

Diseño de un Sistema Multicanal para Sensores de Microdeformaciones

G. Miramontes de León*, E. García Domínguez, J. I. de la Rosa Vargas*, C. Sifuentes Gallardo

*IEEE member

Laboratorio de Procesamiento Digital de Señales, Universidad Autónoma de Zacatecas
Zacatecas, Zacatecas, 98000 México

Resumen: Se reporta el diseño de un sistema multicanal para la adquisición y el procesamiento de señales de muy bajo nivel provenientes de sensores de deformación a base de galgas extensiométricas (strain gauges). Se presenta la descripción de los módulos que componen al sistema, las ecuaciones de diseño, y se incluyen los cálculos de resolución, en micras, y del alcance esperado en las mediciones. El sistema se conecta a cualquier computadora personal a través del puerto serie, e incluye módulos de acondicionamiento de señales con capacidad de 8 canales por módulo. Para la multicanalización de los sensores, se propone un puente de resistencias en configuración Chevron, lo cual representa una simplificación tanto en la construcción como en el número de resistencias que lo componen. Además, una vez calibrado, el sistema no requiere de ajuste manual ya que emplea la técnica de puente desbalanceado.

Introducción

En la construcción de modelos estructurales, y al estudiar el comportamiento de modelos estructurales de concreto bajo la acción de cargas laterales cíclicas estáticas, se llevan a cabo experimentos en los cuales una estructura de concreto se somete a cargas y se mide su respuesta (esfuerzo-deformación), mediante el empleo de equipo especializado [1]-[3]. En estos experimentos se hace un uso extensivo de sensores de deformación a base de galgas extensiométricas (GE). En la Figura 1 se muestra esquemáticamente la configuración del experimento, en donde las GE son adheridas al acero de refuerzo de la estructura de concreto; P1 y P2 son los dispositivos empleados para aplicar la carga F, y M son manómetros que permiten medir la carga aplicada. Estos experimentos requieren de sistemas de instrumentación científica capaces de monitorear, simultáneamente, en un cierto número de puntos, generalmente más de 10, la deformación que sufre la estructura bajo la carga aplicada.

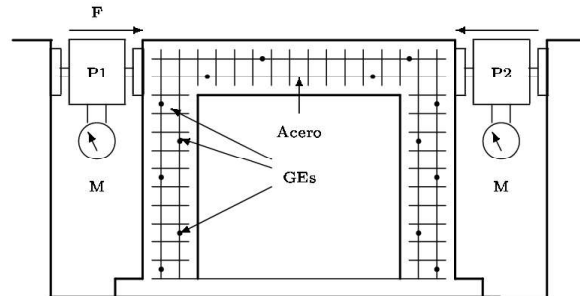


Fig. 1 Diagrama Esquemático del experimento.

Aun cuando las deformaciones pueden ser medidas por sensores capacitivos, de reluctancia, o aun más por métodos ópticos (photo-stress) [4], el uso de GE basadas en la resistencia eléctrica son, probablemente, el método más común de medición en el análisis experimental de micro-deformaciones [5]. La GE es un elemento sensor de deformaciones, las cuales están definidas como la razón del cambio en la longitud deformada a una longitud inicial, sin deformación, de referencia. El sensor responde a este cambio y lo convierte a una señal eléctrica. Esto se puede realizar debido al hecho de que la GE cambia su resistencia eléctrica en tanto se somete a una compresión o una distensión (efecto piezoresistivo) [6].

El desarrollo del artículo es como sigue, primero se discuten los dos métodos más empleados para la medición de deformaciones a base de GEs, y las razones para seleccionar el método de puente desbalanceado. En la siguiente sección, se presenta la descripción de los módulos que componen al sistema. La aplicación de las ecuaciones de diseño se presenta enseguida, en donde se incluyen los cálculos de resolución y del alcance esperado en las mediciones. Las especificaciones del instrumento se dan en la sección de especificaciones y finalmente, en la sección Conclusiones, se dan las conclusiones y se describe el trabajo a desarrollar.



Métodos de medición con GE

La medición de micro-deformaciones implica medir muy pequeños cambios de resistencia. El puente de Wheatstone es un circuito muy útil para este propósito. Consecuentemente, se presenta el problema de la medición de muy pequeños cambios de tensión, que podrá ser de unas decenas o centenas de microVolts (μ Volts) a unos cuantos miliVolts (mVolts). Por otro lado, uno de los elementos más versátiles para medir deformaciones son las GE adheribles. Así pues, un puente de Wheatstone y GE adheribles son elementos muy comunes en pruebas de deformación en análisis estructural.

Existen dos métodos para indicar la deformación cuando se usa un puente de Wheatstone. Las mediciones de tipo balanceado o de indicación nula, que involucran elementos electromecánicos y humanos para balancear el puente [7],[8], desplegando el cambio requerido en la resistencia en micro-deformaciones ($\mu\epsilon$). El segundo método emplea un indicador con una escala calibrada en $\mu\epsilon$ que responde a la tensión de salida del puente. Este método supone una relación lineal entre la tensión de salida y la deformación, un puente inicialmente balanceado, y una tensión aplicada V_{exc} conocida. Aun cuando se sabe que esta relación es no-lineal, la suposición de linealidad es válida en unos pocos miles de $\mu\epsilon$.

El diseño propuesto se basa en una técnica de puente desbalanceado lo que elimina los ajustes manuales. Es importante hacer notar que en equipos comerciales de muy alto costo, se emplea con cierta frecuencia el método del puente balanceado, lo que dificulta la automatización de las mediciones. En el caso de tener un número significativo de canales, se requerirá de mucho tiempo para ajustar manualmente el puente y así poder tomar las lecturas. Existen módulos comerciales para la detección y medición de la salida del puente, como por ejemplo los módulos de acondicionamiento de señales de Analog Devices, modelos 2B30 (para GE) y 2B31 (para transductores de presión). Sin embargo, el costo de estos módulos es prohibitivo, especialmente si se desea un número de canales relativamente grande.

Descripción del sistema

El diseño del sistema completo incluye módulos de acondicionamiento analógico de señales (MAAS), y un módulo nodriza (MN) en el que se reciben las señales de los módulos analógicos y son convertidas a una señal digital. El MN incluye un trasplano con receptáculos para los MAAS. Desde el MN se establece la comunicación con una computadora personal (PC) en donde se realizará el almacenamiento y análisis de las señales para determinar el valor de la deformación. El sistema incluye una aplicación para el ambiente Windows, la cual presenta una interfase gráfica para controlar las mediciones y el sistema electrónico.

Módulo nodriza

Este módulo representa la interfase eléctrica entre el sistema y una computadora personal. El módulo contiene las líneas de control y de conversión analógico a digital (A/D). Además, presenta un tras-plano con 8 conectores que permiten la inserción de los MAAS. En la Figura 2 se muestra el diagrama esquemático del MN.

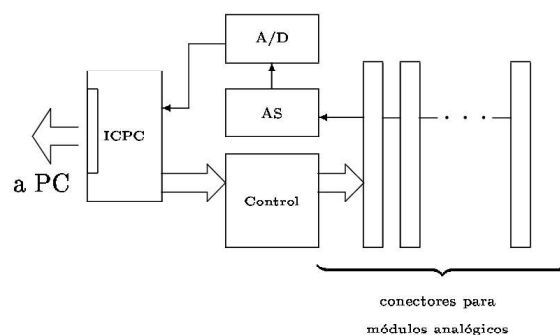


Fig. 2 Diagrama a bloques del Módulo Nodriza.

La base del MN es un microcontrolador PIC 16F877A de Microchip. El PIC incluye 8 entradas analógicas con convertidores de 10 bits. De las 8 entradas analógicas se emplean dos para ajustar el nivel de referencia de los convertidores A/D. Empleando un decodificador de 3-a-8 líneas, que en la Figura 2 se muestra como el bloque de Control, es posible habilitar hasta 64 canales



de los cuales sólo 48 serán empleados como entrada al PIC. Así pues, tres puertos de salida del PIC se usan para seleccionar uno de los 8 canales, en cada MAAS en un multicanalizador diferencial (MUX). El diseño del MN soporta solamente 6 módulos analógicos. Finalmente, el sistema se comunica hacia la PC por medio de la interfase de comunicación serie.

El módulo de acondicionamiento de señales

La base del procesamiento analógico de las señales es un puente de Wheatstone en configuración Chevron para 8 canales. Los canales son multicanalizados a un amplificador de instrumentación (AI) AD620. En la Figura 3 se muestra el diagrama a bloques del módulo de acondicionamiento de señales para 8 canales.

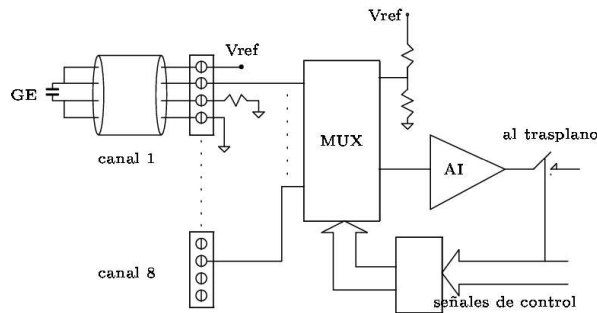


Fig. 3 Diagrama a bloques del MAAS.

En el MASS, el AD620 puede ser ajustado a una ganancia de 50 y de 100. Finalmente, las GE se conectan empleando cable blindado para eliminar ruido, sujetando los alambres de la GE y del blindaje a conectores con cuatro tornillos.

Principio de operación

En sistemas automatizados para la adquisición de señales que incluyen un gran número de canales, el empleo de una computadora como parte integrante del instrumento puede simplificar y aumentar la exactitud de las mediciones, además de permitir el almacenamiento de grandes cantidades de datos. Igualmente, se facilita grandemente las mediciones

sobre un puente de Wheatstone, el cual se muestra en la Figura 4, cuando se trabaja con la técnica de puente desbalanceado.

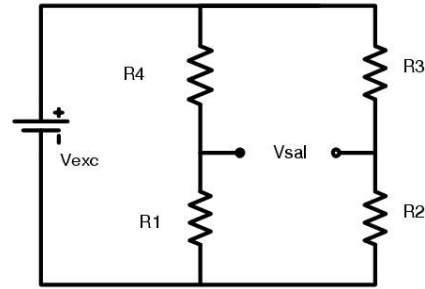


Fig. 4 Configuración del puente de Wheatstone.

Para una configuración de 1/4 de puente, la tensión de salida depende de los valores de la tensión de excitación, V_{exc} , las resistencias de las ramas del puente, R_1 , R_2 , R_3 , y de la resistencia de la GE, en donde $R_4=R_g$ es la resistencia de la GE.

La tensión de salida está dada por:

$$V_{sal} = (R_1/(R_1+R_g) - R_2/(R_2+R_3)) V_{exc} \quad (1)$$

La ecuación (1) es válida tanto para la condición deformada como para la condición no deformada de la GE, y se espera una lectura válida siempre y cuando R_1 , R_2 , y R_3 se mantengan sin cambio durante la medición.

Sea V_d la diferencia entre las lecturas con deformación y sin deformación. Definimos V_d como:

$$V_d = (V_{sal}/V_{exc})_{def} - (V_{sal}/V_{exc})_{no-def} \quad (2)$$

Sustituyendo los valores de las resistencias de la (1) en (2) podemos obtener una expresión para $\Delta R_g/R_g$:

$$\Delta R_g/R_g = -4 V_d / (1+2 V_d) \quad (3)$$

en donde ΔR_g representa el cambio en la resistencia de la galga.

Además, el coeficiente de la GE (FG), está dado por

$$FG = (\Delta R_g/R_g)/\epsilon \quad (4)$$



en donde, ϵ = valor de la deformación en [mm/mm] o [in/in]. Entonces, podemos escribir una expresión para la micro-deformación como:

$$\mu\epsilon = -4V_d / [FG (1+2V_d)] \times 10^6 \quad (5)$$

Resolución y alcance de medición

En la construcción del puente de Wheatstone, se propone el empleo de resistores de alta precisión con 0.1% de tolerancia y un coeficiente de temperatura de 25 ppm/°C. Un valor estándar para la GE es el de 120 Ohms, entonces para el peor caso, bajo condiciones de puente desbalanceado, la salida será

$$V_{peor} = 120.12/(240) - 119.5/(240) \\ = 0.001 \times V_{exc}$$

Usando una referencia de 5 Volts la salida para el peor caso será de 5 mV. Con resistencias cuya tolerancia sea mayor, por ejemplo ± 0.5 Ohms, la salida puede ser tan alta como 9 mVolts. En muchos casos prácticos se tiene normalmente una salida de 2mVolts/Volt en la referencia, así que con una referencia de 5 Volts, la salida desbalanceada sin deformación será de 10 mV, la cual será amplificada por el AI.

La resolución será la mínima deformación que se puede medir. Las características de resolución y alcance del convertidor A/D son determinantes en la resolución del sistema. Para nuestro caso la resolución es de 5/1024, es decir 4.88mV, y se desea un alcance de ± 2.5 Volts.

Empleando un amplificador de instrumentación (AI) con ganancias, de $G=50$ y $G=100$, la resolución y salida máxima, suponiendo $V_{sal}=0$, salida completamente balanceada sin deformación, se calculan como sigue:

Para $G=50$ y un $FG=2$, la resolución es:

$$V_d = 0.00488/(50/5) - 0/(50/5) = 19.52 \times 10^{-6}$$

en donde el valor 0.0048 corresponde a la condición de puente desbalanceado, y en donde además se ha incluido la ganancia del AI.

Entonces

$$\mu\epsilon = -4 (19.52 \times 10^{-6}) / [2(1+2 \times 19.52 \times 10^{-6})]$$

$$\approx -39.038 \mu \text{ [in/in] o [mm/mm]}.$$

La salida máxima será:

$$V_d = [2.5/(50/5)] - [(0.005)/(50/5)] \\ = 9.98 \times 10^{-3},$$

entonces

$$\mu\epsilon = -4 (9.96 \times 10^{-3}) / [2(1+2 \times 9.96 \times 10^{-3})] \\ \approx -19569 \mu \text{ [in/in] o [mm/mm]}.$$

Para una ganancia de 100 y $FG=2$, la resolución será:

$$V_d = 0.00488/(100/5) - 0/(100/5) \\ = 9.76 \times 10^{-6},$$

entonces

$$\mu\epsilon = -4 (9.76 \times 10^{-6}) / [2(1+2 \times 9.76 \times 10^{-6})] \\ \approx -19.51 \mu \text{ [in/in] o [mm/mm]}.$$

La salida máxima será para este caso:

$$V_d = 2.5/(100/5) - 0.05/(100/5) \\ = 9.98 \times 10^{-3},$$

entonces

$$\mu\epsilon = -4 (9.98 \times 10^{-3}) / [2(1+2 \times 9.98 \times 10^{-3})] \\ \approx -19579 \mu \text{ [in/in] o [mm/mm]}.$$

El signo negativo indica compresión.

En una prueba preliminar, se compararon algunas mediciones realizadas con un instrumento comercial (VISHAY) y el diseño propuesto. Después de varias lecturas se promediaron los resultados y se obtuvo la relación sistema-propuesto/VISHAY, obteniéndose una diferencia máxima de 3%. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Comparación de lecturas entre el sistema propuesto y un sistema comercial

Juego de pruebas	Carga [Kg.]	Deformación $\mu\epsilon$	Razón del Promedio de lecturas Sistema-propuesto/VISHAY
1	6.213	75	1.03
2	9.647	170	1.025



Especificaciones finales

Basados en las ecuaciones de diseño, así como en las especificaciones del fabricante para el AI y las GE, se espera obtener las siguientes especificaciones:

Resolución de medición = 19 μe

Alcance de la medición = 19579 μe

Impedancia de entrada = 10 MOhms

Número de canales = 8 canales por módulo MAAS

Excitación del puente = 5 V \pm 2%

Diafonía = - 40 dB

No-linealidad del amplificador = 10 ppm a 25 °C

Error de ganancia del amplificador = \pm 0.15% a 25°C

Conclusiones y trabajo futuro

Se presentó el fundamento teórico y el diseño de un sistema multicanal para el procesamiento analógico de señales de muy bajo nivel para galgas extensiométricas. Este sistema es potencialmente útil en pruebas de resistencia de materiales y análisis estructural. Su operación basada en una PC permitirá la realización automatizada de pruebas de laboratorio a un costo muy razonable, ya que se espera que el producto final sea competitivo en precio y en prestaciones comparado con equipos comerciales.

Como trabajo futuro, se modificará la comunicación serie con la PC del estándar RS232 a un estándar USB para que el instrumento sea compatible con las actuales exigencias del equipo de cómputo tanto de escritorio como de equipos portátiles. Como vía para aumentar la resolución del sistema se puede reemplazar el PIC por una versión que contenga convertidores AD de 12 bits, para tener una resolución menor a 5 μe .

Referencias

- [1] Miramontes, D. y Ramírez, H. "Losas delgadas aligeradas", Revista IMCyC No. 160, Vol. 22, México D.F. p.-23-26, (1984).
- [2] Miramontes, D. "Ensayos de cortante directo en modelos de reparación viga-muro", IV Foro Interno de Investigación de la UAEM, Fac. de Ingeniería-Secretaría Académica-Coordinación de Investigación Científica, UAEM, Toluca, Mex. (1987).

- [3] Martínez, J. E., Miramontes, D., Ramírez, H. "Comportamiento ante carga lateral de los edificios a base de losa plana reticular", Reunión regional de la V Zona de ANUIES, de la Academia sobre Investigación en Vivienda, Fac. de Ing. UAEM, 9--10 Marzo, Toluca, Mex., (1990).
- [4] V.N Vazirani, S.P. Chandola, *Experimental stress analysis*, Khanna Publishers, Delhi, 2nd. Edition, (1980).
- [5] R. G. Budinas, *Advanced strength and applied stress analysis*, Mc Graw Hill Kogakusha, Intl. Student edition, (1977).
- [6] W. J. Tompkins, John G. Webster, Editors, "Interfacing Sensors to the IBM PC", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, (1988) p. 253.
- [7] Analog Devices, *Transducer Interfacing Handbook*, (1980) p. 32.
- [8] H. N. Norton, *Sensor and analyzer handbook*, Prentice-Hall, (1982), pp. 155-165.

Gerardo Miramontes de León

Ingeniero Electricista egresado de la Universidad Autónoma de Zacatecas en 1983. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Electrónica en 1988 por la Universidad Autónoma de Nuevo León, y el Doctorado en el año 2000 en el Electrical and Computer Engineering Department, North Dakota State University, USA. Ha sido investigador asociado en CICESE (1988-1990), y profesor visitante en California State University, Chico (1993), y North Dakota State University (1997-2000).

Dirección del autor: Laboratorio de Procesamiento Digital de Señales, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, UAZ, López Velarde 801, Zacatecas, Zac. 98000.

Tel: (492) 923.94.07 ext.1518

email: gmiram@ieccc.org