

Circuitos de interfaz directa sensor-microcontrolador

© Ferran Reverter Cubarsí y Ramon Pallàs Areny

Versión en español de la obra *Direct sensor-to-microcontroller interface circuits. Design and characterisation* publicada por Marcombo (2005). Traducida por Carlos Román Vázquez Seisedos, Dr. Ing. Profesor Titular, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba (Cuba), y revisada y ampliada por los autores.

© MARCOMBO S.A., 2008

Gran Vía de les Corts Catalanes, 594

08007 Barcelona

www.marcombo.com

Diseño y maquetación: Pol Creuheras Borda

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

ISBN: 978-84-267-1502-9

DL:

Impreso en

Printed in Spain

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Al igual que los seres humanos captamos la información del entorno mediante los sentidos, los sistemas electrónicos de medida y control adquieren la información mediante sensores. Los sensores están presentes en los sistemas electrónicos diseñados para automóviles, aviones, equipos médicos, electrodomésticos, el control de procesos industriales, y otras aplicaciones. Los sensores han devenido esenciales para el funcionamiento cotidiano de nuestras vidas.

La figura 1.1 muestra la estructura general de un sistema electrónico de medida [1]. El sensor convierte la información del mesurando en una señal eléctrica, en general una señal analógica de baja amplitud y con un cierto nivel de ruido. Esta señal es amplificada, filtrada, linealizada y/o demodulada mediante el circuito de acondicionamiento de señal. Después, la señal analógica acondicionada se digitaliza con un convertidor analógico-digital (CAD). Finalmente, un microcontrolador (μC) u otro sistema digital adquiere, almacena, procesa, controla, transmite (a otros dispositivos o sistemas) y/o visualiza el valor digital.

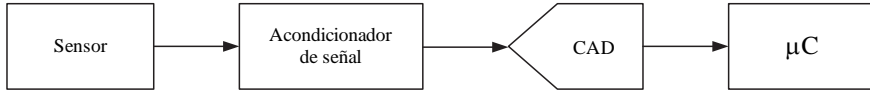


Figura 1.1 Diagrama de bloques de un sistema electrónico de medida clásico.

Los circuitos acondicionadores de señal más empleados para sensores resistivos se basan en divisores de tensión (si la variación de resistencia del sensor es alta) o puentes de Wheatstone (si la variación de resistencia del sensor es pequeña) conectados a amplificadores diferenciales o de instrumentación [2], cuyo precio es significativo para sistemas de bajo coste. Para medir sensores capacitivos con una buena exactitud y resolución, generalmente se usan puentes de corriente alterna o circuitos resonantes [3]. Estas técnicas requieren transformadores, ajustes manuales o ajustes automáticos complejos, que encarecen también el sistema de medida. Estos circuitos de acondicionamiento son aptos para equipos de laboratorio, pero no para aplicaciones de gran mercado.

Para reducir el coste, la complejidad, el consumo de energía y el espacio físico de la cadena de medida de la figura 1.1 se han propuesto nuevas interfaces electrónicas para sensores. Entre ellas destacan las interfaces basadas en un oscilador, que permiten obtener una señal digital sin utilizar el CAD, según muestra la figura 1.2. El oscilador convierte la señal analógica procedente del sensor en una señal con una modulación de un pará-

metro temporal, tal como frecuencia, periodo, ciclo de trabajo o intervalo de tiempo. Este tipo de señales se encuentra a mitad de camino entre las señales analógicas y las digitales, pues son señales analógicas que pueden conectarse directamente a un sistema digital. Por esta razón, estas señales se denominan *señales casi-digitales* [4]. Estas señales presentan además las siguientes ventajas [2]: (a) un margen dinámico grande, ya que, en teoría, no viene limitado ni por la saturación de tensión ni el ruido electrónico, y (b) alta inmunidad al ruido e interferencias.

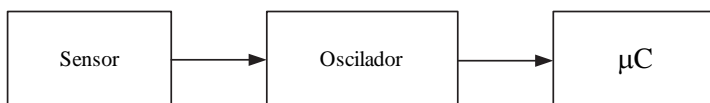


Figura 1.2 Circuito de interfaz basado en un oscilador conectado a un sensor modulador.

Hace más de treinta años ya se predijo que los circuitos de interfaz basados en el método mostrado en la figura 1.2 irían en aumento. Se pronosticó entonces [5]: “Muchas medidas básicas se realizarán mediante técnicas tiempo/frecuencia. Esto ocurrirá debido a la facilidad creciente y a la exactitud obtenida mediante la medida de tiempo/frecuencia (...) Se espera que los contadores y temporizadores sean más pequeños, ligeros y baratos, que proporcionen la lectura directa de la frecuencia y que se usen más de forma global”. Actualmente, los microcontroladores comerciales incluyen contadores y temporizadores que pueden medir fácilmente las señales casi-digitales, así que la predicción, de hecho, se ha convertido en realidad.

Los circuitos osciladores se clasifican en dos grupos [6]: (a) osciladores armónicos o sinusoidales (con una señal de salida sinusoidal), y (b) multivibradores u osciladores de relajación (con una señal de salida cuadrada). Para sensores resistivos y capacitivos, los osciladores de relajación son más fáciles de implementar que los osciladores armónicos. Para medir sensores resistivos también se pueden usar osciladores digitales basados en el principio de carga/descarga de un circuito RC [7].

Los rápidos avances en la tecnología de circuitos integrados (CI) permiten actualmente integrar el sensor y el oscilador de la figura 1.2 en un mismo chip [8], tal como se muestra en la figura 1.3. Estos chips sensores se denominan *sensores casi-digitales* [9], ya que su señal de salida es casi-digital. A veces también son identificados como *sensores digitales*, pero este nombre no es del todo correcto porque su salida no es puramente digital. Actualmente hay múltiples sensores casi-digitales comerciales para diferentes mesurandos y su número está aumentando. Un chip sensor es considerado “inteligente” (en inglés, *smart sensor*) cuando incluye funciones

de captación, interfaz electrónica, calibración e inteligencia (autochequeo, autoidentificación, autovalidación y autoadaptación) [9, 10].

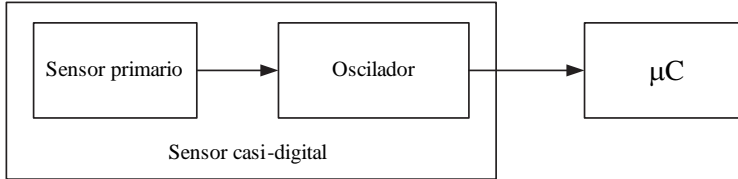


Figura 1.3 Chip sensor casi-digital conectado directamente a un μC .

Diversos fabricantes de microcontroladores proponen en sus notas de aplicación circuitos de interfaz directa entre sensor modulador y μC [11, 12]. En estos circuitos, el μC excita apropiadamente el sensor y éste proporciona una señal de salida casi-digital (es decir, con una modulación de un parámetro temporal) que puede medirse directamente con el μC , según muestra la figura 1.4. En general, el sensor resistivo o capacitivo se inserta en un circuito RC y el μC mide el tiempo de carga o descarga del condensador [13]. El sensor modulador clásico se comporta entonces como un sensor casi-digital.

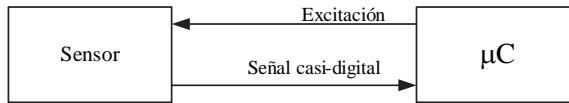


Figura 1.4 Sensor modulador clásico conectado directamente a un μC . El μC excita el sensor y mide la señal de salida resultante.

Los circuitos de interfaz mostrados en las figuras 1.3 y 1.4 son alternativas de diseño simples, compactas y de bajo coste. El circuito de la figura 1.4 tiene la ventaja adicional de emplear solamente dispositivos universales, es decir, un μC de propósito general y un sensor modulador común. Por consiguiente, este circuito de interfaz no depende de los fabricantes de los chips sensores comerciales ni de CI específicos.

Este libro trata los circuitos de interfaz directa entre sensor y μC , tanto para chips sensores (figura 1.3) como para sensores moduladores convencionales (figura 1.4). El término *sensor casi-digital* se usará aquí para ambos tipos de sensores, pues ambos proporcionan una señal casi-digital.

1.2 Definición del problema y objetivos

Los métodos de medida de las figuras 1.3 y 1.4 permiten conectar directamente un sensor a un μC , y obtener así un sistema simple, compacto y de bajo coste. No obstante, estos circuitos no son todavía ampliamente

utilizados en diseños de instrumentación electrónica, quizá por el desconocimiento de sus limitaciones y prestaciones.

En los circuitos de las figuras 1.3 y 1.4, el μC tiene la función de temporizar la señal casi-digital procedente del sensor. Esta temporización o conversión tiempo-digital puede implementarse fácilmente con los temporizadores internos del μC . Sin embargo, las fuentes de incertidumbre asociadas a esta conversión no se conocen con detalle, en especial al temporizar señales con una velocidad de cambio lenta.

El chip sensor del circuito de la figura 1.3 generalmente proporciona una señal cuadrada no sincronizada con la base de tiempo del μC . Estas condiciones reducen notablemente la incertidumbre atribuible a la conversión tiempo-digital. No obstante, la medida está también limitada por las fuentes de incertidumbre que afectan a la generación de la señal casi-digital. La incertidumbre de esta señal limita las prestaciones de la medida aunque la conversión tiempo-digital sea “perfecta”. Lamentablemente, no se conoce con detalle qué factores o eventos afectan, y cómo afectan a la generación de la señal casi-digital.

En el circuito de la figura 1.4, el μC es el responsable de generar y temporizar la señal casi-digital. La señal generada es habitualmente exponencial (resultante de la carga/descarga de un circuito RC) con una velocidad de cambio lenta y sincronizada con la base de tiempo del μC ; estas condiciones son totalmente distintas a las expuestas en el párrafo anterior. El circuito de la figura 1.4 está propuesto en diversas notas de aplicación de microcontroladores, pero sin profundizar en el análisis de sus limitaciones y prestaciones. Este análisis es indispensable para formular reglas de diseño.

Los problemas indicados en los tres párrafos anteriores nos conducen a los siguientes objetivos:

1. Analizar la conversión tiempo-digital implementada por un μC y proponer soluciones de diseño para mejorar sus prestaciones.
2. Caracterizar los circuitos de interfaz directa entre chip sensor y μC (figura 1.3) y proponer reglas de diseño.
3. Caracterizar los circuitos de interfaz directa entre sensor modulador y μC (figura 1.4) y proponer nuevos diseños y/o técnicas de calibración, especialmente para sensores resistivos y capacitivos.

Este libro trata estos temas teórica y experimentalmente.

Un punto de estudio común para los tres objetivos anteriores es el análisis de los efectos de las interferencias superpuestas a la tensión de

alimentación del μC o del sensor. En los componentes analógicos (tales como amplificadores operacionales), el factor de rechazo a variaciones de la tensión de alimentación (PSRR, del inglés *Power Supply Rejection Ratio*) disminuye al aumentar la frecuencia [14]. Sin embargo, mediante un condensador de desacoplamiento entre el terminal de alimentación y masa, que atenúa las altas frecuencias, se obtiene una mejora del PSRR efectivo. El principio de funcionamiento de un microcontrolador o de un chip sensor es muy distinto al de un amplificador operacional y, por lo tanto, su PSRR no necesariamente debe disminuir al aumentar la frecuencia. En consecuencia, el condensador de desacoplamiento para estos dispositivos puede que deba seleccionarse según otros criterios. Un análisis sistemático de la susceptibilidad de estos dispositivos frente a interferencias permitirá resolver esta duda.

1.3 Estructura del libro

Este libro se divide en tres capítulos principales que tratan, respectivamente, los tres objetivos señalados en el apartado 1.2.

El capítulo 2 analiza la conversión tiempo-digital implementada por un μC , en especial cuando se miden señales cuya velocidad de cambio es lenta. En primer lugar, se compara un microcontrolador con un contador universal, en cuanto al principio de funcionamiento y las fuentes de incertidumbre. Después se evalúan dos nuevas fuentes de incertidumbre: (a) interferencias superpuestas a la tensión de alimentación del μC y (b) la actividad de la CPU del μC . Se proponen soluciones de diseño para evitar los efectos de estas fuentes de incertidumbre. Las pruebas experimentales se realizan con dos microcontroladores comerciales: AVR AT90S2313 (Atmel) y PIC16F873 (Microchip).

El capítulo 3 estudia los circuitos de interfaz directa entre chip sensor y μC (figura 1.3). Primero se describen las fuentes de incertidumbre asociadas a la generación de la señal casi-digital (proceso que depende del sensor) y a la temporización de esta señal (proceso que depende del μC). Después se analiza con detalle la susceptibilidad de un chip sensor a variaciones de su tensión de alimentación. Se propone una metodología de análisis del PSRR que es aplicada a chips sensores con distintas modulaciones. Las pruebas experimentales consideran cuatro chips sensores comerciales: ADXL202, TMP04, MAX6676 y SMT 160-30.

El capítulo 4 estudia los circuitos de interfaz directa entre sensor modulador y μC (figura 1.4). En primer lugar se analizan las fuentes de incertidumbre asociadas a la generación y a la temporización de la señal casi-digital; ambos procesos dependen aquí del μC . Después se aplican estos circuitos a la medida de sensores resistivos (simples y tipo puente) y

capacitivos, analizando con detalle los factores que limitan la exactitud y la resolución de la medida. Se proponen soluciones de diseño y técnicas de calibración para mejorar la relación prestaciones-coste de estos circuitos. Las pruebas experimentales usan los dos microcontroladores indicados anteriormente.

1.4 Referencias

- [1] R.J. Hansman, Jr., Characteristics of instrumentation, en: J.G. Webster (Ed.), *The measurement, instrumentation and sensors handbook*, Capítulo 1, CRC Press, N.W. (Florida), 1999.
- [2] R. Pallàs-Areny y J.G. Webster, *Sensors and signal conditioning*, 2ª edición, John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [3] S.M. Huang, A.L. Stott, R.G. Green y M.S. Beck, Electronic transducers for industrial measurement of low value capacitances, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 21 (1988) 242-250.
- [4] P. Hauptmann, Resonant sensors and applications, *Sens. Actuators A* 25-27 (1991) 371-377.
- [5] R.R. Stone, D.H. Phillips y W.B. Berg, Technology forecasts: frequency and time, *Proceedings IEEE Conference on Technology Forecasts and Assess*, New York, USA, 1971, 54-55.
- [6] I.M. Filanovsky, Controlled oscillators and their applicability to sensors, en: L. Ristic (Ed.), *Sensors Technology and Devices*, Capítulo 13, Artech House, Norwood (MA), 1994.
- [7] R. Stone y P.A. Payne, Measurement of the response of resistive sensors using logic oscillators and integrated frequency measurement, *Sens. Actuators A* 76 (1999) 431-436.
- [8] J.H. Huijsing, Signal conditioning on the sensor chip, *Sens. Actuators* 10 (1986) 219-237.
- [9] N.V. Kirianaki, S.Y. Yurish, N.O. Shpak y V.P. Deynega, *Data acquisition and signal processing for smart sensors*, John Wiley & Sons, Chichester (UK), 2002.
- [10] J.H. Huijsing, F.R. Riedijk y G. van der Horn, Developments in integrated smart sensors, *Sens. Actuators A* 43 (1994) 276-288.
- [11] R. Richey, Resistance and capacitance meter using a PIC16C622, AN611, Chandler (AZ), Microchip Technology, 1997.
- [12] L. Bierl, Precise measurements with the MSP430, Report, Texas Instruments, 1996.
- [13] K.M. Daugherty, *Analog-to-digital conversion. A practical approach*, McGraw-Hill, New York, 1995.
- [14] S. Franco, *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*, McGraw-Hill, 3ª edición, New York, 2002.