







Universidad Tecnológica de la Mixteca  
Huajuapán de León, Oax.

Directorio

Dr. Modesto Seara Vázquez  
Rector

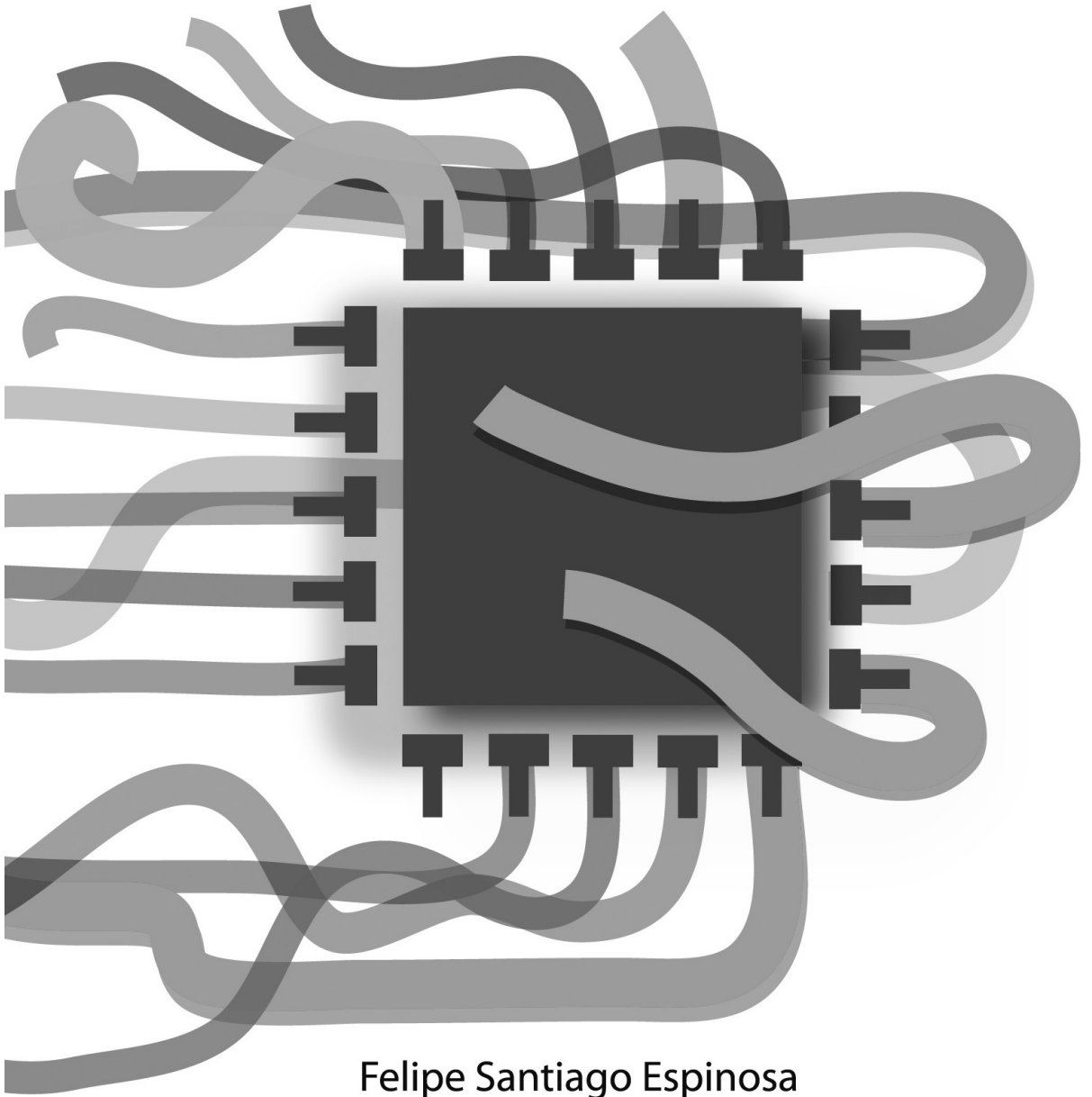
M.C. Gerardo García Hernández  
Vice-Rector Académico

C.P. José Javier Ruiz Santiago  
Vice-Rector Administrativo

Lic. María de los Ángeles Peralta Arias  
Vice-Rectora de Relaciones y Recursos

# LOS MICROCONTROLADORES AVR DE ATMEL

ATMega8 y ATMega16  
Programación en Ensamblador y Lenguaje C



Felipe Santiago Espinosa



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

Primera Edición; mayo 2012  
ISBN: 978-607-95222-7-8  
® D.R. 2012 U.T.M.

Carr. a Acatlima Km. 2.5  
Huajuapán de León, Oaxaca.  
C.P. 69000 Tel. 9535320214  
[www.utm.mx](http://www.utm.mx)

Diseño: Alfonso Acosta Romero  
Dir. Editorial: Reina Ortiz Escamilla

Impreso y hecho en México  
Printed and made in México

# Índice

<b>Prólogo</b>	13
<b>1. Introducción a los Microcontroladores</b>	<b>15</b>
1.1 Sistemas Electrónicos	15
1.2 Controladores y Microcontroladores	16
1.3 Microprocesadores y Microcontroladores	17
1.4 FPGAs y Microcontroladores	19
1.5 Organización de los Microcontroladores	20
1.5.1 La Unidad Central de Procesamiento (CPU)	21
1.5.1.1 Organización de una CPU	22
1.5.1.2 Tareas de la CPU	24
1.5.2 Sistema de Memoria	24
1.5.3 Oscilador	25
1.5.4 Temporizador/Contador	26
1.5.5 Perro Guardián (WDT, <i>watchdog timer</i> )	27
1.5.6 Puerto Serie	27
1.5.7 Entradas/Salidas Digitales	28
1.5.8 Entradas/Salidas Analógicas	28
1.6 Clasificación de los Microcontroladores	29
1.7 Criterios para la Selección de los Elementos de Procesamiento	30
1.8 Ejercicios	32
<b>2. Organización de los Microcontroladores AVR de ATMEL</b>	<b>35</b>
2.1 Características Generales	35
2.2 El Núcleo AVR	37
2.2.1 Ejecución de Instrucciones	38
2.2.2 Archivo de Registros	39
2.3 Memoria de Programa	40
2.4 Memoria de Datos	42
2.4.1 Espacio de SRAM	43
2.4.1.1 Registros I/O	43
2.4.1.2 SRAM de Propósito General	47
2.4.2 Espacio de EEPROM	48
2.5 Puertos de Entrada/Salida	51
2.6 Sistema de Interrupciones	55
2.6.1 Manejo de Interrupciones	59
2.7 Inicialización del Sistema ( <i>reset</i> )	60
2.8 Reloj del Sistema	64
2.8.1 Resonador Cerámico o Cristal Externo	66
2.8.2 Cristal de Baja Frecuencia Externo	66
2.8.3 Oscilador RC Externo	67
2.8.4 Oscilador RC Calibrado Interno	68

2.8.5	Reloj Externo	69
2.9	Modos de Bajo Consumo de Energía	70
2.10	Ejercicios	73
<b>3.</b>	<b>Programación de los Microcontroladores</b>	<b>75</b>
3.1	Repertorio de Instrucciones	75
3.1.1	Instrucciones Aritméticas y Lógicas	75
3.1.2	Instrucciones para el Control de Flujo	79
3.1.3	Instrucciones de Transferencia de Datos	82
3.1.4	Instrucciones para el Manejo de Bits	85
3.1.5	Instrucciones Especiales	87
3.2	Modos de Direccionamiento	88
3.2.1	Direccionamiento Directo por Registro	88
3.2.2	Direccionamiento Directo a Registros I/O	89
3.2.3	Direccionamiento Directo a Memoria de Datos	90
3.2.4	Direccionamiento Indirecto a Memoria de Datos	90
3.2.5	Direccionamiento Indirecto a Memoria de Código	92
3.2.6	Direccionamiento Inmediato	93
3.2.7	Direccionamientos en Bifurcaciones	93
3.2.7.1	Bifurcaciones con Direccionamiento Relativo	94
3.2.7.2	Bifurcaciones con Direccionamiento Indirecto	94
3.2.7.3	Bifurcaciones con Direccionamiento Absoluto	95
3.3	Programación en Lenguaje Ensamblador	95
3.3.1	Directiva INCLUDE	96
3.3.2	Directivas CSEG, DSEG y ESEG	96
3.3.3	Directiva DB y DW	97
3.3.4	Directiva EQU	98
3.3.5	Directiva ORG	98
3.3.6	Directivas HIGH y LOW	99
3.3.7	Directiva BYTE	99
3.4	Programación en Lenguaje C	100
3.4.1	Tipos de Datos	100
3.4.2	Operadores Lógicos y para el Manejo de Bits	101
3.4.3	Tipos de Memoria	102
3.4.3.1	Datos en SRAM	102
3.4.3.2	Datos en FLASH	103
3.4.3.3	Datos en EEPROM	104
3.5	Programas de Ejemplo	105
3.5.1	Parpadeo de un LED	105
3.5.2	Decodificador de Binario a 7 Segmentos	108
3.5.3	Diseño de una ALU de 4 Bits	111
3.6	Relación entre Lenguaje C y Ensamblador	114
3.7	Ejercicios	116



<b>4.</b>	<b>Interrupciones Externas, Temporizadores y PWM</b>	<b>119</b>
4.1	Interrupciones Externas	119
4.1.1	Configuración de las Interrupciones Externas	120
4.1.2	Habilitación y Estado de las Interrupciones Externas	121
4.1.3	Ejemplos de Uso de Interrupciones Externas	122
4.2	Temporizadores	128
4.2.1	Eventos de los Temporizadores	128
4.2.1.1	Desbordamientos	128
4.2.1.2	Coincidencias por Comparación	129
4.2.1.3	Captura de Entrada	130
4.2.2	Respuesta a los Eventos	130
4.2.2.1	Sondeo ( <b>Polling</b> )	130
4.2.2.2	Uso de Interrupciones	131
4.2.2.3	Respuesta Automática	131
4.2.3	Pre-escalador	132
4.2.4	Temporización Externa	133
4.2.5	Registros Compartidos por los Temporizadores	134
4.2.6	Organización y Registros del Temporizador 0	136
4.2.6.1	Generación de Formas de Onda con el Temporizador 0	137
4.2.6.2	Respuesta Automática en la Terminal OC0	138
4.2.6.3	Selección del Reloj para el Temporizador 0	138
4.2.7	Organización y Registros del Temporizador 1	139
4.2.7.1	Generación de Formas de Onda con el Temporizador 1	141
4.2.7.2	Respuesta Automática en las Terminales OC1A y OC1B	141
4.2.7.3	Selección del Reloj para el Temporizador 1	142
4.2.7.4	Acceso a los Registros de 16 Bits del Temporizador 1	142
4.2.8	Organización y Registros del Temporizador 2	143
4.2.8.1	Generación de Formas de Onda con el Temporizador 2	146
4.2.8.2	Respuesta Automática en la Terminal OC2	146
4.2.8.3	Selección del Reloj para el Temporizador 2	146
4.2.9	Ejemplos de Uso de los Temporizadores	147
4.3	Modulación por Ancho de Pulso (PWM)	154
4.3.1	Generación de PWM con los Microcontroladores AVR	155
4.3.2	PWM Rápido	156
4.3.3	PWM con Fase Correcta	157
4.3.4	PWM con Fase y Frecuencia Correcta	158
4.3.5	El Temporizador 0 y la Generación de PWM	159
4.3.6	El Temporizador 1 y la Generación de PWM	160
4.3.7	El Temporizador 2 y la Generación de PWM	162
4.3.8	Ejemplos de Uso de las Señales PWM	162
4.4	Ejercicios	165
5.	Recursos para el Manejo de Información Analógica	167
5.1	Convertidor Analógico a Digital	167
5.1.1	Proceso de Conversión Analógico a Digital	167

5.1.2	Hardware para la Conversión Digital a Analógico	169
5.1.3	Hardware para la Conversión Analógico a Digital	169
5.1.3.1	ADC de Aproximaciones Sucesivas	170
5.1.4	El ADC de un AVR	171
5.1.5	Registros para el Manejo del ADC	176
5.1.6	Ejemplos de Uso del Convertidor Analógico a Digital	178
5.2	Comparador Analógico	183
5.2.1	Organización del Comparador Analógico	183
5.2.2	Registros para el Manejo del AC	184
5.2.3	Ejemplos de uso del Comparador Analógico	186
5.3	Ejercicios	189
<b>6.</b>	<b>Interfaces para una Comunicación Serial</b>	<b>191</b>
<b>6.1</b>	<b>Comunicación Serial a través de la USART</b>	<b>191</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Organización de la USART</b>	<b>192</b>
<b>6.1.1.1</b>	<b>Generación de Reloj y Modos de Operación</b>	<b>193</b>
<b>6.1.1.2</b>	<b>Transmisión de Datos</b>	<b>196</b>
<b>6.1.1.3</b>	<b>Recepción de Datos</b>	<b>197</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Transmisión y Recepción de Datos de 9 Bits</b>	<b>198</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Comunicación entre Múltiples Microcontroladores</b>	<b>198</b>
<b>6.1.4</b>	<b>Registros para el Manejo de la USART</b>	<b>200</b>
<b>6.1.5</b>	<b>Ejemplos de Uso de la USART</b>	<b>204</b>
<b>6.2</b>	<b>Comunicación Serial por SPI</b>	<b>208</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Organización de la Interfaz SPI en los AVR</b>	<b>209</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Modos de Transferencias SPI</b>	<b>211</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Funcionalidad de la Terminal SS</b>	<b>212</b>
<b>6.2.4</b>	<b>Registros para el Manejo de la Interfaz SPI</b>	<b>214</b>
<b>6.2.5</b>	<b>Ejemplos de Uso de la Interfaz SPI</b>	<b>215</b>
<b>6.3</b>	<b>Comunicación Serial por TWI</b>	<b>222</b>
<b>6.3.1</b>	<b>Transferencias de Datos vía TWI</b>	<b>223</b>
<b>6.3.1.1</b>	<b>Formato de los Paquetes de Dirección</b>	<b>223</b>
<b>6.3.1.2</b>	<b>Formato de los Paquetes de Datos</b>	<b>224</b>
<b>6.3.1.3</b>	<b>Transmisión Completa: Dirección y Datos</b>	<b>224</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Sistemas Multi-Maestros</b>	<b>225</b>
<b>6.3.3</b>	<b>Organización de la Interfaz TWI</b>	<b>227</b>
<b>6.3.3.1</b>	<b>Terminales SCL y SDA</b>	<b>227</b>
<b>6.3.3.2</b>	<b>Generador de Bit Rate</b>	<b>227</b>
<b>6.3.3.3</b>	<b>Unidad de Interfaz con el Bus</b>	<b>228</b>
<b>6.3.3.4</b>	<b>Unidad de Comparación de Dirección</b>	<b>228</b>
<b>6.3.3.5</b>	<b>Unidad de Control</b>	<b>228</b>
<b>6.3.4</b>	<b>Registros para el Manejo de la Interfaz TWI</b>	<b>229</b>
<b>6.3.5</b>	<b>Modos de Transmisión y Códigos de Estado</b>	<b>232</b>
<b>6.3.5.1</b>	<b>Modo Maestro Transmisor</b>	<b>232</b>
<b>6.3.1.1</b>	<b>Modo Maestro Receptor</b>	<b>234</b>
<b>6.3.5.4</b>	<b>Modo Esclavo Receptor</b>	<b>236</b>

<b>6.3.5.4</b>	<b>Modo Esclavo Transmisor</b>	<b>239</b>
<b>6.3.5.5</b>	<b>Estados Misceláneos</b>	<b>241</b>
<b>6.3.6</b>	<b>Ejemplos de Uso de la Interfaz TWI</b>	<b>241</b>
<b>6.4</b>	<b>Ejercicios</b>	<b>248</b>
<b>7.</b>	<b>Recursos Especiales</b>	<b>251</b>
7.1	Watchdog Timer de un AVR	251
7.1.1	Registro para el Manejo del WDT	252
7.2	Sección de Arranque en la Memoria de Programa	253
7.2.1	Organización de la Memoria Flash	254
7.2.2	Acceso a la Sección de Arranque	256
7.2.3	Cargador para Autoprogramación	258
7.2.3.1	Restricciones de Acceso en la Memoria Flash	258
7.2.3.2	Capacidades para Leer-Mientras-Escribe	260
7.2.3.3	Escritura y Borrado en la Memoria Flash	261
7.2.3.4	Direccionamiento de la Flash para Autoprogramación	264
7.2.3.5	Programación de la Flash	266
7.3	Bits de Configuración y Seguridad	266
7.4	Interfaz JTAG	269
7.4.1	Organización General de la Interfaz JTAG	269
7.4.2	La Interfaz JTAG y los Mecanismos para la Depuración en un AVR	270
7.5	Ejercicios	272
<b>8.</b>	<b>Interfaz y Manejo de Dispositivos Externos</b>	<b>273</b>
8.1	Interruptores y Botones	273
8.2	Teclado Matricial	274
8.2.1	Decodificadores Integrados para Teclados Matriciales	277
8.3	Interfaz con LEDs y Displays de 7 Segmentos	278
8.4	Manejo de un Display de Cristal Líquido	281
8.4.1	Espacios de Memoria en el Controlador de un LCD	282
8.4.2	Conexión de un LCD con un Microcontrolador	285
8.4.3	Transferencias de Datos	287
8.4.4	Comandos para el Acceso de un LCD	289
8.4.4.1	Limpieza del Display	290
8.4.4.2	Regreso del Cursor al Inicio	290
8.4.4.3	Ajuste de Entrada de Datos	290
8.4.4.4	Encendido/Apagado del Display	291
8.4.4.5	Desplazamiento del Cursor y del Display	291
8.4.4.6	Configura la Función del Display	291
8.4.4.7	Configura Dirección en CGRAM	292
8.4.4.8	Configura Dirección en DDRAM	292
8.4.4.9	Lee la Bandera de Ocupado y la Dirección	292
8.4.4.10	Escribe Dato en CGRAM o en DDRAM	292
8.4.4.11	Lee Dato de CGRAM o de DDRAM	293
8.4.5	Inicialización del LCD	293
8.5	Manejo de Motores	295

8.5.1	Motores de CD	295
8.5.2	Motores Paso a Paso	298
8.5.2.1	Polarización y Operación de un Motor Bipolar	299
8.5.2.2	Polarización y Operación de un Motor Unipolar	301
8.5.3	Servomotores	306
8.6	Interfaz con Sensores	307
8.7	Interfaz con una Computadora Personal	308
8.7.1	Puerto Serie	309
8.7.2	Puerto Paralelo	311
8.7.3	Puerto USB	313
8.7.3.1	Adaptador de USB a RS-232	314
8.7.3.2	Circuitos Integrados Controladores	314
8.7.3.3	Módulos de Evaluación y Prototipado	315
8.7.3.4	Uso de un AVR con Controlador USB Integrado	317
8.8	Ejercicios	318
<b>9.</b>	<b>Desarrollo de Sistemas</b>	<b>321</b>
9.1	Metodología de Desarrollo	321
9.2	Ejemplos de Diseño	325
9.2.1	Reloj de Tiempo Real con Alarma	325
9.2.1.1	Planteamiento del Problema	326
9.2.1.2	Requerimientos de Hardware y Software	328
9.2.1.3	Diseño del Hardware	329
9.2.1.4	Diseño del Software	330
9.2.1.5	Implementación del Hardware	335
9.2.1.6	Implementación del Software	335
9.2.1.7	Integración y Evaluación	340
9.2.1.8	Ajustes y Correcciones	341
9.2.2	Chapa Electrónica	342
9.2.2.1	Planteamiento del Problema	342
9.2.2.2	Requerimientos de Hardware y Software	345
9.2.2.3	Diseño del Hardware	346
9.2.2.4	Diseño del Software	347
9.2.2.5	Implementación del Hardware	350
9.2.2.6	Implementación del Software	350
9.2.2.7	Integración y Evaluación	355
9.2.2.8	Ajustes y Correcciones	355
9.3	Sistemas Propuestos	356
	<b>APENDICE A</b>	<b>361</b>
	<b>APENDICE B</b>	<b>363</b>
	<b>APENDICE C</b>	<b>367</b>
	<b>APENDICE D</b>	<b>375</b>
	<b>INDICE TEMATICO</b>	<b>377</b>

## Prólogo

Comencé a trabajar con microcontroladores en el año de 1994, precisamente en uno de mis últimos cursos de licenciatura. Un microcontrolador también suele ser referido como MCU (*Micro Controller Unit*), por lo que a lo largo del texto, indistintamente es tratado de una u otra manera.

El primer MCU que utilicé fue un 8031, un microcontrolador de 8 bits perteneciente a la familia MCS-51 de Intel. El 8031 requiere de todo un sistema de acondicionamiento para ser puesto en marcha. Posteriormente, otros microcontroladores llegaron a mis manos, adquirí experiencia trabajando con el DS5000T, una versión mejorada del 8031, con memoria de programa tipo NVRAM (RAM no volátil) y un reloj de tiempo real, pero manufacturado por Dallas Semiconductor. Luego, conocí a la familia de microcontroladores PIC de Microchip, tuve una ligera experiencia con el HC11 de Motorola y, en los últimos años, he trabajado con los microcontroladores AVR, de ATMEL.

Desde mi incorporación a la Universidad Tecnológica de la Mixteca, en 1998, año con año he impartido el curso de microcontroladores, utilizando uno u otro dispositivo, según la disponibilidad o requerimientos de las aplicaciones. Con la experiencia adquirida he observado que los microcontroladores AVR tienen más recursos en relación con sus equivalentes en costo de otras compañías, además de un rendimiento más alto.

Por ello, desde el año 2006 he enfocado mis cursos al manejo de los microcontroladores AVR, específicamente trabajando con el ATmega8 y el ATmega16. El primer paso para trabajar con estos dispositivos fue la búsqueda del libro de texto adecuado. Necesitaba un libro que detallara al hardware y lo vinculara con el software, que sentara las bases para el desarrollo de sistemas y permitiera a los estudiantes empezar desde cero en los microcontroladores, hasta adquirir ideas aplicables al desarrollo de sistemas complejos. Y que además, incluyera aspectos relacionados con su programación, tanto en Ensamblador, como en Lenguaje C. Al no encontrarlo, me di a la tarea de escribirlo.

En este libro pretendo reflejar la experiencia que he adquirido con estos dispositivos. Es un libro de texto básico, inicialmente para mis cursos y más adelante, quizás, también sea empleado en otras universidades o por profesionistas independientes interesados en este apasionante mundo de los microcontroladores.

Dado que el tema central son los microcontroladores, supongo que los lectores tienen fundamentos de electrónica digital, esto involucra un conocimiento de sistemas numéricos, compuertas lógicas, registros, memorias, máquinas de estados, etc., incluso algunos aspectos básicos de programación en ensamblador y en Lenguaje C, u otro lenguaje de alto nivel.

Por lo tanto, me enfoco en las características de los microcontroladores y, sólo si es necesario, profundizo en algún concepto en torno a ellos, pero sin desviarme del tema de interés.

A lo largo del texto, realizo una descripción del hardware y el software de los microcontroladores ATmega8 y ATmega16, mostrando cómo los diferentes recursos de hardware pueden ser manejados en Ensamblador o en Lenguaje C. Éste es un aspecto interesante, dado que pretendo mostrar las ventajas o inconvenientes de desarrollar aplicaciones en diferentes niveles de programación. Para todos los recursos internos, he documentado ejemplos completos, los cuales fueron previamente implementados como prácticas en la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Dispongo de un capítulo dedicado al manejo de dispositivos externos y concluyo con la propuesta de una metodología que se puede emplear para construir sistemas con más requerimientos, la cual ilustro con el desarrollo de dos sistemas relativamente complejos.

Agradezco a la Universidad Tecnológica de la Mixteca las facilidades para llevar a cabo la redacción de este libro, deseo sea de utilidad para las futuras generaciones de ésta y otras instituciones. También agradezco a todos los alumnos y profesores que, de una u otra manera, colaboraron en la realización y revisión de este texto.

Felipe. Santiago Espinosa  
fsantiag@mixteco.utm.mx