

# CONTENIDO

Prefacio ..... ix  
Prefacio para la Edición SI ..... xii

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN A LA MECATRÓNICA ..... 1

1.1 Introducción ..... 1  
1.2 Ejemplos de sistemas mecatrónicos ..... 3  
1.3 Descripción general del texto ..... 5  
    *Preguntas* ..... 6  
    *Problemas* ..... 6

## CAPÍTULO 2

### CIRCUITOS ANÁLOGOS Y COMPONENTES ..... 7

2.1 Introducción ..... 7  
2.2 Elementos de un circuito análogo ..... 8  
2.3 Interruptores mecánicos ..... 10  
2.4 Análisis de circuitos ..... 12  
2.5 Circuitos equivalentes ..... 14  
2.6 Impedancia ..... 16  
2.7 Señales AC ..... 20  
2.8 Energía en circuitos ..... 21  
2.9 Amplificadores operacionales ..... 22  
    2.9.1 *Op-amp comparador* ..... 24  
    2.9.2 *Op-amp inversor* ..... 24  
    2.9.3 *Op-amp no inversor* ..... 26  
    2.9.4 *Op-amp diferencial* ..... 27  
    2.9.5 *Op-amp integrador* ..... 28  
    2.9.6 *Amplificador de energía* ..... 29  
2.10 Puesta a tierra ..... 30  
2.11 Solenoides y relés ..... 31  
    2.11.1 *Solenoides* ..... 31  
    2.11.2 *Relés electromecánicos* ..... 31  
2.12 Resumen del capítulo ..... 32  
    *Preguntas* ..... 33  
    *Problemas* ..... 33

## CAPÍTULO 3

### DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS SEMICONDUCTORES Y CIRCUITOS DIGITALES ..... 36

3.1 Introducción ..... 36  
3.2 Diodos ..... 37  
    3.2.1 *Diodo Zener* ..... 38

    3.2.2 *LED* ..... 39  
    3.2.3 *Fotodiodo* ..... 39  
3.3 Tiristores ..... 40  
3.4 Transistor de unión bipolar ..... 42  
    3.4.1 *Circuito de conmutación con transistores* ..... 43  
    3.4.2 *Circuito seguidor emisor* ..... 45  
    3.4.3 *Salida de colector abierto* ..... 47  
    3.4.4 *Fototransistor, fotointerruptor y optoaislador* ..... 48  
3.5 Transistor de efecto de campo semiconductor de óxido de metal ..... 49  
3.6 Circuitos lógicos combinacionales ..... 51  
    3.6.1 *Álgebra booleana* ..... 52  
    3.6.2 *Generación de función booleana a partir de tablas de verdad* ..... 54  
    3.6.3 *Multiplexores y decodificadores* ..... 56  
3.7 Circuitos lógicos secuenciales ..... 57  
3.8 Familias de circuitos ..... 64  
3.9 Dispositivos digitales ..... 68  
3.10 Controladores de puente H ..... 72  
3.11 Resumen del capítulo ..... 74  
    *Preguntas* ..... 74  
    *Problemas* ..... 75

## CAPÍTULO 4

### MICROCONTROLADORES ..... 78

4.1 Introducción ..... 78  
4.2 Sistemas de numeración ..... 79  
    4.2.1 *Sistema decimal* ..... 79  
    4.2.2 *Sistema binario* ..... 79  
    4.2.3 *Sistema hexadecimal* ..... 80  
    4.2.4 *Representación de números negativos* ..... 81  
    4.2.5 *Representación de números reales* ..... 82  
4.3 Microprocesadores y microcontroladores ..... 82  
4.4 Microcontrolador PIC ..... 84  
    4.4.1 *Familias de microcontroladores PIC* ..... 85  
    4.4.2 *Distribución de terminales* ..... 87  
    4.4.3 *Componentes PIC MCU* ..... 89  
    4.4.4 *Fuente del reloj/oscilador* ..... 91  
    4.4.5 *Operación I/O y A/D* ..... 92  
    4.4.6 *Salida PWM y operaciones de reinicio* ..... 93

4.5 Programación del microcontrolador PIC	94	5.7 Puerto en serie USART	132
4.5.1 Programadores	94	5.8 Interfaz periférica en serie	136
4.5.2 Gestores de arranque	96	5.9 Interfaz de circuito interintegrado	138
4.6 Programación en lenguaje C	96	5.10 Comunicación USB	140
4.6.1 Funciones PIC-C I/O	98	5.10.1 Estándares y terminología USB	140
4.6.2 Funciones PIC-C A/D	99	5.10.2 Transferencia de datos USB	142
4.6.3 Funciones de sincronización PIC-C	99	5.10.3 Modos de transferencia	144
4.6.4 Funciones PIC-C PWM	100	5.10.4 Soporte USB en microcontroladores PIC	144
4.7 Dispositivos y características PIC MCU	101	5.11 Conexión de red	145
4.7.1 Memoria de datos	101	5.11.1 Estructura y operación	146
4.7.2 Datos EEPROM	101	5.11.2 Soporte de programación VBE	148
4.7.3 Memoria del programa	101	5.12 Resumen del capítulo	150
4.7.4 Retrasos y temporizadores	102	Preguntas	150
4.7.5 Sincronización PWM y ciclo de trabajo	103	Problemas	151
4.7.6 Temporizador de vigilancia (watchdog)	104		
4.7.7 Aborro de energía	105	<b>CAPÍTULO 6</b>	
4.7.8 A/E/USART	106	<b>SOFTWARE DE CONTROL</b>	<b>153</b>
4.7.9 Comparador analógico	107	6.1 Introducción	153
4.7.10 Interfaz de Puerto Serial Síncrono (SSP)	107	6.2 Tiempo y temporizadores	154
4.8 Interrupciones	108	6.3 Funciones de sincronización	156
4.8.1 Aplicaciones de las interrupciones	108	6.3.1 Implementación del temporizador en MATLAB	156
4.8.2 Procesamiento de interrupciones	109	6.3.2 Implementación del temporizador en VBE	159
4.8.3 Manejo de interrupciones PIC-C	111	6.3.3 Performance Counter	160
4.9 Programación en lenguaje ensamblador	113	6.3.4 Sincronización en microcontrolador PC	161
4.9.1 Instrucciones en lenguaje ensamblador	113	6.4 Tareas de control	162
4.9.2 Ejemplos de programación en lenguaje ensamblador	113	6.4.1 Tareas de control de evento discreto	164
4.9.3 Integración de lenguaje C y ensamblador	116	6.4.2 Tareas de control de retroalimentación	169
4.9.4 Instrucciones en lenguaje ensamblador PIC18	117	6.5 Escaneo de tarea	170
4.10 Resumen del capítulo	118	6.5.1 Requisitos	170
Preguntas	118	6.5.2 Implementación	171
Problemas	119	6.6 Organización del estado	173
		6.7 Implementación de la tarea de control en software	174
<b>CAPÍTULO 5</b>		6.7.1 Implementación en MATLAB	174
<b>ADQUISICIÓN DE DATOS Y ESTABLECIMIENTO</b>		6.7.2 Implementación en VBE	178
<b>DE INTERFAZ MICROCONTROLADOR/PC</b>	<b>122</b>	6.7.3 Implementación en un microcontrolador PIC	180
5.1 Introducción	122	6.8 Multitasking	184
5.2 Teoría de muestreo	123	6.9 Subprocesos en VBE	186
5.3 Convertidor analógico-digital	123	6.9.1 BackgroundWorker	186
5.3.1 Características A/D	123	6.9.2 Clase subproceso	188
5.3.2 Operación A/D	126	6.10 Intercambio de recursos	188
5.3.3 Configuración de señal de entrada A/D	127	6.11 Sistemas operativos en tiempo real	192
5.4 Convertidor digital-analógico	128	6.11.1 Sistema PIC-C RTOS	194
5.4.1 Características D/A	128	6.11.2 TbreadX	195
5.4.2 Operación D/A	128	6.12 Interfaz gráfica de usuario	197
5.5 Puerto paralelo	130	6.12.1 Interfaz gráfica de usuario MATLAB	198
5.6 Programación de la tarjeta de adquisición de datos	131	6.12.2 Interfaz gráfica de usuario VBE	202

6.13 Resumen del capítulo	205
<i>Preguntas</i>	206
<i>Problemas</i>	207
<b>CAPÍTULO 7</b>	
<b>SENSORES</b>	<b>209</b>
7.1 Introducción	209
7.2 Terminología de desempeño del sensor	210
7.2.1 <i>Características estáticas</i>	210
7.2.2 <i>Características dinámicas</i>	211
7.3 Medición del desplazamiento	212
7.3.1 <i>Potenciómetros</i>	213
7.3.2 <i>LVDT</i>	215
7.3.3 <i>Codificador incremental</i>	216
7.3.4 <i>Codificador absoluto</i>	219
7.3.5 <i>Resolutor</i>	221
7.4 Medición de proximidad	221
7.4.1 <i>Sensores de efecto hall</i>	221
7.4.2 <i>Sensores de proximidad inductivos</i>	223
7.4.3 <i>Sensores ultrasónicos</i>	225
7.4.4 <i>Sensores de proximidad tipo contacto</i>	225
7.5 Medición de velocidad	226
7.5.1 <i>Tacómetro</i>	226
7.5.2 <i>Codificador</i>	227
7.6 Medición de deformación	227
7.7 Medición de fuerza y torque	230
7.7.1 <i>Sensores de fuerza</i>	230
7.7.2 <i>Sensor de fuerza resistivo</i>	231
7.7.3 <i>Sensores de torque</i>	231
7.8 Medición de temperatura	233
7.8.1 <i>Termistores</i>	233
7.8.2 <i>Termopares</i>	234
7.8.3 <i>RTD</i>	236
7.8.4 <i>Sensores de temperatura IC</i>	237
7.9 Medición de vibración	238
7.9.1 <i>Principio operativo de masa sísmica</i>	238
7.9.2 <i>Acelerómetros piezoeléctricos</i>	241
7.9.3 <i>Acelerómetros de Circuito Integrado (IC)</i>	243
7.10 Acondicionamiento de señal	244
7.10.1 <i>Filtrado</i>	244
7.10.2 <i>Amplificación</i>	250
7.10.3 <i>Circuitos puente</i>	250
7.11 Salida del sensor	255
7.12 Resumen del capítulo	256
<i>Preguntas</i>	256
<i>Problemas</i>	257

**CAPÍTULO 8**

<b>ACTUADORES</b>	<b>259</b>
8.1 Introducción	259
8.2 Motores DC	260
8.2.1 <i>Motor DC con escobilla</i>	260
8.2.2 <i>Motor DC sin escobilla</i>	269
8.2.3 <i>Servoaccionamientos</i>	272
8.2.4 <i>Control PWM de motores DC</i>	274
8.3 Motores AC	275
8.4 Motores a pasos	279
8.4.1 <i>Métodos de accionamiento</i>	280
8.4.2 <i>Cableado y amplificadores</i>	283
8.5 Otros tipos de motor	287
8.6 Selección del actuador	289
8.7 Resumen del capítulo	290
<i>Preguntas</i>	291
<i>Problemas</i>	291

**CAPÍTULO 9**

<b>CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN</b>	<b>293</b>
9.1 Introducción	293
9.2 Control de lazo abierto y de lazo cerrado	294
9.3 Diseño de sistemas de control de retroalimentación	295
9.4 Fundamentos de control	295
9.5 Controlador PID	298
9.5.1 <i>Control de velocidad de una inercia</i>	299
9.5.2 <i>Control de posición de una inercia</i>	302
9.6 Implementación digital de un controlador PID	305
9.7 No linealidades	305
9.7.1 <i>Saturación</i>	305
9.7.2 <i>Fricción no lineal</i>	308
9.8 Otros esquemas de control	309
9.8.1 <i>Controlador encendido/apagado</i>	309
9.8.2 <i>Controlador retroalimentado de estado</i>	310
9.9 Resumen del capítulo	314
<i>Preguntas</i>	314
<i>Problemas</i>	314

**CAPÍTULO 10**

<b>PROYECTOS MECATRÓNICOS</b>	<b>316</b>
10.1 Introducción	316
10.2 Mesa rotatoria accionada por motor a pasos	316
10.2.1 <i>Objetivos del proyecto</i>	317
10.2.2 <i>Descripción de la configuración</i>	317
10.2.3 <i>Circuito de la interfaz</i>	317
10.2.4 <i>Comandos de operación</i>	318

10.2.5 Código del microcontrolador .....	319	A.2 Aplicación Console .....	351
10.2.6 Resultados .....	324	A.3 Aplicaciones Windows Forms .....	353
10.2.7 Lista de partes necesarias .....	324	A.4 Archivos y estructura del directorio .....	355
10.3 Sistema dispensador de papel que utiliza un rodillo accionado por un motor DC controlado por posición .....	325	A.5 Variables .....	356
10.3.1 Objetivos del proyecto .....	325	A.6 Operadores .....	358
10.3.2 Descripción de la configuración .....	325	A.7 Ciclado e instrucciones condicionales .....	358
10.3.3 Interfaz de usuario .....	326	A.8 Funciones y subprocedimientos .....	360
10.3.4 Perfil del movimiento .....	327	A.9 Objetos y clases .....	363
10.3.5 Software de control .....	328	A.10 Manejo de errores .....	365
10.3.6 Modelado y simulación del sistema .....	332	A.11 Programación de gráficas .....	366
10.3.7 Simulación de controlador de retroalimentación en MATLAB .....	333	A.12 Controles ToolBox .....	367
10.3.8 Resultados .....	334	A.13 Entrada/salida del archivo .....	368
10.3.9 Lista de partes necesarias .....	336	<b>APÉNDICE B</b>	
10.4 Sistema de calefacción de temperatura controlada que utiliza una bobina de calentamiento, una placa de cobre y un sensor de temperatura .....	336	<b>RESPUESTA DEL SISTEMA .....</b>	<b>370</b>
10.4.1 Objetivos del proyecto .....	336	B.1 Tiempo de respuesta de los sistemas de primer orden .....	370
10.4.2 Descripción de la configuración .....	336	B.2 Tiempo de respuesta de los sistemas de segundo orden .....	371
10.4.3 Interfaz de usuario VBE PC .....	338	B.3 Respuesta de la frecuencia .....	374
10.4.4 Código del microcontrolador .....	339	<b>APÉNDICE C</b>	
10.4.5 Modelado y simulación del sistema físico .....	342	<b>SIMULACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS MATLAB ..</b>	<b>377</b>
10.4.6 Simulación del controlador en MATLAB .....	344	C.1 Solución de ecuaciones diferenciales en MATLAB .....	377
10.4.7 Resultados .....	344	C.1.1 Método de solución de espacio de estado .....	377
10.4.8 Lista de partes necesarias .....	345	C.1.2 Integración directa mediante solucionadores ODE .....	379
10.5 Resumen del capítulo .....	345	C.1.3 Métodos de función de transferencia .....	380
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>347</b>	C.2 Representación de diagrama de bloques y simulación en MATLAB .....	381
<b>RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS SELECCIONADOS .....</b>	<b>349</b>	<b>APÉNDICE D</b>	
<b>APÉNDICE A</b>		<b>CÓDIGO ASCII DE 7 BITS .....</b>	<b>383</b>
<b>VISUAL BASIC EXPRESS .....</b>	<b>351</b>	<b>ÍNDICE ANALÍTICO .....</b>	<b>385</b>
A.1 Introducción .....	351	<b>TABLAS .....</b>	<b>401</b>