuencia intermedia 364
  - 12-13.3 Proceso de detección, 364
  - 12-13.4 Receptor universal de AM, 364
- Ejercicios de laboratorio 365
- Problemas 365

## **13** CIRCUITOS INTEGRADOS TEMPORIZADORES 367

- Objetivos de aprendizaje 367
- 13-0 Introducción 368
- 13-1 Modos de operación del temporizador 555 368
- 13-2 Terminales del 555 370
  - 13-2.1 Encapsulado y terminales de alimentación de potencia, 370
  - 13-2.2 Terminal de salida, 370
  - 13-2.3 Terminal de restablecimiento, 371
  - 13-2.4 Terminal de descarga, 372
  - 13-2.5 Terminal de voltaje de control, 373
  - 13-2.6 Terminales de disparo y de umbral, 373
  - 13-2.7 Retardos en el tiempo de encendido, 375
- 13-3 Operación en oscilación libre o estable 376
  - 13-3.1 Operación del circuito, 376
  - 13-3.2 Frecuencia de oscilación, 377
  - 13-3.3 Ciclo de trabajo, 379
  - 13-3.4 Ampliación del ciclo de trabajo, 380
- 13-4 Aplicaciones del temporizador 555 como multivibrador estable 381
  - 13-4.1 Oscilador con barrido de tonos, 381
  - 13-4.2 Desplazador de frecuencia controlado por voltaje, 382
- 13-5 Operación monoestable o de un disparo 385

- 13-5.1 *Introducción, 385*
- 13-5.2 *Circuito de pulso de entrada, 388*
- 13-6 **Aplicaciones del temporizador 555 como multivibrador de un disparo 388**
  - 13-6.1 *Control de nivel de agua, 388*
  - 13-6.2 *Interruptor de tacto 388*
  - 13-6.3 *Divisor de frecuencia, 389*
  - 13-6.4 *Detector de pulso perdido, 390*
- 13-7 **Introducción a los contadores de tiempo 392**
- 13-8 **Temporizador/contador programable XR 2240 392**
  - 13-8.1 *Descripción del circuito, 392*
  - 13-8.2 *Operación del contador, 393*
  - 13-8.3 *Programación de las salidas, 395*
- 13-9 **Aplicaciones del temporizador/contador 397**
  - 13-9.1 *Aplicaciones del temporizador, 397*
  - 13-9.2 *Oscilador libre, salidas sincronizadas, 398*
  - 13-9.3 *Generador de señales con patrón binario, 399*
  - 13-9.4 *Sintetizador de frecuencias, 400*
- 13-10 **Temporizador programable por interruptores 402**
  - 13-10.1 *Intervalos de tiempo, 402*
  - 13-10.2 *Operación del circuito, 402*
- Ejercicios de laboratorio 404
- Problemas 404

## **14 CONVERTIDORES DIGITAL A ANALOGICO Y ANALOGICO A DIGITAL 406**

- Objetivos de aprendizaje 406
- 14-0 **Introducción 407**
- 14-1 **Características del convertidor digital a analógico 407**
  - 14-1.1 *Resolución, 408*
  - 14-1.2 *Ecuación de entrada-salida, 410*
- 14-2 **Características del convertidor analógico a digital 411**
  - 14-2.1 *Ecuación de entrada-salida, 411*
  - 14-2.2 *Error de cuantificación, 413*
- 14-3 **Proceso de conversión digital a analógico 413**
  - 14-3.1 *Diagrama de bloques, 413*
  - 14-3.2 *Red de escalera R-2R, 414*



- 14-3.3 *Corrientes de escalera*, 416
    - 14-3.4 *Ecuación de la escalera*, 416
  - 14-4 Salida de voltaje del convertidor digital a analógico 417
  - 14-5 Convertidor digital a analógico multiplicador 419
  - 14-6 Convertidor digital a analógico de 8 bits; el DAC-08 420
    - 14-6.1 *Terminales de alimentación de corriente*, 420
    - 14-6.2 *Terminal de referencia (multiplicadora)*, 420
    - 14-6.3 *Terminales de entrada digital*, 420
    - 14-6.4 *Corrientes de salida analógica*, 422
    - 14-6.5 *Voltaje de salida unipolar*, 423
    - 14-6.6 *Voltaje de salida analógica bipolar*, 424
  - 14-7 Compatibilidad con los microprocesadores 426
    - 14-7.1 *Principios de interconexión*, 426
    - 14-7.2 *Registros (buffer) de memoria*, 426
    - 14-7.3 *El proceso de selección*, 427
  - 14-8 Convertidor digital a analógico compatible con microprocesadores AD558 428
    - 14-8.1 *Introducción*, 428
    - 14-8.2 *Fuente de alimentación*, 428
    - 14-8.3 *Entradas digitales*, 428
    - 14-8.4 *Circuitería lógica*, 430
    - 14-8.5 *Salida analógica*, 430
    - 14-8.6 *Circuito de prueba dinámica*, 430
  - 14-9 Convertidores integradores analógico a digital 432
    - 14-9.1 *Tipos de convertidores analógico a digital*, 432
    - 14-9.2 *Principios de operación*, 432
    - 14-9.3 *Fase integradora de señal, T1*, 434
    - 14-9.4 *Fase integradora de referencia, T2*, 434
    - 14-9.5 *La conversión*, 435
    - 14-9.6 *Auto-cero*, 436
    - 14-9.7 *Resumen*, 436
  - 14-10 Convertidor analógico a digital por aproximación sucesiva 436
    - 14-10.1 *Operación del circuito*, 437
    - 14-10.2 *Analogía por aproximación sucesiva*, 438
    - 14-10.3 *Tiempo de conversión*, 438
  - 14-11 Convertidores analógico a digital para microprocesadores 438

- 14-12 Convertidores analógico a digital AD670 compatible con microprocesadores 441
  - 14-12.1 Terminales de voltaje de entrada analógica, 441
  - 14-12.2 Terminales de salida digital, 441
  - 14-12.3 Terminal de entrada de opción, 441
  - 14-12.4 Terminal de salida opcional, 443
  - 14-12.5 Terminales de control para el microprocesador, 443
- 14-13 Cómo probar el AD670 445
- 14-14 Convertidores flash o paralelo 445
  - 14-14.1 Principios de operación, 445
  - 14-14.2 Tiempo de conversión, 445
- 14-15 Respuesta en frecuencia de los convertidores analógico a digital 447
  - 14-15.1 Error de apertura, 447
  - 14-15.2 Amplificador muestreador y retenedor, 447
- Ejercicios de laboratorio 450
- Problemas 452

## 15 FUENTES DE ALIMENTACION

454

- Objetivos de aprendizaje 454
- 15-0 Introducción 455
- 15-1 Introducción fuentes de alimentación no reguladas 456
  - 15-1.1 Transformador de alimentación, 456
  - 15-1.2 Diodos rectificadores, 457
  - 15-1.3 Fuentes positivas contra fuentes negativas, 457
  - 15-1.4 Capacitor de filtrado, 458
  - 15-1.5 Carga, 458
- 15-2 Regulación del voltaje de cd 459
  - 15-2.1 Variaciones en el voltaje de carga, 459
  - 15-2.2 Curva de regulación del voltaje de cd, 460
  - 15-2.3 Modelo en cd para una fuente de alimentación, 460
  - 15-2.4 Porcentaje de regulación, 463
- 15-3 Voltaje de rizo de ca 463
  - 15-3.1 Predicción del voltaje de rizo de ca, 463
  - 15-3.2 Porcentaje y frecuencia del voltaje de rizo 466
  - 15-3.3 Control del voltaje de rizo, 466

- 15-4 Procedimiento para diseñar una fuente no regulada con rectificador de puente de onda completa, 467
  - 15-4.1 *Especificaciones generales de diseño*, 467
- 15-5 Fuentes de poder no regulada bipolar y de dos valores 471
  - 15-5.1 *Fuentes de alimentación bipolar o positiva y negativa* 471
  - 15-5.2 *Fuentes de alimentación de dos valores*, 472
- 15-6 Necesidad de la regulación de voltaje 472
- 15-7 Historia de los reguladores de voltaje lineales 473
  - 15-7.1 *La primera generación*, 473
  - 15-7.2 *La segunda generación*, 473
  - 15-7.3 *La tercera generación*, 473
- 15-8 Reguladores de voltaje lineales en circuitos integrados 474
  - 15-8.1 *Clasificación*, 474
  - 15-8.2 *Características comunes*, 474
  - 15-8.3 *Circuitos de autoprotección*, 476
  - 15-8.4 *Protección externa*, 476
  - 15-8.5 *Reducción del rizo*, 476
- 15-9 Fuente de alimentación para circuitos lógicos 476
  - 15-9.1 *Circuito regulador*, 476
  - 15-9.2 *Fuente no regulada*, 477
- 15-10 Fuente de alimentación de  $\pm 15$  V para aplicaciones lineales 477
  - 15-10.1 *Regulador de  $\pm 15$  V para alta corriente*, 477
  - 15-10.2 *Regulador  $\pm 15$  V para baja corriente*, 479
  - 15-10.3 *Fuente no regulada para reguladores  $\pm 15$  V*, 479
- 15-11 Regulador de voltaje positivo ajustable de tres terminales (el LM317HV) y regulador de voltaje negativo (el LM337HV) 479
- 15-12 Voltaje de carga ajustable 480
  - 15-12.1 *Ajuste del voltaje regulado positivo de salida*, 480
  - 15-12.2 *Características del LM317HV*, 480
  - 15-12.3 *Regulador de voltaje negativo ajustable*, 482
  - 15-12.4 *Protección externa*, 482
- 15-13 Regulador de voltaje ajustable tipo laboratorio 483
  - Ejercicios de laboratorio 484
  - Problemas 484

<b>RESPUESTAS A PROBLEMAS SELECTOS DE NUMERO IMPAR</b>	<b>486</b>
<b>Apéndice 1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL CON FRECUENCIA COMPENSADA</b>	<b>493</b>
<b>Apéndice 2 AMPLIFICADOR OPERACIONAL LM301A</b>	<b>503</b>
<b>Apéndice 3 CAPACITOR DE VOLTAJE LM311</b>	<b>510</b>
<b>Apéndice 4 TEMPORIZADOR 555</b>	<b>518</b>
<b>Apéndice 5 REGULADOR AJUSTABLE DE 3 TERMINALES LM117</b>	<b>521</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>527</b>
<b>INDICE ANALITICO</b>	<b>529</b>