

## **Preguntas, ejercicios y problemas para el libro:**

### **Microcontroladores: fundamentos y aplicaciones con PIC**

**Autores: Fernando E. Valdés Pérez y Ramon Pallàs Areny**

**Barcelona: Marcombo, 2007, ISBN: 84-267-1414-5**

**México D.F.: Alfaomega, 2007, ISBN: 970-15-1149-2**

#### *Notas:*

1. *Todos los programas para resolver los problemas que se presentan aquí pueden ser probados sobre el sistema EduMic desarrollado por la Universidad de Valencia (<http://edumic.uv.es>).*
2. *Las respuestas a las cuestiones numéricas o que exigen algún cálculo están al final de los enunciados del capítulo respectivo.*

# 1 Introducción a los microcontroladores

*Tema: Microprocesadores y microcontroladores.*

- 1.1 Defina microprocesador y microcontrolador.
- 1.2 ¿Cuáles son los registros fundamentales de un microprocesador o de la CPU de un microcontrolador?
- 1.3 Cómo se comportan comparativamente las cantidades de memoria ROM y RAM en un sistema basado en un microprocesador y en un microcontrolador.
- 1.4 Mencione algunas características deseables en un microcontrolador.

*Tema: Componentes de un microcontrolador.*

- 1.5 Explique la necesidad del perro guardián en un sistema basado en un microcontrolador.
- 1.6 En el circuito de la figura 1.4, se desea que la tensión en el terminal de reset ( $V_{RESET}$ ) permanezca por debajo de la tensión umbral ( $V_{UMBRAL}$ ) al menos durante 0,1 s después de que se ha dado energía al circuito. Calcule el valor mínimo del condensador  $C$  tal que garantice que el reset por encendido se efectúe correctamente, si  $V_{UMBRAL} = 2\text{ V}$  y  $R = 10\text{ k}\Omega$ . Suponer que la corriente de entrada al terminal RESET es cero y que el tiempo de establecimiento de  $V_{DD}$  es despreciable.

*Tema: Arquitecturas Von Neumann y Harvard.*

- 1.7 Arquitecturas Von Neumann y Harvard. Explique por qué la arquitectura Von Neumann fue preferida en los primeros microprocesadores.
- 1.8 En un sistema con arquitectura Harvard, ¿habrá instrucciones para leer o escribir en la memoria de programa?

*Tema: Arquitecturas CISC y RISC.*

- 1.9 ¿Por qué la arquitectura predominante en el diseño de microprocesadores y microcontroladores ha pasado a ser la RISC en lugar de la CISC?

## Respuestas

- 1.6 El comportamiento de la tensión de reset es  $V_{RESET} = V_{DD} \times (1 - e^{-t/(R \times C)})$ . Al evaluarla para  $V_{RESET} = V_{UMBRAL} = 2\text{ V}$ ,  $t = 0,1\text{ s}$ ,  $V_{DD} = 5\text{ V}$  y  $R = 10\text{ k}\Omega$  se obtiene  $C = 19,5\text{ }\mu\text{F}$ . El condensador debe tener al menos ese valor.

## 2 Los microcontroladores PIC

*Tema: Registro W:*

- 2.1 Establezca semejanzas y diferencias entre el registro W de los PIC y el registro Acumulador disponible en muchos microprocesadores y microcontroladores.

*Tema: Pipeline.*

- 2.2 ¿Qué ventajas introduce la técnica de segmentado o *pipeline* en la ejecución de instrucciones de un programa?
- 2.3 ¿Cuántos ciclos de máquina dura la ejecución del programa de la figura 2.4? ¿Cuánto duraría si el microcontrolador PIC no utilizara la técnica de segmentado o *pipeline*?

*Tema: Reset.*

- 2.4 ¿Qué valor toma el contador de programa después de un reset?
- 2.5 ¿Cuál es el objetivo del bloque OST/PWRT de la figura 2.9?
- 2.6 Proponga un circuito para reset externo en un PIC 16F873.

*Tema: Perro guardián.*

- 2.7 ¿Cómo programar el WDT para que el desbordamiento ocurra no antes de 1 segundo?

*Tema: Familias de microcontroladores PIC.*

- 2.8 Compare las familias de PIC de gama baja, media y alta en cuanto a tamaño de las instrucciones, tamaño de la pila y características del sistema de interrupción.

### **Respuestas**

- 2.3 La ejecución del programa dura 6 ciclos de máquina. Sin *pipeline*, duraría 8 ciclos de máquina.
- 2.7 Hay que programar los bits PS2:PS0 del registro OPTION con el valor binario 110, que garantiza que el desbordamiento ocurra a los 1,152 s aproximadamente.

### 3 La memoria en los microcontroladores

*Tema: Conceptos básicos: dirección.*

3.1 Complete la siguiente tabla:

	Tamaño de la memoria	Bits necesarios para representar una dirección	Dirección de la primera localización	Dirección (en hexadecimal) de la última localización de la memoria
1	2 kB		0	
2	4 kB		0	
3	8 kB		0	
4	16 kB		0	
5	32 kB		0	
6	64 kB		0	

*Tema: Organización de la memoria en páginas.*

- 3.2 Suponga una memoria organizada en páginas de 1 kB. Determine el número de la página y el desplazamiento de una localización de memoria cuya dirección es B5A7h.
- 3.3 Suponga una memoria organizada en páginas de 256 bytes. Determine la dirección lineal de una localización situada en la página 3 con desplazamiento 15 dentro de esa página.
- 3.4 Suponga una memoria de 16 kB organizada en 64 páginas. ¿Qué direcciones lineales tienen las localizaciones de la página 5?
- 3.5 Suponga una memoria de 32 kB organizada en páginas de 512 bytes. ¿Qué direcciones lineales tienen las localizaciones de la página 24?
- 3.6 En la figura 3.5  $n = 12$  y  $k = 8$ . ¿Cuáles son el tamaño de la memoria y la cantidad y tamaño de las páginas?

*Tema: La memoria de programa.*

- 3.7 ¿Qué tamaño puede tener la memoria de programa de un PIC de gama media? ¿Qué tamaño tienen las localizaciones de memoria? ¿Qué tamaño tienen las páginas de esta memoria?
- 3.8 ¿Qué registro del microcontrolador “apunta” a la memoria de programa de un PIC? ¿Cómo opera este registro durante la ejecución de un programa?
- 3.9 ¿De qué formas se puede modificar el contenido del contador de programa?
- 3.10 ¿Se puede leer o escribir un dato en la memoria de programa de un PIC? Explique su respuesta.

*Tema: La memoria de datos.*

- 3.11 ¿Qué tamaño puede tener la memoria de datos de un PIC de gama media? ¿Qué tamaño tienen sus localizaciones de memoria? ¿Qué tamaño tienen las páginas de esta memoria?
- 3.12 ¿Qué registros del microcontrolador “apuntan” a la memoria de datos de un PIC?

### Respuestas

3.1

	Tamaño de la memoria	Bits necesarios para representar una dirección	Dirección de la primera localización	Dirección (en hexadecimal) de la última localización de la memoria
1	2 kB	11	0	7FFh

2	4 kB	12	0	FFFh
3	8 kB	13	0	1FFFh
4	16 kB	14	0	3FFFh
5	32 kB	15	0	7FFFh
6	64 kB	16	0	FFFFh

- 3.2 El número de la página es 2Dh y el desplazamiento es 1A7h.
- 3.3 La dirección lineal es 30Fh.
- 3.4 Las localizaciones tienen las direcciones 1400h a 17FFh.
- 3.5 Las localizaciones tienen las direcciones 6000h a 61FFh.
- 3.6 El tamaño de la memoria es  $2^n = 4096$  localizaciones organizadas en  $2^{n-k} = 16$  páginas de  $2^k = 256$  localizaciones cada una.
- 3.8 El contador de programa o registro PC es el registro que apunta hacia la memoria de programa.
- 3.12 Los registros FSR y los bits IRP, RP1 y RP0 del registro STATUS.

## 4 Repertorio de instrucciones y programación en lenguaje ensamblador

*Tema: Conceptos básicos.*

- 4.1 Definir brevemente: programa fuente, programa objeto, lenguaje ensamblador, lenguaje de máquina y programa ensamblador.
- 4.2 Identifique el modo de direccionamiento utilizado en cada una de las siguientes instrucciones:
  - 4.2.1 `movlw 0x55`
  - 4.2.2 `movwf 0x20`
  - 4.2.3 `movwf FSR`
  - 4.2.4 `movwf INDF`
  - 4.2.5 `bcf STATUS, RP0`
- 4.3 Comente las características y el uso que tiene la pila en un PIC de gama media. ¿Qué instrucciones son las que depositan o extraen información de la pila?

*Tema: Repertorio de instrucciones y programas lenguaje ensamblador*

- 4.4 Haga un programa que compare los contenidos de los registros REG1 y REG2 y deposite el contenido mayor en el registro REG3. Suponga que se trata de números enteros sin signo. Haga dos versiones del programa: una para codificación absoluta y otra para codificación relocizable.
- 4.5 Haga una subrutina para la conversión BCD – 7 segmentos. Esta rutina recibe un dígito BCD en el registro W y devuelve el correspondiente código 7 segmentos en W. La tabla para la conversión de códigos se muestra a continuación:

Código	Código
BCD	7 segmentos
0	3Fh
1	06h
2	5Bh
3	4Fh
4	66h
5	6Dh
6	7Dh
7	07h
8	7Fh
9	6Fh

- 4.6 Haga un programa que copie el bloque de datos que comienza en la dirección dada en REG1 hacia la dirección dada en REG2. La longitud del bloque se da en REG3. Haga dos versiones del programa: una para codificación absoluta y otra para codificación relocizable (relativa).
- 4.7 Haga un programa para determinar la longitud de una cadena de caracteres ASCII. La cadena comienza en registro apuntado por REG1; el final de la cadena es un carácter RETORNO ('CR', 0Dh). Deposite la longitud de la cadena (excluyendo el 'CR') en REG2. Haga dos versiones del programa: una para codificación absoluta y otra para codificación relocizable (relativa).
- 4.8 Haga un programa para sumar dos números binarios de 32 bits. Los números están depositados en la memoria de datos a partir de los registros REG1 y REG2. Colocar la suma a partir de REG1. Cada número está depositado en memoria con su byte menos significativo en la dirección más baja (disposición conocida como *little endian*), es decir en REG1 y REG2, mientras que los bytes más significativos están en REG1+3 y REG2+3, respectivamente.

## ***Respuestas***

4.2.1 Inmediato.

4.2.2 Directo.

4.2.3 Directo.

4.2.4 Indirecto.

4.2.5 Directo.

## 5 La entrada y salida en paralelo

*Tema: Conceptos básicos.*

- 5.1 Describir brevemente los conceptos de puerto y periférico, los métodos de transferencia paralela de datos, y las técnicas de entrada y salida.
- 5.2 ¿Qué registros de funciones especiales están asociados a un puerto paralelo cualquiera?
- 5.3 ¿Cómo se programa que un terminal cualquiera de un puerto paralelo sea entrada o salida?
- 5.4 La instrucción `movf PORTA, W`, ¿coloca en W el valor del registro de funciones especiales PORTA o coloca el valor lógico de los terminales del puerto A?
- 5.5 ¿Qué problemas puede presentar la modificación individual por programa de un bit de un puerto paralelo?
- 5.6 Comente las técnicas de E/S programada e interrupción en cuanto a recursos necesarios y velocidad de la transferencia de datos.
- 5.7 ¿Qué factor limita la velocidad de transferencia de datos en las técnicas de E/S programada y por interrupción? ¿Qué solución hay para esto?

*Tema: E/S simple.*

- 5.8 Diseñe un decodificador binario 3 a 8. Las entradas son las líneas RA2, RA1 y RA0 del puerto A y las salidas son las líneas RB7, RB6, ..., RB0 del puerto B.
- 5.9 Diseñe un comparador de 2 bits. Los números N1 y N2 de 2 bits cada uno, entran por el puerto A (N2 entra por las líneas RA3 y RA2, y N1 por RA1 y RA0). Las salidas son las líneas RB2, RB1 y RB0 del puerto B, las que se ponen un 1 según  $N1 < N2$ ,  $N1 = N2$  ó  $N1 > N2$ , respectivamente.

*Tema: E/S programada.*

- 5.10 Contador de contador binario de pulsaciones. Se tienen 4 diodos LED (LED0, LED1, LED2 y LED3) conectados a los terminales RB0, RB1, RB2 y RB3 del puerto B, y tres pulsadores (K1, K2 y K3) conectados a los terminales RA0, RA1 y RA2 del puerto A. Los diodos y los pulsadores están conectados como el diodo LED2 y el interruptor K de la figura 5.8. Haga un programa que incremente en 1 el valor binario representado en los diodos LED con cada pulsación de K1 y disminuya en 1 ese valor con cada pulsación de K2. Al pulsar K3, el contador va a cero. Tenga en cuenta el problema del rebote en los pulsadores.



## 6 Los temporizadores

Nota: Suponer para todos los ejercicios y problemas de este capítulo, un PIC con un oscilador a cristal de 4 MHz.

*Tema: Operación de los módulos como temporizadores.*

- 6.1 En las figuras 6.2 ó 6.4,  $T0CS = 0$ ,  $PSA = 0$ ,  $PS2:PS0 = 5$ . Calcule el tiempo de desbordamiento del Timer0 a partir del instante en que se carga el registro TMR0 con el valor 200.
- 6.2 En la figura 6.5,  $TMR1CS = 0$ ,  $T1CKPS1:T1CKPS0 = 3$ ,  $TMR1L = 200$  y  $TMR1H = 200$ . Calcule el tiempo de desbordamiento del Timer1 a partir del instante en que se habilita el conteo con  $TMR1ON = 1$ .
- 6.3 Generar una onda cuadrada de frecuencia 10 Hz por el terminal RB0 del puerto B.
  - 6.3.1 Usar el Timer0 para generar la demora adecuada.
  - 6.3.2 Usar el Timer1 para generar la demora adecuada.

*Tema: Operación de los módulos como contadores.*

- 6.4 Divisor de frecuencia. La frecuencia del tren de pulsos que entra por el terminal RA4/T0CKI se divide por 10. El tren de pulsos de salida se obtiene en RB1.
- 6.5 Contador de pulsos. Haga un programa que ponga en 1 al terminal RB1 cuando el número de pulsos que llegan al microcontrolador por el terminal RC0/T1CKI alcance el valor de 10000.

*Tema: Operación del módulo CCP en modo de captura.*

- 6.6 En el ejemplo 6.4, la señal en el terminal CCP1 tiene un período que está entre 0,1 s y 0,25 s. Proponga valores apropiados de los factores de división  $P_c$  y  $P_1$  para medir correctamente el período  $T_x$  de la señal.

*Tema: Operación del módulo CCP en modo comparador.*

- 6.7 Genere una onda cuadrada de 10 Hz por el terminal RB0 del puerto B. Utilizar el Timer1 y el módulo CCP1 en modo comparador para obtener la demora adecuada. (Ver ejemplo 6.5).

*Tema: Operación del módulo CCP en modo PWM.*

- 6.8 ¿Cuál es la resolución de la señal PWM del ejemplo 6.6? ¿Qué valor tiene  $\Delta T_{ON}$ ?

### Respuestas

- 6.1 El tiempo de desbordamiento del Timer0 se calcula mediante la expresión (6.3). En ella  $P = 2^{5+1}=64$ ,  $N = 8$  según (6.5) y  $T_i = 1 \mu s$ . Entonces, el tiempo de desbordamiento resultante es  $T_d = 64 \times 8 \times 1 = 512 \mu s$ .
- 6.2 Al cargar 200 (C8h) en los registros TMR1H y TMR1L, el número de 16 bits depositado en el Timer1 es C8C8h = 51400. Según (6.8), el módulo de conteo es  $65536 - 51400 = 14136$ . El tiempo de desbordamiento del Timer1 se calcula mediante la expresión (6.7). En ella  $P = 2^3=8$ ,  $N = 14136$  según (6.8) y  $T_i = 1 \mu s$ . Entonces, el tiempo de desbordamiento resultante es  $T_d = 8 \times 14136 \times 1 = 113088 \mu s$ .
- 6.6 En el ejemplo 6.4 se deduce que la expresión que relaciona el período  $T_x$  de la señal en el terminal CCP1 con los factores de división  $P_c$  y  $P_1$  de los pre-divisores, la duración  $T_{CM}$  de los ciclos de máquina del microcontrolador, y el número  $N$  que avanza el Timer1 entre dos capturas consecutivas es

$T_x = N \times T_{CM} / (P_C / P_1)$ . Si  $T_{CM} = 10^{-6}$  s, los únicos valores de la relación  $P_C / P_1$  (entre todos los posibles), que mantienen el valor de  $N$  por debajo de 65536 para  $T_x$  entre 0,1 s y 0,25 s, son 1/8 ( $P_C=1$ ,  $P_1=8$ ) y 1/4 ( $P_C=1$ ,  $P_1=4$ ).

- 6.8 En este ejemplo no se manipulan los dos bits menos significativos de  $M$ , entonces (6.19) y (6.20) quedan así:  $\Delta T_{ON} = T_{ON} / M_8 = 4 \times P \times T_{OSC}$ , y  $R = N + 1$ . Entonces, la resolución es  $R = 250$  y  $\Delta T_{ON} = 4 \mu s$ .

## 7 Las interrupciones

*Tema: Conceptos básicos.*

- 7.1 Una forma de recordar la dirección de retorno al programa interrumpido podría ser guardar el contador de programa en una localización de la memoria de datos del microcontrolador como un dato más, sin embargo, se prefiere utilizar la pila para ello. ¿Por qué?
- 7.2 Comente la secuencia de etapas que transcurren al atender una solicitud de interrupción en un microcontrolador.
- 7.3 Comente la estructura general de la subrutina que atiende una interrupción, mostrada en la figura 7.3. ¿Qué la diferencia de una subrutina “convencional”?
- 7.4 ¿Qué alternativas hay para informar a la CPU de la dirección donde comienza la subrutina de atención a la interrupción?

*Tema: Las interrupciones en los PIC.*

- 7.5 ¿Qué estado toma (habilitado o inhabilitado) el sistema de interrupción de un PIC después de una acción de reset?
- 7.6 Atendiendo a que las interrupciones pueden ser enmascarables o no enmascarables, y fijas o vectorizadas, clasifique las interrupciones de los microcontroladores PIC de gama media.
- 7.7 ¿Qué registros de funciones especiales están relacionados con las interrupciones en un PIC de gama media?
- 7.8 ¿Cuántos bits están asociados a cada fuente de interrupción en un PIC y qué función tienen?
- 7.9 Supongamos que el sistema de interrupción del PIC está habilitado. Si se produce una solicitud de interrupción y ésta llega a la CPU (pues está habilitada), el sistema de interrupción se inhabilita ¿Cómo se vuelve a habilitar el sistema de interrupción?
- 7.10 ¿Qué diferencias hay entre las instrucciones `return` y `retfie`?
- 7.11 ¿Qué condiciones deben existir en el sistema de interrupción del PIC para que una solicitud de interrupción cause efectivamente la interrupción del programa en curso?

## 8 La entrada y salida en serie

*Tema: Conceptos básicos.*

- 8.1 En una comunicación de datos, ¿qué necesita “conocer” el receptor de datos para recuperar la información transmitida por el transmisor?
- 8.2 ¿Cómo se logra la sincronización entre receptor y transmisor de datos si este último no transmite la señal de reloj?
- 8.3 ¿Qué desventaja tiene la comunicación asincrónica comparada con la sincrónica?
- 8.4 En la figura 8.5, identifique líneas de datos, de control y de estado en el interfaz RS-232C.
- 8.5 Los dispositivos conectados en un bus I2C pueden ser servidores o clientes. ¿Qué significado tienen estas denominaciones?

*Tema: Los puertos USART o SCI y SSP en los modos SPI e I<sup>2</sup>C.*

- 8.6 Complete la tabla con los nombres de los terminales en cada caso:

Puerto C	USART	USART	SPI	I <sup>2</sup> C
	asincrónico	sincrónico		
RC0				
RC1				
RC2				
RC3				
RC4				
RC5				
RC6				
RC7				

- 8.7 Relacione los registros de funciones especiales asociados a los puertos serie USART, SPI, e I<sup>2</sup>C.
- 8.8 Diga cómo se obtiene la señal de reloj de los puertos series USART, SPI, e I<sup>2</sup>C. ¿Cómo se determina la frecuencia en cada caso?

### Respuestas

- 8.6

Puerto C	USART	USART	SPI	I <sup>2</sup> C
	asincrónico	sincrónico		
RC0	-	-	-	-
RC1	-	-	-	-
RC2	-	-	-	-
RC3	-	-	SDK	SCL
RC4	-	-	SDI	SDA
RC5	-	-	SDO	-
RC6	TX	CK	-	-
RC7	RX	DT	-	-

## 9 Las entradas y salidas analógicas. Adquisición y distribución de señales

*Tema: Conversión A/D: efecto de la tensión de referencia*

- 9.1 En un determinado convertidor analógico-digital (CAD) de 12 bits se emplea una tensión de referencia  $V_{ir} = 4,096$  V que tiene una incertidumbre de  $\pm 2$  %. Si la entrada es del orden de 1 V, se pide:
- 9.1.1 ¿Cuál es la salida digital ( $D$ , expresada como número de “cuentas”) cuando  $V_{ir}$  tiene su valor nominal?
- 9.1.2 ¿Cuál es la salida digital cuando  $V_{ir}$  tiene, debido a su incertidumbre, su valor mínimo? ¿Y cuando tiene su valor máximo?

*Tema: Margen dinámico*

- 9.2 Calcule el margen dinámico (en bits) necesario para una estación meteorológica que deba medir: temperatura entre  $-25$  °C y  $60$  °C con una resolución de  $0,1$  °C; humedad relativa entre  $10$  % y  $100$  %, con una resolución del  $2$  %; y presión atmosférica entre  $870$  hPa y  $1100$  hPa con una resolución de  $1$  hPa.
- 9.3 Se desea medir una temperatura entre  $0$  °C y  $100$  °C con una resolución de  $0,5$  °C, empleando un sensor que tiene una sensibilidad de  $-2,2485$  mV/°C y cuya tensión de salida a  $25$  °C es de  $0,6$  V. Si el sistema se alimenta a  $5$  V y se desea obtener una tensión de salida de  $0,54$  V a  $4,46$  V, determine el margen dinámico y la ganancia que debe tener el procesador analógico. ¿Es necesaria alguna otra función analógica?
- 9.4 Un determinado sistema integrado de adquisición de datos tiene 16 bits de resolución,  $\pm 1$  V de margen de tensión de entrada y ganancia programable  $G = 1, 2, 4, 8$ . Cuando el margen de la tensión de entrada es de  $\pm 125$  mV.
- 9.4.1 ¿Qué valor hay que elegir para  $G$ ?
- 9.4.2 Si se elige  $G = 2$ , ¿cuál es la resolución efectiva del sistema (en bits)?

*Tema: Atenuador para tensiones continuas*

- 9.5 Diseñe un atenuador resistivo que presente una resistencia de entrada de  $1$  M $\Omega$  y que divida por 5 la amplitud de una tensión cuando su salida se conecta a un circuito que tiene  $1$  M $\Omega$  de resistencia de entrada. ¿Qué sucedería si no se tuviera en cuenta la resistencia de entrada del circuito donde se mide ( $1$  M $\Omega$ ) al diseñar el atenuador?
- 9.6 Para medir una tensión de baja frecuencia de hasta  $36$  V, se dispone de una tarjeta de adquisición de datos de 12 bits de resolución,  $10$  V de alcance y  $10$  M $\Omega$  de resistencia de entrada. Se pide:
- 9.6.1 Diseñe un divisor de tensión tal que el error por carga debido a la tarjeta sea inferior al máximo error de cuantificación.
- 9.6.2 Si para el divisor de tensión se elige una resistencia de  $200$   $\Omega$  y otra de  $523$   $\Omega$ , ambas con tolerancia del  $0,1$  %, y a efectos prácticos se considera que la resistencia de  $10$  M $\Omega$  es infinita, ¿cuál es el intervalo de valores de salida del CAD que se puede obtener si la tensión aplicada al divisor de tensión es de  $24$  V? Dar el intervalo en “número de cuentas”; no hace falta dar el código digital.

*Tema: Atenuador para tensiones alternas compensado*

- 9.7 Diseñe el valor de los componentes de un atenuador de tensión que divida por 10 las tensiones aplicadas a su entrada, cualquiera que sea su frecuencia, y que presente una resistencia de entrada de  $10$  M $\Omega$  cuando se conecta a un sistema que tiene una impedancia de entrada con una resistencia muy alta en paralelo con  $C = 47$  pF.

*Tema: Efecto de carga*

- 9.8 Un determinado sistema de adquisición de señales tiene 16 bits de resolución, una impedancia de entrada de  $100\text{ M}\Omega \parallel 47\text{ pF}$ , un margen de entrada de su convertidor A/D de 0 V a +1 V y una ganancia programable  $G = 1, 2, 5, 10$ .
- 9.8.1 Si las señales que se quieren medir son de muy baja frecuencia, ¿cuál es la máxima resistencia de fuente que pueden presentar para que la resistencia de entrada produzca un error inferior a  $(1/8)\text{LSB}$  cuando la señal tenga una amplitud de +1 V.
- 9.8.2 Si la resistencia serie total de cada canal es de unos  $3000\ \Omega$  y se tiene en cuenta la presencia de la capacidad de entrada de la tarjeta, ¿cuánto tiempo hay que esperar después de conmutar una señal de muy baja frecuencia de 1 V para tener un error dinámico inferior a  $(1/8)\text{LSB}$ ?
- 9.9 Para obtener una tensión a partir de un bucle de corriente de 4-20 mA, se dispone una resistencia de  $250\ \Omega$  en serie con el bucle. Si la tensión obtenida se conecta directamente a un convertidor A/D de 12 bits, ¿cuánto debe valer como mínimo la resistencia interna de la fuente de corriente para que su presencia dé un error inferior al máximo error de cuantificación? Nota: la conexión directa implica que no se realiza ninguna otra función, ni siquiera un desplazamiento del cero.

*Tema: CMRR en amplificadores diferenciales*

- 9.10 Para amplificar una determinada señal alterna diferencial se dispone de un amplificador que tiene  $G_d = 100$  y  $\text{CMRR} = 80\text{ dB}$  desde continua hasta 1 kHz. Para eliminar el posible offset de la señal, se precede el amplificador con un filtro paso alto que tiene  $\text{CMRR} = 60\text{ dB}$  a 50 Hz. Si a la entrada del filtro se aplica una tensión de modo común de 1 V, 50 Hz, ¿cuánto vale la tensión a la salida del amplificador?

*Tema: Filtros de entrada pasivos*

- 9.11 Si en un filtro de paso bajo de primer orden se desea que las señales de frecuencia  $f$  no queden atenuadas en más del 0,01 %, ¿cuál debe ser como mínimo la frecuencia de corte del filtro?

*Tema: Tiempo de espera en las conmutaciones (y atenuación de tensión)*

- 9.12 Se dispone de un sistema de adquisición de señales de 12 bits con  $10\text{ M}\Omega$  de resistencia de entrada y margen de señal de -5 V a +5 V. Para poder medir la tensión de la red eléctrica (230 V eficaces) con dicho sistema, se atenúa con un divisor de tensión conectado a su entrada. Se pide:
- 9.12.1 Diseñe el divisor de tensión para que la impedancia de entrada cuando esté conectado al sistema de adquisición sea la misma que la del sistema solo.
- 9.12.2 Si el divisor se diseña con una resistencia de  $10\text{ M}\Omega$  y otra de  $100\text{ k}\Omega$ , y se desea filtrar los armónicos superiores de la tensión de red pero sin atenuar el quinto armónico en más de 3 dB, mediante un condensador conectado a la entrada del sistema de adquisición, ¿cuánto debe valer dicho condensador para que el sistema sea válido tanto para una red de distribución de 50 Hz como para una de 60 Hz?
- 9.12.3 Si finalmente se emplea un condensador de  $10\text{ nF}$  y para probar el sistema se emplea una tensión continua conectada mediante un relé, ¿cuánto tiempo hay que esperar después de la conmutación para que la diferencia entre la tensión adquirida y la tensión real sea inferior a un cuarto del máximo error de cuantificación?

*Tema: Filtros anti-alias*

- 9.13 Se desea digitalizar una señal que tiene un ancho de banda de unos 100 Hz y  $\text{SNR} = 40\text{ dB}$ , muestreándola a 1000 Hz. Si como filtro paso bajo se emplea un simple filtro de primer orden con

frecuencia de corte 100 Hz, ¿cuántos bits puede tener como máximo el convertidor analógico-digital para que no se produzcan alias?

*Tema: Interfaz directa entre sensor y microcontrolador*

- 9.14 Se dispone de un potenciómetro para medir desplazamientos entre 0 y 1,25 m, para el que se especifica una linealidad de  $\pm 0,25\%$  del fondo de escala, una resistencia de “ $1000\ \Omega \pm 15\%$ ” y una tensión de excitación máxima de 25 V. Si su tensión de salida se digitaliza con un convertidor A/D (CAD) cuya tensión de referencia es la misma que se emplea para alimentar el potenciómetro, se pide,
- 9.14.1 ¿Cuántos bits debe tener el CAD para que su resolución no afecte a la incertidumbre de la relación entrada-salida si se supone lineal?
- 9.14.2 Si se elige un CAD de 12 bits, ¿cuál será la salida digital (en código binario natural) cuando el desplazamiento sea 0,5 m?
- 9.14.3 ¿Cuál es el desplazamiento (valor e incertidumbre) cuando el código de salida del CAD es 1000 1000 1000?
- 9.14.4 ¿Cuál debe ser la resistencia mínima de entrada del CAD para que el error por carga que produce sea inapreciable cuando el cursor del potenciómetro está en su posición central?

## **Respuestas**

- 9.1.1 Según (9.1), el número de orden del código será 1000, que corresponderá a  $D = 999$ . Dada la incertidumbre de 1 LSB, podrá ser también  $D = 1000$ .
- 9.1.2 Los valores extremos de la tensión de referencia serán 4,014 V y 4,179 V. La “salida” respectiva para 1 V será  $D = 1020$  y  $D = 980$ , en ambos casos con una incertidumbre de 1 LSB.
- 9.2 La temperatura es la magnitud con mayor margen dinámico. De (9.4) resulta  $N = 9,7$  bits, por lo que haría falta un CAD de 10 bits.
- 9.3 De (9.4),  $DR = 200$ . La sensibilidad del sensor multiplicada por las temperaturas extremas, dará las tensiones extremas de salida del sensor, y el cociente entre la diferencia de tensiones deseada a la salida del amplificador y la diferencia de tensiones de salida del sensor, dará la ganancia: -17,4. A  $0\ ^\circ\text{C}$ , el sensor da 656 mV, y nosotros queremos que la salida del amplificador a  $0\ ^\circ\text{C}$  sea 0,54 V. Por lo tanto, a la entrada del amplificador hace falta un desplazamiento de nivel de  $0,54\ \text{V}/(-17,4) = -656\ \text{mV}$ , es decir, de -687 mV.
- 9.4.1 G debe permitir que la tensión de entrada amplificada cubra todo el margen de entrada del CAD:  $G = 8$ .
- 9.4.2 Con  $G = 2$ , la tensión de salida del amplificador será de  $\pm 0,250\ \text{V}$ . Para el CAD, 1 LSB sigue teniendo el mismo valor, de manera que, según (9.6), si la máxima tensión que se obtiene es 4 veces menor,  $2^N$  también deberá ser 4 veces menor ( $2^2$ ), la resolución efectiva es de  $16 - 2 = 14$  bits.
- 9.5 Con la terminología de la figura 9.12, y teniendo en cuenta que la resistencia de entrada de entrada del circuito ( $1\ \text{M}\Omega$ ) no es suficientemente grande como para poderla despreciar en paralelo con  $R_2$ , resulta  $R_1 = 800\ \text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 250\ \text{k}\Omega$ . Si no se tuviera en cuenta la resistencia de  $1\ \text{M}\Omega$  (entrada del circuito al que se conecta el atenuador), los cálculos con la aproximación de (9.10) y (9.11) darían  $R_1 = 800\ \text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 200\ \text{k}\Omega$ , de modo que la atenuación sería mayor que la deseada y la resistencia de entrada al atenuador, una vez conectado a la entrada del circuito, sería menor que  $1\ \text{M}\Omega$ .
- 9.6.1 Con la terminología de la figura 9.12, si la resistencia de entrada fuera infinita, según (9.10) bastaría tener  $R_1 = 2,6\ R_2$ . La tensión obtenida con esta relación sería la tensión de salida en el caso ideal. En el caso real, con  $R_i = 10\ \text{M}\Omega$ , y con  $R_1 = 2,6\ R_2$ , se obtendrá una tensión que no debe diferir de la ideal en más de  $Q/2$ . La

peor situación para cumplir esta condición será cuando la tensión aplicada al atenuador sea de 36 V, y esto exige  $R_2 < 1690 \Omega$ , de modo que  $R_1 < 4395 \Omega$ .

9.6.2 Si se elige  $R_2 = 200 \Omega$  y  $R_1 = 523 \Omega$  (valores normalizados), las situaciones más desfavorables en cuanto a la atenuación real obtenida respecto a la atenuación esperada (correspondiente a los valores nominales de las resistencias), se producirán cuando  $R_2$  sea muy grande y  $R_1$  sea muy pequeña (dentro de su tolerancia), y cuando  $R_2$  sea muy pequeña y  $R_1$  sea muy grande. En el primer caso,  $A = 0,2770$  y los 24 V de entrada darán 6,649 V, que con una tensión de referencia de 10 V darán una salida  $D = 2723$ . En el segundo caso ( $R_2$  pequeña),  $A = 0,2762$ , y los 24 V se reducirán a 6,629 V y la salida del CAD será  $D = 2715$ . El intervalo de salida será:  $2715 \leq D \leq 2723$ . Es decir, un  $\pm 0,1 \%$  de incertidumbre en cada resistencia se traduce en un  $\pm 0,1 \%$  de incertidumbre en la salida (8 cuentas).

9.7 La obtención de una atenuación constante con la frecuencia exige un atenuador compensado, como el de la figura 9.12b. Las ecuaciones de diseño son la (9.12) y la (9.13).  $R_1 = 9 \text{ M}\Omega$ ,  $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $C_1 = 5,2 \text{ pF}$ .

9.8.1 La resistencia de fuente no es nula y esto provoca una atenuación no deseada. Para que la diferencia entre la tensión de la fuente de señal y la tensión atenuada sea inferior a  $1/8 \text{ LSB}$ , la resistencia de fuente máxima debe ser  $191 \Omega$ .

9.8.2 Al conmutar una señal de muy baja frecuencia, el circuito equivalente y la evolución de la tensión a la entrada del sistema son los de la figura 9.22. Aplicando (9.22) con  $\tau = (3000 \Omega)(47 \text{ pF})$  y  $\varepsilon = 1/2^{19}$ , resulta un tiempo de espera de  $1,86 \mu\text{s}$ . La presencia de una resistencia de  $3000 \Omega$  en serie con cada canal, que puede ser necesaria para proteger el sistema frente a sobrecorrientes, no sólo conllevará un efecto de carga sino también un retardo en la conmutación.

9.9 El efecto de carga al medir corrientes se puede analizar con el circuito como el de la figura 9.13a, pero utilizando para la fuente de señal su circuito equivalente de Norton. Si la resistencia interna de la fuente es  $R_o$ , la tensión medida en bornes de la resistencia de  $250 \Omega$  no será  $I \times 250 \Omega$  sino  $I \times (250 \Omega || R_o)$ . La diferencia entre estas dos tensiones deberá ser inferior a  $Q/2$ , donde  $Q = (20 \text{ mA} \times 250 \Omega)/2^{12}$ . Resulta,  $R_o > 2,05 \text{ M}\Omega$ .

9.10 El efecto de las tensiones de modo común a la entrada de un amplificador diferencial se puede analizar con la ecuación (9.18). Pero hay que tener en cuenta la observación que hay en el párrafo siguiente: si el circuito diferencial previo al amplificador está desequilibrado, el CMRR "efectivo" será inferior al del amplificador sólo. Según el enunciado, el filtro diferencial que precede al amplificador tiene un CMRR de sólo 60 dB a 50 Hz, con lo cual, con una entrada de modo común de 1 V, 50 Hz, dará 1 mV de salida (diferencial), que será amplificada por 100 por el amplificador de instrumentación, para dar 100 mV de salida. A vez, la tensión de modo común 1 V a la entrada del filtro dará una salida de modo común de 1 V a su salida, y el amplificador, que tiene un CMRR de 80 dB, dará una salida de  $1 \text{ V}(100/10^4) = 10 \text{ mV}$ . En el peor caso, donde la salida del amplificador debido a la tensión en modo diferencial a su entrada y la tensión debida a la tensión en modo común a su entrada estuvieran en fase, la salida total de 50 Hz sería 100 mV. De poco sirve, pues, un amplificador con un CMRR alto si la etapa previa no tiene un CMRR también muy alto.

9.11 El circuito equivalente para un filtro de paso bajo de primer orden es el mismo que el de la figura 9.13c, por lo que se puede aplicar (9.16) con  $\varepsilon = 0,0001$ , para obtener  $f_c = 70,7f$ .

9.12.1 Dado que no se especifica la capacidad de la entrada del sistema, se puede suponer que es muy pequeña. Entonces basta diseñar un atenuador de continua, capaz de reducir a menos de  $\pm 5 \text{ V}$ , una tensión cuyo valor de pico a pico es de  $\pm 230 \text{ V} \times 2 \times \sqrt{2}$ . Es decir, debe ser  $A = 0,0154$ , y de (9.10) y (9.11) resulta:  $R_1 = 9,85 \text{ M}\Omega$  y  $R_2 = 156 \text{ k}\Omega$ .

9.12.2 Al conectar un condensador en paralelo con la entrada del sistema de adquisición, se formará un filtro de paso bajo de primer orden para las tensiones conectadas a la entrada del atenuador. La resistencia



serie equivalente será  $R_1 || R_2 || R_i \approx R_2$ . La frecuencia de corte del filtro (atenuación de 3 dB) deberá ser  $5 \times 60 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$ . Luego,  $C < 5,3 \text{ nF}$ .

9.12.3 Al conmutar una tensión continua, el circuito equivalente y la evolución de la tensión a la entrada del sistema son los de la figura 9.22. Aplicando (9.22) con  $\tau = (100 \text{ k}\Omega)(10 \text{ nF})$  y  $\varepsilon = 1/2^{12+2}$ , resulta un tiempo de espera de 10,4 ms.

9.13 Para que no se produzcan alias, la amplitud de las tensiones a la entrada del CAD a la mitad de la frecuencia de muestreo ( $1000 \text{ Hz}/2 = 500 \text{ Hz}$ ) deben ser inferiores a  $Q/2$  y así ser imperceptibles para el CAD. Si la señal tiene un ancho de banda de unos 100 Hz, se puede suponer que a 500 Hz no habrá señal sino sólo ruido, cuya amplitud está 40 dB (100 veces) por debajo de la amplitud de la señal. El filtro de primer orden con frecuencia de corte de 100 Hz atenuará aún más el ruido, de modo que a 500 Hz la amplitud de éste será  $40 \text{ dB} + 20 \lg(1/\sqrt{26}) = 54 \text{ dB}$  inferior a la de la señal. Para el CAD, cuyo margen de tensiones de entrada se supone igual a la máxima amplitud de la señal, deberá ser  $20\lg(1/2^{N+1}) > -54 \text{ dB}$ , y de aquí  $N < 8 \text{ bit}$ .

9.14.1 La incertidumbre del CAD es de  $\pm Q/2$  y su tensión de fondo de escala es (aproximadamente)  $2^N Q$ . Para que la incertidumbre referida al fondo de escala sea inferior a la del potenciómetro ( $\pm 0,25 \%$ ), deberá ser  $N > 7,64 \text{ bits}$  (8 bits).

9.14.2 La tensión a la salida del potenciómetro para un desplazamiento de 0,5 m será  $(0,5/1,25)V_{\text{ref}}$ . El número de “cuentas” de salida será 1638 (sobre 4095), y el código binario natural correspondiente, 0110 0110 0110.

9.14.3 El código 1000 1000 1000 corresponde al valor  $2048 + 128 + 8 = 2184$ , y la posición de entrada correspondiente será  $x = (2184/4095) \times 1,25 \text{ m} = 0,6665 \text{ m}$ . Ahora bien, dado que la incertidumbre propia del potenciómetro debida a su no linealidad es de  $1,25 \text{ m} \times (\pm 0,0025) = \pm 3 \text{ mm}$ , la resolución en la posición de su cursor será también de  $\pm 3 \text{ mm}$ . En nuestro caso, pues,  $x = 0,666 \text{ m} \pm 3 \text{ mm}$ .

9.14.4 La resistencia de salida del potenciómetro cuando su cursor está en la posición central es de  $250 \Omega$ . Para que la atenuación debida a la resistencia de entrada del CAD sea inapreciable, deberá ser inferior a  $Q/2$ , donde  $Q = V_{\text{ref}}/2^N$ . Resulta,  $R_i > 1,1 \text{ M}\Omega$ .