

Extensómetro para prueba dinámica de materiales

M.N. López López* y J. Urías

*Instituto de Física "Manuel Sandoval Vallarta"
Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
78000 San Luis Potosí, SLP*

(Recibido el 25 de abril de 1989; aceptado el 20 de julio de 1989)

Resumen. Se presenta la electrónica de un instrumento para medir microdeformaciones en materiales sometidos a cargas mecánicas usando galgas extensométricas (strain gages) como transductores. Se utiliza un puente en régimen de corriente constante que da una respuesta lineal en un rango de deformaciones hasta del 5% y se emplea una técnica de detección sincrónica robusta al ruido que permite alcanzar una sensibilidad de unas cuantas decenas de partes por millón. El extensómetro no requiere *ajuste a cero* en cada lectura, haciéndolo especialmente útil para prueba dinámica de materiales. Se comparan las lecturas del extensómetro con las de uno comercial, coincidiendo ambas en 7 ppm en promedio. Se presentan los resultados de un prueba a flexión de una probeta de acero y se discuten algunas de las aplicaciones del extensómetro.

PACS: 46.30.Rc; 84.30.Wp

1. Introducción

En metalurgia y en las ingenierías mecánica y civil es muy frecuente e importante efectuar pruebas [1,2] para determinar qué tipos de esfuerzos se generan en los materiales sometidos a diferentes tipos de cargas mecánicas. Esta información es indispensable por ejemplo en el diseño y construcción de máquinas y estructuras mecánicas para asegurar que, en condiciones normales de operación, los diferentes elementos no sean llevados más allá de un régimen elástico provocándose con ello una deformación plástica o una fractura. Además, aun operando en régimen elástico es importante determinar cómo se distribuyen en un elemento los esfuerzos generados por las cargas. La medición de microdeformaciones es el punto de partida para el análisis de esfuerzos con el fin de determinar posibles zonas de deformación plástica o fractura y obtener una estimación del tiempo medio de vida del elemento a prueba [1]. Los transductores de uso más extendido para el análisis experimental de esfuerzos mecánicos son las llamadas galgas extensométricas (strain gages) [3]. El principio de operación de las galgas es producir cambios en su resistencia eléctrica proporcionales a las pequenísimas deformaciones de los materiales sometidos a cargas mecánicas. Además de las aplicaciones en metalurgia y en las ingenierías ya

*Becario de la DGICySA de la SEP.

mencionadas, las galgas tienen una multitud de otras aplicaciones [4]; por ejemplo, es común encontrarlas en transductores de presión y de posición.

En este artículo se presenta un extensómetro que usa galgas como transductores, capaz de medir deformaciones relativas desde algunas decenas de parte por millón y de una manera dinámica, esto es, el instrumento es capaz de seguir la variación instantánea de la deformación del material al variar la carga. El extensómetro da un voltaje en el rango de ± 2.5 V que es proporcional a la deformación en tres escalas (A,B, y C) de sensibilidad diferentes. Utilizando un graficador de amplitud contra tiempo o de preferencia digitalizando los datos y capturándolos con una microcomputadora [5] es posible estudiar con este extensómetro, por ejemplo, la distribución de esfuerzos en los elementos de una máquina en diferentes momentos de su ciclo de operación [1]. Por otra parte, si se utiliza un método de captura digital de datos [5], es posible con el extensómetro registrar la respuesta de estructuras mecánicas ante impactos [2,6,7] y, efectuando un simple análisis de Fourier [6], determinar los modos más importantes y sus amplitudes relativas en distintos puntos de la estructura [2].

2. Principio de operación

El principio de operación [1,3] de las galgas como transductores es el aumento en la resistencia eléctrica de un conductor filamentario que al ser estirado aumenta su longitud y reduce su sección transversal. Lo común es utilizar las galgas en un régimen elástico de manera que al retirar la carga el filamento de la galga recupera tanto su forma como su resistencia eléctrica originales. En estas condiciones los cambios son lo suficientemente pequeños como para que la relación entre el cambio de la resistencia eléctrica y la deformación del material sea lineal.

Definimos la deformación elástica, l , de un material sometido a un esfuerzo mecánico como el porcentaje

$$l \equiv 100 \frac{\Delta L}{L}, \quad (1)$$

siendo L la longitud de la galga sobre el elemento libre de carga y ΔL el cambio en su longitud, L , producido por la carga aplicada. Como ya se dijo, en operación normal tanto l como el correspondiente porcentaje,

$$r \equiv 100 \frac{\Delta R}{R}, \quad (2)$$

en que cambia la resistencia eléctrica R de la galga, son muy pequeños y la relación entre ellos es lineal. El factor de conversión $l \rightarrow r$

$$K \equiv \frac{r}{l}, \quad (3)$$

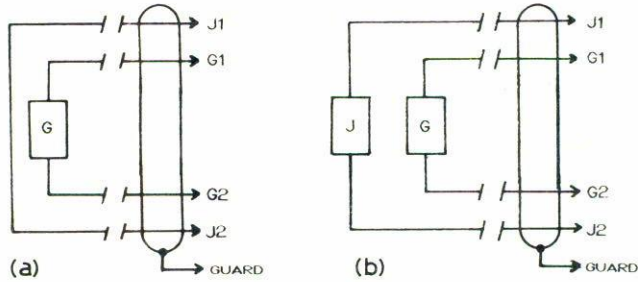


FIGURA 2. Configuraciones de uso del extensómetro. (a) una y (b) dos galgas.

El corazón del instrumento es un puente alimentado con una señal de baja frecuencia (menor que 1 kHz). El voltaje de desbalance es tomado por un amplificador de instrumentación que tiene un alto rechazo de señal en modo común y que no requiere de componentes de precisión [10]. Para limpiar de ruido la señal [9], la salida del amplificador se multiplica por una onda cuadrada de amplitud unitaria y que está en fase con la alimentación del puente; el mezclador que hace esta operación es muy sencillo, construido con interruptores C-MOS. La salida del mezclador es pasada por un filtro pasa-bajos cuya constante de tiempo se ajusta según las necesidades.

En la Fig. 1 se muestra el circuito completo del extensómetro. Los cuatro conectores J1-2 y G1-2 permiten completar con elementos externos las dos ramas de un puente. El circuito integrado (CI) 555 proporciona una onda cuadrada que conmuta entre ± 5 V con la que se alimenta el puente. Las dos resistencias de 47 k conectadas a las terminales J1 y G1 son los elementos superiores de las ramas J y G del puente, respectivamente. Como el puente opera a corriente constante no se requiere que estas resistencias sean de precisión; sin embargo, sí es importante que tengan el mismo coeficiente térmico y que se les mantenga a la misma temperatura; es decir, en buen contacto térmico, unidas, por ejemplo, por una cinta de aluminio.

La Fig. 2 muestra las dos posibles configuraciones en las que se puede completar el puente con elementos externos. La conexión de la Fig. 2a corresponde a una configuración que utiliza una sola galga. La rama G se completa con una galga, indicada como el bloque G en la Fig. 2a. En la rama J el cable que va de las terminales J1 a J2 se utiliza solamente para asegurar que el ruido captado por las ramas G y J sea el mismo y así mantener al máximo en modo común al ruido, evitando contaminar el modo diferencial. La rama J del puente la completa un helipotenciómetro de 1 k que se ajusta a la resistencia de la galga a carga mecánica nula para balancear el puente a cero deformación.

La Fig. 2b muestra la conexión para una configuración que utiliza dos galgas. Las dos ramas J y G son ahora completadas por sendas galgas: los bloques J y G en la Fig. 2b, respectivamente. En esta configuración el helipot se ajusta a cero resistencia de manera que internamente el conector J2 quede conectado directamente a tierra (si las galgas J y G son idénticas). La configuración de dos galgas es de uso muy común [1] para, por ejemplo, compensar los cambios en resistencia de las galgas por temperatura y/o medir diferencia de esfuerzos en dos direcciones diferentes sobre el elemento a prueba.

La señal de desbalance, proporcional a la deformación de la galga, es tomada entre G1 y J1 por los amplificadores A1 y A2. La configuración formada por A1 y A2 es un amplificador con una alta ganancia en modo diferencial y con ganancia unitaria en modo común. El amplificador A3 sensa el remanente de señal a modo común y la retroalimenta por inducción a los cables de conexión a las galgas mediante el blindaje de los mismos cables conectado al contacto marcado como "guard" (véase la Fig. 2). Esto logra reducir aún más la señal a modo común debida a capacitancias distribuidas, muy especialmente cuando los cables de conexión a las galgas son de varios metros. El amplificador A4 forma una configuración diferencial ordinaria que termina por eliminar cualquier señal remanente en modo común.

El potenciómetro de 10 k se ajusta para eliminar cualquier componente de voltaje continuo a la salida de A5. Para esto, se puentean los cuatro conectores J1-2 y G1-2 y se ajusta el potenciómetro para que las salidas de A5 y del filtro pasabajos sea de cero volts.

Las etapas de amplificación terminan con el amplificador A5 que proporciona tres ganancias diferentes mediante las tres posiciones del interruptor K, que corresponden a tres escalas de sensibilidad diferentes del extensómetro (A, B y C). A la salida de A5 se tiene la señal de desbalance amplificada y, aunque se trató de eliminar el ruido en modo común al máximo, viene aún contaminada. La extracción final de la señal útil del ruido se hace con un mezclador y un filtro pasabajos [9].

El amplificador A6 junto con los interruptores analógicos (CI 4066) y los inversores lógicos forman un sencillo mezclador. La entrada al filtro pasabajos, formado por A7, es tomada alternadamente de A5 o de A6 (invertida respecto a la de A5) mediante los interruptores analógicos (CI 4066) según sea el signo de la referencia, que viene de la terminal 3 del CI 555 a través de la resistencia de 10 k. Nótese que en la manera en que se han conectado los inversores lógicos al CI 4066, cuando uno de los interruptores conduce el otro está abierto, alternándose los estados de conducción en sincronía con la señal de referencia. Lo que se logra con esto es equivalente a multiplicar la salida de A5 por ± 1 de acuerdo con la referencia. El filtro pasabajos puede así eliminar cualquier señal que no sea coherente con la referencia. Los valores mostrados en la Fig. 1 para las componentes del filtro pasabajos dan una constante de tiempo de 2 Hz. En las pruebas de carga estática que se reportan en la siguiente sección (véanse las Figs. 3 y 4) se utilizó una constante de tiempo de 200 Hz. En realidad, la constante de tiempo del filtro pasabajos debe ser ajustada para cada aplicación específica mediante un compromiso entre velocidad de respuesta y razón de señal a ruido.

Escalas	A	B	C
ρ [volts ⁻¹]	0.1234	0.252	0.5239

TABLA I. Factor ρ para obtener el valor de r correspondiente a la lectura de volts dada por el extensómetro en sus escalas A-C. Para hacer la conversión a por ciento de deformación véanse las Ecs. (4) y (5).

4. Resultados y conclusiones

El extensómetro se calibró utilizando una década de resistencias de precisión (Decabox modelo DB62) en la configuración de una sola galga (véase la Fig. 2a). La respuesta fue perfectamente lineal en las tres escalas. Los detalles de la calibración se presentan en la Ref. [11].

El factor ρ , para convertir la lectura, V , en volts a por ciento en cambio de resistencia eléctrica, $r = 100\Delta R/R$, obtenido de la calibración se muestra en la Tabla I (la constante de tiempo del filtro pasabajos que se utilizó fue de 5 ms). Según las definiciones dadas en las Ecs. (1-3), el factor δ para convertir una lectura, V , en volts a por ciento de deformación, $l = 100\Delta L/L$, es simplemente

$$\delta = \frac{\rho}{K}, \quad (4)$$

tal que

$$l = \delta V. \quad (5)$$

Nótese que el valor específico para δ depende de cuál sea el factor K de la galga utilizada. El valor de K lo proporciona el fabricante de las galgas.

A fin de probar nuestro instrumento y verificar su calibración, sus lecturas se compararon con las de un extensómetro comercial, el modelo P-350A de Vishai Instruments Inc., hechas en una planta industrial sobre la misma probeta y en las mismas condiciones de carga aplicada. La Fig. 3 muestra los resultados de la comparación. Las ordenadas son las lecturas con el extensómetro comercial y las abscisas con las lecturas con el extensómetro a prueba. Los puntos son las mediciones hechas y la línea recta es un ajuste por mínimos cuadrados de los datos. Si los dos instrumentos dieran lecturas idénticas, la pendiente de la recta sería exactamente la unidad. El ajuste por mínimos cuadrados dio una pendiente de 0.992 ± 0.007 , que no es muy diferente de la unidad; es decir, para todo fin práctico, las lecturas de los dos instrumentos son las mismas. Con la ventaja sobre el P-350A de que el extensómetro que estamos reportando no requiere de un ajuste a cero en cada una de las lecturas, cualidad que lo hace particularmente útil para el estudio dinámico de esfuerzos [6,7], por ejemplo, en elementos de máquina durante sus ciclos de operación [1].

Finalmente en la Fig. 4 se presentan las mediciones efectuadas sobre una probeta de acero sometida a cargas flexionantes. Los puntos llenos son las mediciones con nuestro extensómetro, los puntos huecos son las mediciones efectuadas con el modelo

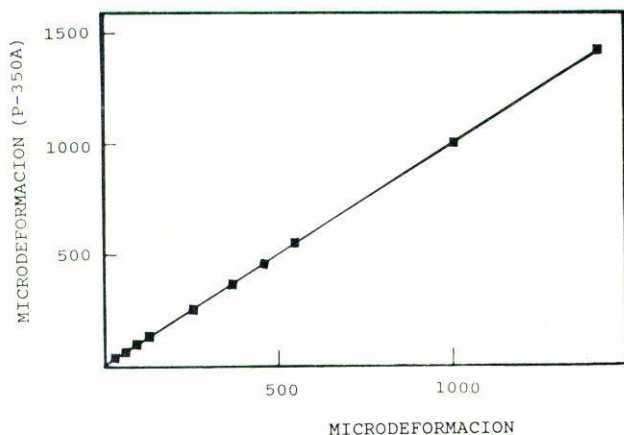


FIGURA 3. Comparación entre las mediciones del extensómetro y las de un instrumento comercial de Vishai Instruments Inc., modelo P-350A. La línea es un ajuste por mínimos cuadrados a los datos; su pendiente es de 0.992 ± 0.007 , es decir, para todo fin práctico los dos instrumentos dan mediciones idénticas.

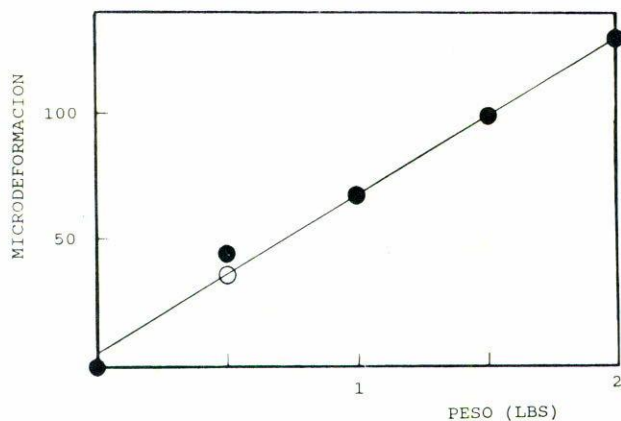


FIGURA 4. Resultados de una prueba a flexión de una probeta de acero. Nótese lo pequeño de las cargas utilizadas.

P-350A. A excepción del punto a 0.5 lb, las mediciones de ambos instrumentos se confunden. Las pruebas se efectuaron en las instalaciones de una planta industrial donde las condiciones de ruido eran extremas y las cargas aplicadas fueron muy pequeñas (véase la Fig. 4). Los efectos del ruido pueden reducirse si se aumenta la constante de tiempo del filtro pasabajos. Las mediciones mostradas en la Fig. 4 se

obtuvieron con una constante de tiempo de 0.5 ms. Sin embargo, aumentar en exceso la constante de tiempo del filtro pasabajos puede hacer que el instrumento tenga una respuesta demasiado lenta. Según sea la aplicación específica del extensómetro, la constante de tiempo debe elegirse mediante un compromiso entre velocidad de respuesta y reducción de ruido.

En conclusión, se ha presentado en detalle la electrónica necesaria para medir microdeformaciones en materiales sometidos a cargas mecánicas, utilizando galgas como transductores. El instrumento no requiere un ajuste a cero en cada lectura lo que le permite seguir la variación instantánea de las deformaciones al variar la carga sobre el elemento a prueba. Las pruebas realizadas mostraron que las mediciones del instrumento coinciden hasta 7 ppm con las de uno comercial de alta precisión.

La electrónica del extensómetro es de muy fácil implementación y además de las aplicaciones ya mencionadas, puede ser de gran utilidad en una amplia variedad de situaciones. Por ejemplo, en la construcción de transductores para presiones desde bajas (pegando las galgas a un diafragma), medianas (pegando las galgas a un tubo helicoidal de Bourdon) o ultraaltas (pegando las galgas en una columna de acero); para la cuantificación de impactos; para el análisis armónico de estructuras sometidas a cargas dinámicas; para el análisis de esfuerzos en elementos de máquina durante sus ciclos de operación; para la medición y control de posición en el rango de decenas de micras; para la medición de tensión dinámica, etc. Adaptando varios extensómetros a un sistema de digitalización y captura de datos por microcomputadora [5] es posible manejar un conjunto grande de galgas para monitorear simultáneamente múltiples puntos de una estructura, almacenar las mediciones en disco magnético y hacer un análisis de esfuerzos o de Fourier.

5. Agradecimientos

Quisiéramos expresar nuestro agradecimiento a los Ings. Roberto Alemán López y Rafael Soto Reyes del Laboratorio de Ingeniería del Producto de Bendix Mexicana (San Luis Potosí) por su amable colaboración y todas las facilidades proporcionadas en la realización de algunas de las pruebas. Al M. en C. Benito Pineda en la FC-UASLP le agradecemos su colaboración en la manufactura del circuito impreso. El presente trabajo se inició a partir de una sugerencia del Ing. Raymundo Fernández de la FI-UASLP. Finalmente quisiéramos agradecer la cooperación del Ing. David Atisha y del Dr. Jesús Leyva, también de la FI-UASLP.

Este trabajo fue apoyado por la Dirección General de Investigación Científica y Superación Académica de la SEP a través del convenio clave C88-03-0067; en particular MNLL agradece la beca recibida a través de éste convenio para la realización de su trabajo de tesis (FI-UASLP).

Referencias

1. J.W. Dally and W.F. Riley, *Experimental stress analysis*. McGraw Hill (1985).
2. E. Alvarez Alarcón, *Cálculo matricial de estructuras*. Editorial Reverté (1986).

3. Cf. ref. [1], Chapter 6 on Electrical-resistance strain gages, pp. 153-203.
4. Véase por ejemplo C.A. Schuler and W.L. McNamee, *Industrial electronics and robotics*. McGraw-Hill (1986).
5. F. Ruíz and J. Urías, Inexpensive data-acquisition and automation system: characterization of semiconductor devices. Submitted to Premier Congres Francophone sur la Robotique Pedagogique (Le Mans, France 1989).
6. L. Meirovitch, *Elements of vibration analysis*, Mc Graw-Hill (1986).
7. L. Alejandro Robledo y Frederick Golden, Simulación de estructuras sometidas a cargas dinámicas. *Bol. Soc. Mex. Fis.* **2** (1988) S24.
8. Para formarse una idea clara de los problemas de ruido eléctrico en el uso de las galgas como transductores, véase la Ref. [1], pp. 259-261.
9. H. Taub and D.L. Schilling, *Principles of communication systems*, 2nd. edition, Mc Graw-Hill (1986). Section 11.6 on "Coherent reception: correlation".
10. P. Horowitz and W. Hill, *The art of electronics*. Cambridge University Press (1980).
11. Manuel N. López, Tesis de Ingeniería, FI-UASLP. En redacción (1989).

Abstract. The electronics for a conditioner-amplifier for use with resistance strain-gage transducers is presented. Constant current bridge configurations are used to get a linear response and a simple method of phase sensitive signal detection provides a huge reduction of noise. Strains measured with the instrument match those of a commercially available bridge up to 7 ppm in the average. The sensitivity attained by the instruments is of the order of tens of microstrains. Finally, strain measurements in a steel beam in bending are reported.