

# Contenido

## PREFACIO

xxvii

## 1

### INTRODUCCIÓN A LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

1

Objetivos de aprendizaje 1

1-0 Introducción 2

1-1 ¿Todavía tienen uso los circuitos analógicos? 2

*1-1.1 Sistemas analógicos y digitales, 2*

*1-1.2 Desarrollo de los amplificadores operacionales, 3*

*1-1.3 Los amplificadores operacionales se especializan, 3*

1-2 Amplificador operacional de propósito general 741 4

*1-2.1 Símbolo de circuito y terminales, 4*

*1-2.2 Circuitos internos simplificados en un amplificador operacional para propósito general, 5*

1-2.3	<i>Etapa de entrada: amplificador diferencial, 6</i>
1-2.4	<i>Etapa intermedia: desplazador de nivel, 6</i>
1-2.5	<i>Etapa de salida: en contrafase, 6</i>
1-3	<b>Encapsulado y terminales 6</b>
1-3.1	<i>Encapsulado, 6</i>
1-3.2	<i>Combinación de símbolo y terminales, 7</i>
1-4	<b>Cómo identificar o especificar un amplificador operacional 8</b>
1-4.1	<i>El código de identificación, 8</i>
1-4.2	<i>Ejemplo de especificación de números para un pedido, 10</i>
1-5	<b>Fuentes secundarias 10</b>
1-6	<b>Conexión de circuitos de amplificadores operacionales 10</b>
1-6.1	<i>La fuente de alimentación, 10</i>
1-6.2	<i>Sugerencias para la conexión de amplificadores operacionales, 11</i>
	<b>Problemas 12</b>

## 2

### **PRIMERAS EXPERIENCIAS CON UN AMPLIFICADOR OPERACIONAL 13**

	<b>Objetivos de aprendizaje 13</b>
2-0	<b>Introducción 14</b>
2-1	<b>Terminales de los amplificadores operacionales 14</b>
2-1.1	<i>Terminales de la fuente de alimentación, 15</i>
2-1.2	<i>Terminales de salida, 16</i>
2-1.3	<i>Terminales de entrada, 16</i>
2-1.4	<i>Corrientes de polarización de entrada y voltaje de desvío, 17</i>
2-2	<b>Ganancia de voltaje en lazo abierto 18</b>
2-2.1	<i>Definición, 18</i>
2-2.2	<i>Voltaje diferencial de entrada, <math>E_d</math>, 18</i>
2-2.3	<i>Conclusiones, 18</i>
2-3	<b>Detectores de cruce por cero 20</b>
2-3.1	<i>Detector no inversor de cruce por cero, 20</i>
2-3.2	<i>Detector inversor por cruce de cero, 21</i>
2-4	<b>Detectores de nivel de voltaje positivo y negativo 21</b>
2-4.1	<i>Detectores de nivel positivo, 21</i>
2-4.2	<i>Detectores de nivel negativo, 21</i>
2-5	<b>Aplicaciones comunes de los detectores de nivel de voltaje 21</b>
2-5.1	<i>Voltaje de referencia ajustable, 21</i>

- 2-5.2 *Interruptor activado por sonido, 22*
- 2-5.3 *Voltímetro de columna luminosa, 24*
- 2-5.4 *Detector de humo, 26*
- 2-6 Referencias de voltaje integradas 27
  - 2-6.1 *Introducción, 27*
  - 2-6.2 *REF-02, 27*
  - 2-6.3 *Aplicaciones del detector de nivel de voltaje REF-02, 27*
- 2-7 Procesamiento de señales con detectores de nivel de voltaje 29
  - 2-7.1 *Introducción, 29*
  - 2-7.2 *Convertidor de onda senoidal a cuadrada, 29*
- 2-8 Interface de una computadora con detectores de nivel de voltaje 29
  - 2-8.1 *Introducción, 29*
  - 2-8.2 *Comparador de voltaje cuádruple LM 339, 30*
  - 2-8.3 *Modulador de ancho de pulso no inversor, 31*
  - 2-8.4 *Moduladores de ancho de pulso inversores y no inversores, 34*
- 2-9 Interconexión entre un modulador de ancho de pulso y un microcontrolador 36
- 2-10 Simulación del circuito de un comparador hecho con un amplificador operacional 36
  - 2-10.1 *Introducción, 36*
  - 2-10.2 *Cómo crear, inicializar y simular un circuito, 37*
- Ejercicios de laboratorio 40
- Problemas 41

### 3

## AMPLIFICADORES INVERSORES Y NO INVERSORES

44

- Objetivos de aprendizaje 44
- 3-0 Introducción 45
- 3-1 Amplificador inversor 45
  - 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, 47*
  - 3-1.4 *Voltaje negativo aplicado a la entrada inversora, 48*
  - 3-1.5 *Voltaje aplicado a la entrada inversora, 49*
  - 3-1.6 *Procedimiento de diseño, 51*
  - 3-1.7 *Procedimiento de análisis, 51*
- 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	<i>Nivel de cd para desviar una señal de CA, 53</i>
3-3	<b>Amplificador multicanal 55</b>
3-3.1	<i>Por qué es necesario un amplificador multicanal, 55</i>
3-3.2	<i>Análisis del circuito, 55</i>
3-3.3	<i>Procedimiento de diseño, 56</i>
3-4	<b>Amplificador inversor de promedio 56</b>
3-5	<b>Seguidor de voltaje 57</b>
3-5.1	<i>Introducción, 57</i>
3-5.2	<i>En qué se emplea el seguidor de voltaje, 59</i>
3-6	<b>El amplificador no inversor 60</b>
3-6.1	<i>Análisis del circuito, 60</i>
3-6.2	<i>Procedimiento de diseño, 62</i>
3-7	<b>La fuente de voltaje ideal 64</b>
3-7.1	<i>Definición y aclaración, 64</i>
3-7.2	<i>La fuente de voltaje ideal no reconocida, 64</i>
3-7.3	<i>Fuente de voltaje ideal práctica, 64</i>
3-7.4	<i>Fuentes de voltaje exactas, 66</i>
3-8	<b>Sumador no inversor 67</b>
3-9	<b>Operación con fuente de alimentación única 67</b>
3-10	<b>Amplificadores diferenciales 68</b>
3-10.1	<i>El restador, 69</i>
3-10.2	<i>Amplificador inversor y no inversor, 70</i>
3-11	<b>Servoamplificador 71</b>
3-11.1	<i>Introducción, 71</i>
3-11.2	<i>Análisis del circuito servoamplificador, 71</i>
3-11.3	<i>Acción de retardo, 72</i>
3-12	<b>Cómo diseñar un circuito acondicionador de señal 73</b>
3-13	<b>Simulación en Pspice 77</b>
3-13.1	<i>Amplificador inversor: entrada de CD, 78</i>
3-13.2	<i>Amplificador inversor: entrada de CA, 78</i>
3-13.3	<i>Sumador inversor, 80</i>
3-13.4	<i>Amplificador no inversor, 81</i>
	<b>Ejercicios de laboratorio 82</b>
	<b>Problemas 83</b>

**4****COMPARADORES Y CIRCUITOS CONTROLADORES**

86

- Objetivos de aprendizaje 86
- 4-0 Introducción 87
- 4-1 Efecto del ruido en los circuitos comparadores 87
- 4-2 Retroalimentación positiva 89
  - 4-2.1 *Introducción, 89*
  - 4-2.2 *Voltaje de umbral superior, 90*
  - 4-2.3 *Voltaje de umbral inferior, 90*
- 4-3 Detector de cruce de cero con histéresis 92
  - 4-3.1 *Definición de histéresis, 92*
  - 4-3.2 *Detector de cruce de cero con histéresis como un elemento de memoria, 93*
- 4-4 Detectores de nivel de voltaje con histéresis 93
  - 4-4.1 *Introducción, 93*
  - 4-4.2 *Detector no inversor de nivel de voltaje con histéresis, 94*
  - 4-4.3 *Detector inversor de nivel de voltaje con histéresis, 96*
- 4-5 Detector de nivel de voltaje con ajuste independiente de histéresis y de voltaje central 98
  - 4-5.1 *Introducción, 98*
  - 4-5.2 *Circuito de control de un cargador de batería, 100*
- 4-6 Principios del control de apagado y encendido (on-off) 101
  - 4-6.1 *Comparadores en el control de procesos, 101*
  - 4-6.2 *El termostato como comparador, 102*
  - 4-6.3 *Directrices para la selección y diseño, 102*
- 4-7 Un controlador con dos puntos de ajuste independientes 102
  - 4-7.1 *Principio de funcionamiento, 102*
  - 4-7.2 *Características de entrada y salida de un controlador con dos puntos de ajuste independientes, 102*
  - 4-7.3 *Selección de los voltajes del punto de ajuste, 103*
  - 4-7.4 *Circuito para el ajuste del voltaje de punto de ajuste independiente, 104*
  - 4-7.5 *Precauciones, 106*
- 4-8 CI Comparador de precisión, 111/311 106
  - 4-8.1 *Introducción, 106*
  - 4-8.2 *Operación de la terminal de salida, 106*
  - 4-8.3 *Operación de la terminal de habilitación, 106*
- 4-9 Una aplicación biomédica 108

- 4-10 Detector de ventana 110
  - 4-10.1 *Introducción, 110*
  - 4-10.2 *Funcionamiento del circuito, 110*
- 4-11 Retardo de propagación 110
  - 4-11.1 *Definición, 110*
  - 4-11.2 *Medición del retardo de propagación, 112*
- 4-12 Empleo de PSpice para modelar y simular circuitos comparadores 113
  - 4-12.1 *Simulación del detector de cruce de cero con histéresis, 113*
  - 4-12.2 *Detector de ventana, 115*
- Ejercicios de laboratorio 117
- Problemas 118

## 5

### ALGUNAS APLICACIONES DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

120

- Objetivos de aprendizaje 120
- 5-0 Introducción 121
- 5-1 Voltímetro de cd de alta resistencia 121
  - 5-1.1 *Circuito básico de medición de voltaje, 121*
  - 5-1.2 *Cambio de escala en el voltímetro, 122*
- 5-2 Voltímetro universal de alta resistencia 123
  - 5-2.1 *Funcionamiento del circuito, 123*
  - 5-2.2 *Procedimiento de diseño, 124*
- 5-3 Convertidores de voltaje a corriente: cargas flotantes 125
  - 5-3.1 *Control de voltaje de la corriente de carga, 125*
  - 5-3.2 *Probador de diodo Zener, 125*
  - 5-3.3 *Probador de diodos, 125*
- 5-4 Probador de diodo emisor de luz 127
- 5-5 Alimentación de corriente constante a una carga conectada a tierra 128
  - 5-5.1 *Convertidor de voltaje diferencial a corriente, 128*
  - 5-5.2 *Fuente de corriente constante alta con carga conectada a tierra, 129*
  - 5-5.3 *Conexión de la salida de un microcontrolador con un transmisor de 4 a 20 mA, 130*
  - 5-5.4 *Fuente de corriente de 4 a 20 mA con control digital, 131*

- 5-6 Medición de corriente de cortocircuito y conversión de corriente a voltaje 132
  - 5-6.1 *Introducción, 132*
  - 5-6.2 *Uso del amplificador operacional para medir corriente de cortocircuito, 132*
- 5-7 Medición de la corriente de fotodetectores 134
  - 5-7.1 *Celda fotoconductora, 134*
  - 5-7.2 *Fotodiodo, 135*
- 5-8 Amplificador de corriente 135
- 5-9 Mediciones de energía en celdas solares 136
  - 5-9.1 *Introducción a los problemas, 136*
  - 5-9.2 *Conversión de la corriente de cortocircuito de una celda solar a voltaje, 137*
  - 5-9.3 *Circuito divisor de corriente (convertidor de corriente a corriente), 138*
- 5-10 Desfasador 139
  - 5-10.1 *Introducción, 139*
  - 5-10.2 *Circuito desfasador, 140*
- 5-11 Convertidores de temperatura a voltaje 141
  - 5-11.1 *El transductor de temperatura AD590, 141*
  - 5-11.2 *Termómetro Celsius, 142*
  - 5-11.3 *Termómetro Fahrenheit, 142*
- 5-12 Simulación en PSpice 142
  - Ejercicios de laboratorio 144
  - Problemas 145

## 6

### GENERADORES DE SEÑAL

147

- Objetivos de aprendizaje 147
- 6-0 Introducción 148
- 6-1 Multivibrador astable 148
  - 6-1.1 *Acción del multivibrador, 148*
  - 6-1.2 *Frecuencia de oscilación, 150*
- 6-2 Multivibrador monoestable 152
  - 6-2.1 *Introducción, 152*
  - 6-2.2 *Estado estable, 152*
  - 6-2.3 *Transición al estado de temporización, 153*

6-2.4	<i>Estado de temporización, 153</i>
6-2.5	<i>Duración del pulso de salida, 155</i>
6-2.6	<i>Tiempo de recuperación, 155</i>
6-3	<b>Generadores de onda triangular 156</b>
6-3.1	<i>Teoría de su funcionamiento, 156</i>
6-3.2	<i>Frecuencia de operación, 158</i>
6-3.3	<i>Generador unipolar de onda triangular, 159</i>
6-4	<b>Generador de onda diente de sierra 161</b>
6-4.1	<i>Funcionamiento del circuito, 161</i>
6-4.2	<i>Análisis de la forma de la onda diente de sierra, 161</i>
6-4.3	<i>Procedimiento de diseño, 161</i>
6-4.4	<i>Convertidor de voltaje a frecuencia, 163</i>
6-4.5	<i>Modulación de frecuencia y manipulación por desplazamiento de frecuencia, 163</i>
6-4.6	<i>Desventajas, 164</i>
6-5	<b>Modulador/demodulador balanceado, el AD630 166</b>
6-5.1	<i>Introducción, 166</i>
6-5.2	<i>Terminales de entrada y salida, 166</i>
6-5.3	<i>Formas de onda de entrada y salida, 166</i>
6-6	<b>Generador de ondas triangular y cuadrada de precisión 166</b>
6-6.1	<i>Funcionamiento del circuito, 166</i>
6-6.2	<i>Frecuencia de oscilación, 168</i>
6-7	<b>Estudio de la generación de una onda senoidal 168</b>
6-8	<b>Generador de funciones trigonométricas universal, el AD639 169</b>
6-8.1	<i>Introducción, 169</i>
6-8.2	<i>Operación de la función senoidal, 169</i>
6-9	<b>Generador de onda senoidal de precisión 171</b>
6-9.1	<i>Funcionamiento del circuito, 171</i>
6-9.2	<i>Frecuencia de oscilación, 174</i>
6-9.3	<i>Generador de formas de onda de alta frecuencia, 174</i>
6-10	<b>Simulación en PSpice de los circuitos generadores de señales 175</b>
6-10.1	<i>Multivibrador astable, 175</i>
6-10.2	<i>Multivibrador monoestable, 177</i>
6-10.3	<i>Generador de onda triangular bipolar, 178</i>
6-10.4	<i>Generador de onda triangular unipolar, 179</i>
	<b>Ejercicios de laboratorio 181</b>
	<b>Problemas 182</b>

**7****AMPLIFICADORES OPERACIONALES CON DIODOS****184**

- Objetivos de aprendizaje 184
- 7-0 Introducción a los rectificadores de precisión 185
- 7-1 Rectificadores de media onda 186
  - 7-1.1 *Introducción, 186*
  - 7-1.2 *Rectificador inversor de media onda lineal con salida positiva, 187*
  - 7-1.3 *Rectificador inversor lineal de media onda con salida negativa, 189*
  - 7-1.4 *Separador de polaridad de señal, 190*
- 7-2 Rectificadores de precisión: circuito de valor absoluto 191
  - 7-2.1 *Introducción, 191*
  - 7-2.2 *Tipos de rectificadores de onda completa de precisión, 192*
- 7-3 Detectores de picos 195
  - 7-3.1 *Seguidor y retenedor de pico positivo, 195*
  - 7-3.2 *Seguidor y retenedor de pico negativo, 197*
- 7-4 Convertidor de ca a cd 197
  - 7-4.1 *Conversión de ca a cd o circuito MAV, 197*
  - 7-4.2 *Rectificador de precisión con entradas sumadoras, 199*
  - 7-4.3 *Convertidor de ca a cd, 200*
- 7-5 Circuitos de zona muerta 200
  - 7-5.1 *Introducción, 200*
  - 7-5.2 *Circuito de zona muerta con salida negativa, 200*
  - 7-5.3 *Circuito de zona muerta con salida positiva, 202*
  - 7-5.4 *Circuito de zona muerta y salida bipolar, 204*
- 7-6 Recortador de precisión 205
- 7-7 Convertidor de onda triangular a onda senoidal 205
- 7-8 Simulación en PSpice de amplificadores operacionales con diodos 206
  - 7-8.1 *Rectificador de media onda lineal, 206*
  - 7-8.2 *Rectificador de onda completa de precisión, 208*
  - 7-8.3 *Amplificador de valor medio absoluto, 210*
- Ejercicios de laboratorio 212
- Problemas 213

**8****AMPLIFICADORES DIFERENCIALES, DE INSTRUMENTACIÓN Y DE PUENTE****214**

- Objetivos de aprendizaje 214

- 8-0    **Introducción 215**
- 8-1    **Amplificador diferencial básico 215**
  - 8-1.1    *Introducción, 215*
  - 8-1.2    *Voltaje en modo común, 217*
- 8-2    **Comparación entre amplificadores diferenciales y amplificadores de una sola entrada 217**
  - 8-2.1    *Medición con amplificador de entrada única, 217*
  - 8-2.2    *Medición con un amplificador diferencial, 218*
- 8-3    **Cómo mejorar el amplificador diferencial básico 219**
  - 8-3.1    *Aumento de la resistencia de entrada, 219*
  - 8-3.2    *Ganancia ajustable, 219*
- 8-4    **Amplificador de instrumentación 222**
  - 8-4.1    *Funcionamiento del circuito, 222*
  - 8-4.2    *Voltaje de salida respecto a una referencia, 224*
- 8-5    **Detección y medición mediante el amplificador de instrumentación 225**
  - 8-5.1    *Terminal de detección, 225*
  - 8-5.2    *Mediciones de voltaje diferencial, 226*
  - 8-5.3    *Convertidor de voltaje diferencial a corriente, 227*
- 8-6    **El amplificador de instrumentación como circuito acondicionador de señal 229**
  - 8-6.1    *Introducción al sensor de deformaciones, 229*
  - 8-6.2    *Material utilizado en el sensor de deformación, 229*
  - 8-6.3    *Cómo se usa la información obtenida mediante el sensor de deformación, 230*
  - 8-6.4    *Montaje de los sensores de deformación, 231*
  - 8-6.5    *Cambios en la resistencia del sensor de deformación, 231*
- 8-7    **Medición de pequeños cambios en la resistencia 231**
  - 8-7.1    *Es necesario utilizar un puente resistivo, 231*
  - 8-7.2    *Puente básico de resistencias, 232*
  - 8-7.3    *Efectos térmicos en el balance del puente, 233*
- 8-8    **Balanceo de un puente de sensores de deformación 234**
  - 8-8.1    *Técnica obvia, 234*
  - 8-8.2    *Una técnica mejor, 234*
- 8-9    **Aumento en la salida del puente de sensores de deformación 235**
- 8-10   **Una aplicación práctica del detector de deformaciones 237**
- 8-11   **Medición de presión, fuerza y peso 239**

- 8-12 Amplificador de puente básico 239
  - 8-12.1 *Introducción, 239*
  - 8-12.2 *Funcionamiento del circuito puente básico, 240*
  - 8-12.3 *Medición de temperatura con un circuito puente, 241*
  - 8-12.4 *Amplificadores de puente y computadoras, 244*
- 8-13 Cómo dar más versatilidad al amplificador de puente 244
  - 8-13.1 *Transductores a tierra, 244*
  - 8-13.2 *Transductores de corriente alta, 244*
- Ejercicios de laboratorio 245
- Problemas 246

## **9                    FUNCIONAMIENTO EN CD: POLARIZACIÓN, DESVÍOS Y DERIVA                    249**

- Objetivos de aprendizaje 249
- 9-0 Introducción 250
- 9-1 Corrientes de polarización de entrada 251
- 9-2 Desvío de las corrientes de entrada 252
- 9-3 Efectos de las corrientes de polarización en el voltaje de salida 253
  - 9-3.1 *Simplificación, 253*
  - 9-3.2 *Efecto de una corriente de polarización en la entrada (-), 253*
  - 9-3.3 *Efecto de la corriente de polarización de la entrada (+), 255*
- 9-4 Efectos de la desviación de corriente en el voltaje de salida 256
  - 9-4.1 *Seguidor de voltaje compensado por corriente, 256*
  - 9-4.2 *Otros amplificadores compensados por corriente, 257*
  - 9-4.3 *Resumen sobre la compensación de la corriente de polarización, 257*
- 9-5 Voltaje de desvío de entrada 258
  - 9-5.1 *Definición y modelo, 258*
  - 9-5.2 *Efecto del voltaje de desvío de entrada en el voltaje de salida, 259*
  - 9-5.3 *Medición del voltaje de desvío de entrada, 259*
- 9-6 Voltaje de desvío de entrada del circuito sumador 261
  - 9-6.1 *Comparación entre la ganancia de señal y la ganancia del voltaje de desvío de entrada, 261*
  - 9-6.2 *Cómo no eliminar los efectos del voltaje de desvío, 262*
- 9-7 Anulación del efecto del voltaje de desvío y de las corrientes de polarización 262
  - 9-7.1 *Diseño o secuencia de análisis, 262*

- 9-7.2 *Circuitos para la anulación del voltaje de desvío de entrada*, 263
- 9-7.3 *Procedimiento para la anulación del voltaje de salida (en caso de ser necesario)*, 264
- 9-8 Deriva 264
- 9-9 Medición del voltaje de desvío y las corrientes de polarización 266
  - Ejercicios de laboratorio 267
  - Problemas 268

## 10

### **FUNCIONAMIENTO EN CA: ANCHO DE BANDA, VELOCIDAD DE RESPUESTA Y RUIDO**

270

- 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 de ganancia unitaria*, 273
  - 10-1.4 *Tiempo de subida*, 274
- 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 en un amplificador que funciona en cd*, 275
  - 10-2.2 *Ancho de banda para pequeña señal y límites de alta y baja frecuencia*, 277
  - 10-2.3 *Medición de la respuesta en frecuencia*, 278
  - 10-2.4 *Ancho de banda de amplificadores inversores y no inversores*, 278
  - 10-2.5 *Determinación del ancho de banda por el método gráfico*, 279
- 10-3 Velocidad de respuesta y voltaje de salida 280
  - 10-3.1 *Definición de la velocidad de respuesta*, 281
  - 10-3.2 *Causa de la limitación en la velocidad de respuesta*, 281
  - 10-3.3 *Límite de la velocidad de respuesta para ondas senoidales*, 281
  - 10-3.4 *Método simplificado para obtener la velocidad de respuesta*, 284
- 10-4 Ruido en el voltaje de salida 285
  - 10-4.1 *Introducción*, 285
  - 10-4.2 *Ruido en los circuitos de los amplificadores operacionales*, 285
  - 10-4.3 *Ganancia de ruido*, 286
  - 10-4.4 *Ruido en el sumador inversor*, 286
  - 10-4.5 *Resumen*, 286
- Ejercicios de laboratorio 286
- Problemas 288

**11****FILTROS ACTIVOS**

289

- Objetivos de aprendizaje 289
- 11-0 Introducción 290
- 11-1 Filtro pasa bajas básico 291
  - 11-1.1 Introducción, 291*
  - 11-1.2 Diseño del filtro, 292*
  - 11-1.3 Respuesta del filtro, 294*
- 11-2 Introducción al filtro Butterworth 294
- 11-3 Filtro Butterworth pasa bajas de  $-40$  db/década 295
  - 11-3.1 Procedimiento simplificado de diseño, 295*
  - 11-3.2 Respuesta del filtro, 297*
- 11-4 Filtro Butterworth pasa bajas de  $-60$ db/década 297
  - 11-4.1 Procedimiento de diseño simplificado, 297*
  - 11-4.2 Respuesta del filtro, 299*
- 11-5 Filtros Butterworth pasa altas 300
  - 11-5.1 Introducción, 300*
  - 11-5.2 Filtro de 20 dB/década, 301*
  - 11-5.3 Filtro de 40 dB/década, 303*
  - 11-5.4 Filtro de 60 dB/década, 304*
  - 11-5.5 Comparación de magnitudes y ángulos de fase, 306*
- 11-6 Introducción a los filtros pasa banda 307
  - 11-6.1 Respuesta a la frecuencia, 307*
  - 11-6.2 Ancho de banda, 308*
  - 11-6.3 Factor de calidad, 309*
  - 11-6.4 Filtros de banda angosta y de banda ancha, 309*
- 11-7 Filtro de banda ancha básico 310
  - 11-7.1 Configuración en cascada, 310*
  - 11-7.2 Circuito del filtro de banda ancha, 310*
  - 11-7.3 Respuesta a la frecuencia, 310*
- 11-8 Filtros pasa banda de banda angosta 311
  - 11-8.1 Circuito del filtro de banda angosta, 312*
  - 11-8.2 Funcionamiento, 312*
  - 11-8.3 Filtro de octavas para ecualizador de estéreo, 313*
- 11-9 Filtros de muesca 314
  - 11-9.1 Introducción, 314*
  - 11-9.2 Teoría de los filtros de muesca, 315*

- 11-10 Filtro de muesca de 120 Hz 315
  - 11-10.1 *Para qué sirve un filtro de muesca, 315*
  - 11-10.2 *Planteamiento del problema, 316*
  - 11-10.3 *Procedimiento para construir un filtro muesca, 316*
  - 11-10.4 *Componentes del filtro pasa banda, 316*
  - 11-10.5 *Montaje final, 317*
- 11-11 Simulación de circuitos de filtros activos con PSpice 317
  - 11-11.1 *Filtro pasa bajas, 318*
  - 11-11.2 *Filtro pasa altas, 320*
  - 11-11.3 *Filtro pasa banda, 321*
- Ejercicios de laboratorio 323
- Problemas 325

## 12

### MODULACIÓN, DEMODULACIÓN Y CAMBIO DE FRECUENCIA POR MEDIO DE UN MULTIPLICADOR

327

- Objetivos de aprendizaje 327
- 12-0 Introducción 328
- 12-1 Multiplicación de voltajes de cd 328
  - 12-1.1 *Factor de escala del multiplicador, 328*
  - 12-1.2 *Los cuadrantes del multiplicador, 329*
- 12-2 Elevación al cuadrado de un número o de voltaje de cd 331
- 12-3 Duplicación de la frecuencia 331
  - 12-3.1 *Principio del duplicador de frecuencia, 331*
  - 12-3.2 *Elevación al cuadrado de una onda senoidal, 332*
- 12-4 Detección del ángulo de fase 334
  - 12-4.1 *Fundamentos teóricos, 334*
  - 12-4.2 *Medidor del ángulo de fase, 336*
  - 12-4.3 *Ángulos de fase superiores a  $\pm 90^\circ$ , 337*
- 12-5 Divisor analógico 337
- 12-6 Cálculo de raíces cuadradas 339
- 12-7 Introducción a la modulación en amplitud 339
  - 12-7.1 *Para qué sirve la modulación en amplitud, 339*
  - 12-7.2 *Definición de modulación en amplitud, 340*
  - 12-7.3 *El multiplicador utilizado como modulador, 340*
  - 12-7.4 *Matemáticas de un modulador balanceado, 340*
  - 12-7.5 *Frecuencias de suma y de diferencia, 342*
  - 12-7.6 *Frecuencias y bandas laterales, 344*

- 12-8 Modulación en amplitud estándar 345
  - 12-8.1 Circuito modulador de amplitud, 345
  - 12-8.2 Espectro de frecuencias de un modulador AM estándar, 348
  - 12-8.3 Comparación entre moduladores AM estándar y moduladores balanceados, 349
- 12-9 Demodulación de un voltaje de AM 349
- 12-10 Demodulación de voltaje de un modulador balanceado 353
- 12-11 Modulación y demodulación de banda lateral única 353
- 12-12 Desplazamiento de frecuencia 353
- 12-13 Receptor de modulación en amplitud universal 355
  - 12-13.1 Sintonización y mezclado, 355
  - 12-13.2 Amplificador de frecuencia intermedia, 357
  - 12-13.3 Procedimiento para la detección, 357
  - 12-13.4 Receptor universal de AM, 357
- Ejercicios de laboratorio 358
- Problemas 358

## 13

### TEMPORIZADORES INTEGRADOS

360

- Objetivos de aprendizaje 360
- 13-0 Introducción 361
- 13-1 Modos de operación del temporizador 555 362
- 13-2 Las terminales del 555 363
  - 13-2.1 Encapsulado y terminales de alimentación, 363
  - 13-2.2 Terminal de salida, 364
  - 13-2.3 Terminal de reinicio, 364
  - 13-2.4 Terminal de descarga, 364
  - 13-2.5 Terminal de voltaje de control, 364
  - 13-2.6 Terminales de disparo y de umbral, 364
  - 13-2.7 Retrasos en el tiempo de encendido, 366
- 13-3 Operación astable 369
  - 13-3.1 Funcionamiento del circuito, 369
  - 13-3.2 Frecuencia de oscilación, 369
  - 13-3.3 Ciclo de trabajo, 371
  - 13-3.4 Ampliación del ciclo de trabajo, 372

- 13-4 Aplicaciones del 555 como multivibrador estable 373
  - 13-4.1 Oscilador de ráfaga de tonos, 373
  - 13-4.2 Desplazador de frecuencia controlado por voltaje, 375
- 13-5 Funcionamiento monoestable 376
  - 13-5.1 Introducción, 376
  - 13-5.2 Circuito del pulso de entrada, 378
- 13-6 Aplicaciones del 555 como multivibrador monoestable 379
  - 13-6.1 Control de nivel de agua, 379
  - 13-6.2 Interruptor al tacto, 379
  - 13-6.3 Divisor de frecuencia, 380
  - 13-6.4 Detector de pulso faltante, 381
- 13-7 Introducción a los contadores para temporización 382
- 13-8 El temporizador/contador programable XR 2240 383
  - 13-8.1 Descripción del circuito, 383
  - 13-8.2 Funcionamiento del contador, 384
  - 13-8.3 Programación de las salidas, 386
- 13-9 Aplicaciones del temporizador/contador 387
  - 13-9.1 Aplicaciones de temporización, 387
  - 13-9.2 Oscilador, salidas sincronizadas, 388
  - 13-9.3 Generador de señal con patrón binario, 389
  - 13-9.4 Sintetizador de frecuencias, 390
- 13-10 Temporizador programable mediante interruptores 392
  - 13-10.1 Intervalos de temporización, 392
  - 13-10.2 Funcionamiento del circuito, 392
- 13-11 Simulación de los circuitos del temporizador 555 con PSpice 392
  - 13-11.1 Multivibrador estable o autónomo, 392
  - 13-11.2 Circuito para control de ráfagas de tono, 395
- Ejercicios de laboratorio 397
- Problemas 397

## 14

### CONVERTIDORES DIGITAL A ANALÓGICO Y ANALÓGICO A DIGITAL

398

Objetivos de aprendizaje 398

14-0 Introducción 399

- 14-1 Características de un DAC 399
  - 14-1.1 Resolución, 399
  - 14-1.2 Ecuación de entrada-salida, 401
- 14-2 Características del ADC 402
  - 14-2.1 Ecuación de entrada-salida, 402
  - 14-2.2 Error de cuantización, 404
- 14-3 Procedimiento para la conversión digital a analógica 404
  - 14-3.1 Diagrama a bloques, 404
  - 14-3.2 Red de escalera R-2R, 405
  - 14-3.3 Corrientes de escalera, 406
  - 14-3.4 Ecuación de la escalera, 407
- 14-4 DAC con salida de voltaje 407
- 14-5 DAC multiplicador 409
- 14-6 Convertidor digital a analógico de 8 bits: el DAC-08 410
  - 14-6.1 Terminales de alimentación, 410
  - 14-6.2 Terminal de referencia (multiplicadora), 410
  - 14-6.3 Terminales de la entrada digital, 410
  - 14-6.4 Corrientes de salida analógica, 412
  - 14-6.5 Voltaje de salida unipolar, 413
  - 14-6.6 Voltaje de salida analógica bipolar, 414
- 14-7 Compatibilidad con microprocesadores 416
  - 14-7.1 Principios de interfase, 416
  - 14-7.2 Registros temporales de memoria, 416
  - 14-7.3 El procedimiento de selección, 416
- 14-8 DAC compatible con el microprocesador AD558 417
  - 14-8.1 Introducción, 417
  - 14-8.2 Alimentación, 419
  - 14-8.3 Entradas digitales, 419
  - 14-8.4 Circuitos lógicos, 419
  - 14-8.5 Salida analógica, 419
  - 14-8.6 Circuito para prueba dinámica, 421
- 14-9 ADC integrador 421
  - 14-9.1 Tipos de ADCs, 421
  - 14-9.2 Principios de funcionamiento, 421
  - 14-9.3 Fase de integración de señal,  $T_1$ , 423
  - 14-9.4 Fase de integración de referencia,  $T_2$ , 423
  - 14-9.5 La conversión, 424
  - 14-9.6 Puesta a cero, 425
  - 14-9.7 Resumen, 425

- 14-10 ADC de aproximaciones sucesivas 425
  - 14-10.1 *Funcionamiento del circuito, 426*
  - 14-10.2 *Analogía de las aproximaciones sucesivas, 426*
  - 14-10.3 *Tiempo de conversión, 428*
- 14-11 ADC para microprocesadores 428
- 14-12 ADC compatible con el microprocesador AD670 429
  - 14-12.1 *Terminales de voltaje de la entrada analógica, 429*
  - 14-12.2 *Terminales de la salida digital, 429*
  - 14-12.3 *Terminal de la opción de entrada, 431*
  - 14-12.4 *Terminal de la opción de salida, 431*
  - 14-12.5 *Terminales de control de microprocesador, 432*
- 14-13 Cómo probar el AD670 432
- 14-14 Convertidores paralelos (flash) 434
  - 14-14.1 *Principio de su funcionamiento, 434*
  - 14-14.2 *Tiempo de conversión, 434*
- 14-15 Respuesta a la frecuencia de los ADC 434
  - 14-15.1 *Error de apertura, 434*
  - 14-15.2 *Amplificador de muestreo y retención, 436*
- Ejercicios de laboratorio 437
- Problemas 439

## 15

### FUENTES DE ALIMENTACIÓN

441

- Objetivos de aprendizaje 441
- 15-0 Introducción 442
- 15-1 Introducción a la fuente de alimentación no regulada 442
  - 15-1.1 *Transformador de alimentación, 442*
  - 15-1.2 *Diodos rectificadores, 444*
  - 15-1.3 *Características de las fuentes positivas y negativas, 444*
  - 15-1.4 *Capacitor de filtrado, 445*
  - 15-1.5 *Carga, 445*
- 15-2 Regulación del voltaje de cd 445
  - 15-2.1 *Variaciones en el voltaje de carga, 445*
  - 15-2.2 *Curva de la regulación de voltaje de cd, 446*
  - 15-2.3 *Modelo de cd de una fuente de alimentación, 447*
  - 15-2.4 *Porcentaje de regulación, 449*

- 15-3 Voltaje de rizo de ca 449
  - 15-3.1 *Cálculo del voltaje de rizo de ca, 449*
  - 15-3.2 *Frecuencia del voltaje de rizo y porcentaje de rizo, 451*
  - 15-3.3 *Cómo controlar el voltaje de rizo, 452*
- 15-4 Procedimiento para diseñar una fuente no regulada con un puente rectificador de onda completa 452
  - 15-4.1 *Especificaciones generales de diseño, 452*
- 15-5 Fuentes de alimentación no reguladas bipolares y de dos valores 456
  - 15-5.1 *Fuente de alimentación bipolar o positiva y negativa, 456*
  - 15-5.2 *Fuentes de alimentación de dos valores, 457*
- 15-6 Por qué es necesaria la regulación del voltaje 457
- 15-7 Historia de los reguladores de voltaje lineales 457
  - 15-7.1 *La primera generación, 457*
  - 15-7.2 *La segunda generación, 458*
  - 15-7.3 *La tercera generación, 458*
- 15-8 Reguladores de voltaje lineales 458
  - 15-8.1 *Clasificación, 458*
  - 15-8.2 *Características comunes, 458*
  - 15-8.3 *Circuitos de autoprotección, 460*
  - 15-8.4 *Protección externa, 460*
  - 15-8.5 *Disminución del rizo, 460*
- 15-9 Fuente de alimentación para circuitos lógicos 460
  - 15-9.1 *El circuito regulador, 460*
  - 15-9.2 *La fuente no regulada, 461*
- 15-10 Fuentes de alimentación de  $\pm 15$  V para aplicaciones lineales 461
  - 15-10.1 *Regulador de  $\pm 15$  V para corriente alta, 461*
  - 15-10.2 *Regulador de  $\pm 15$  V para corriente baja, 462*
  - 15-10.3 *Fuente de alimentación no regulada para los reguladores de  $\pm 15$ , 463*
- 15-11 Reguladores de voltaje ajustables de tres terminales positivo (LM317HV) y negativo (LM337HV) 463
- 15-12 Ajuste del voltaje de carga 463
  - 15-12.1 *Ajuste del voltaje de salida regulado positivo, 463*
  - 15-12.2 *Características del LM317HV, 465*
  - 15-12.3 *Regulador de voltaje negativo ajustable, 465*
  - 15-12.4 *Protección externa, 465*

15-13	Regulador de voltaje ajustable tipo laboratorio	466
15-14	Otros reguladores lineales	467
	Ejercicio de laboratorio	467
	Problemas	467
APÉNDICE 1	Amplificador operacional compensado en frecuencia $\mu$ A741	469
APÉNDICE 2	Amplificador operacional LM301	479
APÉNDICE 3	Comparador de voltaje LM311	486
APÉNDICE 4	Regulador ajustable de 3 terminales LM117	493
APÉNDICE 5	Significado de términos e instrucciones que aparecen en el programa de simulación PSpice	499
RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS IMPARES		500
BIBLIOGRAFÍA		506
ÍNDICE		508