

ACONDICIONADOR DE SEÑALES PARA TRANSDUCTORES 'STRAIN GAUGE' CON MICROCONTROLADOR

Ing. Irene Alvarado de Ch.
Ing. Italo Chinchay U.
UNIVERSIDAD DE PIURA
PERU

RESUMEN

El Acondicionador de señales para transductores "strain gauge" con microcontrolador, es un instrumento diseñado y construido para realizar la medida de deformaciones y esfuerzos mecánicos utilizando: bandas extensométricas ("strain gauge") o transductores del tipo "strain gauge" en elementos sometidos a una carga estática.

El tratamiento de la señal sigue dos etapas: el procedimiento convencional para el tratamiento de voltajes diferenciales pequeños; y el control y evaluación de un sistema microcontrolador.

El equipo acondicionador presenta la característica de evaluar en unidades de microdeformaciones la deformación mecánica de un elemento, o en unidades de carga si reuniera las condiciones establecidas de uniformidad en su estructura; utilizando una, dos o cuatro bandas extensométricas, además de leer transductores en las unidades correspondientes especificadas en el equipo. Los parámetros de las bandas o los transductores son ingresados por teclado y las medidas requeridas son presentadas en una pantalla de cristal líquido.

Se han realizado varios pruebas, las cuales muestran la fiabilidad del mismo y cuyo procedimiento se detalla en el presente artículo.

ABSTRACT

The conditioning device is a strain gauge based with microcontroller it is intended to measure steady mechanical strains either with strain gauges or strain gauge transducers.

The signal processing is in two stages: the conventional voltages treatment and the control and evaluation system of a microcontroller.

This device features the possibility of evaluation in μ strain or in load units if structural uniformity condition are established using one, two or four gauges, besides reading strain gauge transducers according to its own characteristics. The parameters are introduced through a keyboard and the reading is done in an LCD display.

Many tests have been done which shown the reliability of this device.

1. ANTECEDENTES

Desde hace mucho tiempo en medición y control, se vienen utilizando ciertos elementos que transforman una magnitud física en otra eléctrica, conocidas como sensores y transductores eléctricos.

Hace algunos años se ha iniciado una línea de investigación orientada a la aplicación de bandas extensométricas para la medida de magnitudes físicas que, particularmente provocan deformación. Con ello se pretende crear tecnología propia y

relativamente económica, para resolver el problema de medición. Algunas de las aplicaciones que se han realizado son: la construcción de llaves dinamométricas; celdas de carga; medición de temperatura, etc.

Teniendo en cuenta que existen muchas aplicaciones que podrían resultar de utilidad, es que se pensó en la construcción de un equipo que permitiera la medición con bandas extensométricas de más de una magnitud física: deformación, presión, temperatura, peso, etc. Esto se consiguió usando técnicas programables, pues ya se cuenta con la adecuada experiencia en lo que respecta a instrumentación programable con microprocesadores y microcontroladores.

El objetivo del presente trabajo es brindar la facilidad para continuar con la investigación aplicada usando bandas extensométricas, pues se ha demostrado que sería una posibilidad para resolver algunos problemas de medición en el ámbito industrial en forma eficiente y económica.

2. DEFINICIONES BASICAS

Medición: Medir es el acto o resultado de una comparación entre un estándar predefinido y una magnitud desconocida. Algunas veces estas cantidades no se pueden comparar directamente por lo que se opta por transformarias en cantidades que se puedan comparar fácilmente, realizándose una medida indirecta.

Cadena de medición: Considerando la transformación de la cantidad a medir, se tiene que recurrir a dispositivos llamados transductores, que asocian una cantidad física con otra más fácil de trabajar. El conjunto de dispositivos en la medición se suele llamar cadena de medición.

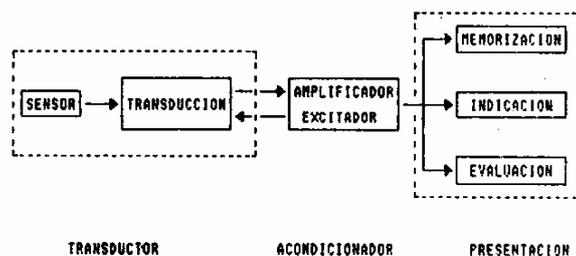


Fig. 2.1 Cadena de medición

Esta cadena está conformada por:

- Transductor:** formado por el sensor y el sistema de transducción de la señal recibida del sensor.
- Acondicionador:** convierte la señal del transductor en una señal utilizable.
- Presentación:** dependiendo del sistema se opta por cualquiera de las tres opciones, o en el mejor de los casos, por dos o las tres opciones a la vez y que se detallan a continuación:

- Memorización: los datos obtenidos se almacenan en un dispositivo de memoria para ser procesados en otro sistema más complejo.
- Indicación o presentación: los datos obtenidos se muestran al usuario en un dispositivo de aguja (analógico) o en una pantalla (digital)
- Evaluación: los datos obtenidos son comparados y se puede emitir una respuesta ante un determinado resultado.

Banda extensométrica: Teniendo en cuenta que el equipo diseñado es aplicable a la medición con bandas extensométricas directamente, o a través de transductores 'strain gauge', es conveniente tener en claro cual es la característica de estos elementos.

- a) **Definición:** La banda extensométrica (B.E.) es una resistencia eléctrica construida de alambre o una hoja de metal de sección pequeña que forma una rejilla como se muestra en la figura 2.2a adherida a una base no conductora (material base), que cumple ciertas características.

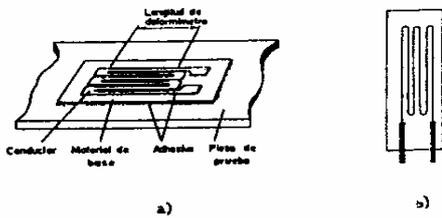


Fig. 2.2 Banda extensométrica

- b) **Factor gauge o factor de sensibilidad de la B.E.:**

$$K = (\delta R/R) / (\delta L/L) = (\delta R/R) / \epsilon$$

que relaciona los cambios de resistencia con los de longitud. Característica importante para una buena medición es que K debe ser constante e invariante en el tiempo. En la práctica, es necesario compensar todos los efectos de temperatura, pues como se sabe este parámetro provocará deformaciones que no necesariamente están relacionados con la medida, por lo que hará falta hacer una compensación de la misma.

Hay diferentes tipos de bandas extensométricas, las cuales dependerán del tipo de conductor, material base (el que soporta al conductor) y de su configuración (simple, multigrad o roseta).

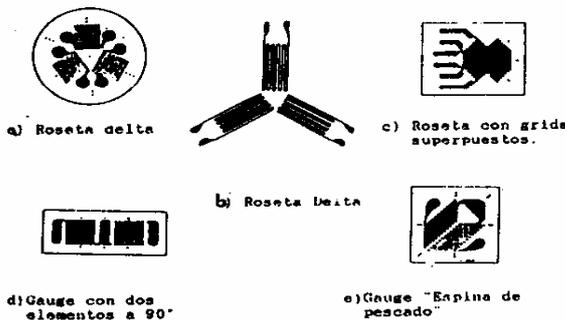


Fig. 2.3 Tipos de bandas extensométricas según configuración

Circuitos auxiliares de medición

El puente de Wheatstone es el circuito usado para transformar la variación de resistencia eléctrica de la banda extensométrica en una variación de voltaje. La configuración se muestra en la fig. 2.4

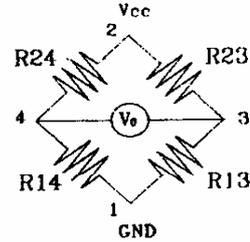


Fig.2.4 Puente de Wheatstone

La ecuación de equilibrio donde $V_o = 0$ es:

$$\frac{R24}{R14} = \frac{R23}{R13}$$

La relación que existe entre las ramas del puente indica que cualquier cambio en la resistencia de una rama del puente, se puede balancear o compensar ajustando los valores de las otras ramas.

Este principio es aprovechado para conectar bandas extensométricas en las ramas del puente y captar cualquier variación de su resistencia dentro del mismo, que se traduce en un voltaje V_o proporcional a la variación producida.

Las configuraciones que se usan para las aplicaciones con bandas extensométricas son:

- a) **Cuarto de puente:** Contiene una banda extensométrica. Está sujeto a errores por variación de temperatura, lo que se corrige a una rama opuesta del puente una banda extensométrica no sujeta a esfuerzo mecánico.

- b) **Medio puente:** Contiene dos bandas extensométricas conectadas a dos ramas adyacentes, presenta mayor sensibilidad y permite compensación por temperatura y mayor voltaje de salida que el cuarto de puente.

- c) **Puente completo:** Es la configuración con mayor sensibilidad y contiene cuatro bandas extensométricas conectadas a cada una de las ramas del puente y captando la deformación mecánica producida. Las bandas extensométricas fijadas al elemento prueba pueden tener diferente configuración respecto a la dirección a medir, obteniéndose diferentes expresiones de voltaje de salida

Algunos ejemplos de aplicación se muestran en la tabla 2.1, dependiendo del tipo de puente y el tipo de conexión.

UBICACION DE B.E.	SALIDA DEL PUNTE
	$V_o = \pm \frac{\Delta R}{4R} * V_{cc}$
	$V_o = \pm 2 * \frac{\Delta R}{4R} * V_{cc}$
	$V_o = \pm \frac{\Delta R (1+\mu)}{4R} * V_{cc}$
	$V_o = \pm 2 * \frac{\Delta R (1+\mu)}{4R} * V_{cc}$

Tabla 2.1

3. DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo construido consta de las siguientes etapas Transducción, acondicionador y presentación, según se muestra a continuación:

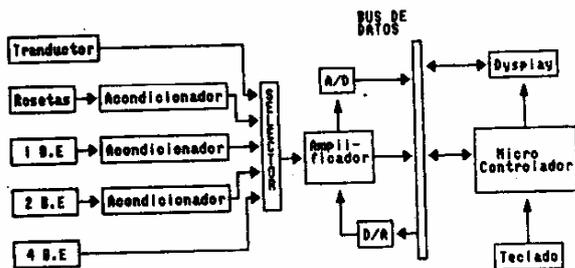


Fig. 3.1 Diagrama de bloques del equipo

a) Transducción

Esta etapa está constituida por un circuito formado por resistencias fijas que en conjunto con la banda extensométrica forman un puente de Wheatstone. Se usa en el caso de tener como entrada, información proveniente de una o dos bandas extensométricas o en el caso de rosetas de deformación.

En el primer y segundo caso se usa el complemento de resistencias fijas para completar el puente de Wheatstone de un cuarto y de medio puente respectivamente. Los valores de las resistencias fijas son de 120 y 750 ohmios por ser los más comunes. Si las bandas tienen un valor nominal diferente está prevista su compensación en el equipo.

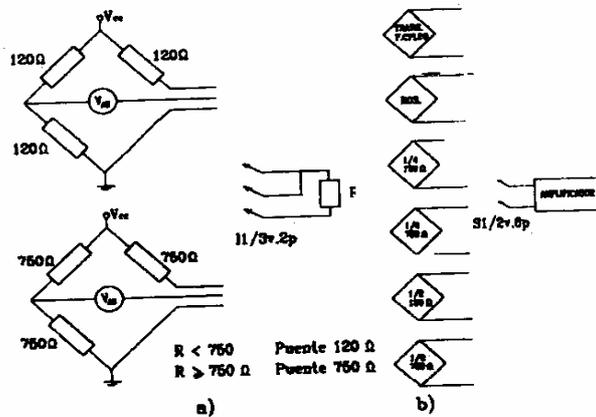


Fig. 3.2

En el caso de tener rosetas de deformación se usan tres circuitos de transducción (se asumen rosetas con tres bandas o grids independientes) y la conexión a la siguiente etapa se hace por medio de un interruptor analógico (fig. 3.3).

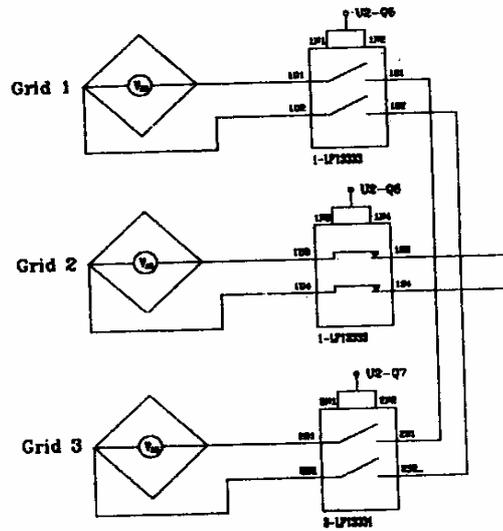


Fig. 3.3 Interruptores analógicos

Otras entradas posibles al equipo, pero que no necesitan de la etapa de transducción como se aprecia en la fig. 3.1 son las provenientes de : cuatro bandas extensométricas, conectadas en configuración puente completo y la de transductores.

b) Amplificación

Luego de la etapa acondicionadora viene la etapa de amplificación, la cual es necesaria ; en primer lugar, porque la señal proveniente de la etapa precedente es del orden de los

milivoltios (mV) y por otro lado, se trata de un voltaje diferencial.

En esta etapa se podría compensar un posible desbalance inicial del transductor.

Las partes que constituyen esta etapa se muestran en la figura 3.4 donde :

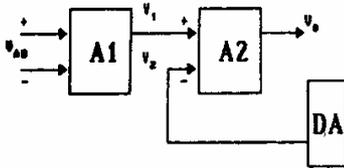


Fig. 3.4 Diagrama de bloques del amplificador

A1: es un amplificador diferencial de ganancia unitaria que recibe el voltaje diferencial proveniente de la etapa de transducción y lo transforma en voltaje absoluto, el cual es la entrada positiva del amplificador A2 de ganancia variable. El circuito está constituido por un "OPAMP" OP07 en configuración restador Fig. 3.5

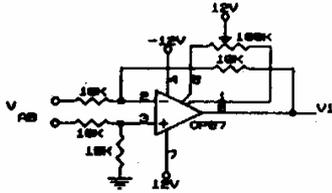


Fig. 3.5 Amplificador diferencial de ganancia unitaria

DA: es un convertidor digital analógico DAC0830 de 8 "bits" en configuración bipolar que está conectado para poder obtener cuatro resoluciones diferentes, según el voltaje de referencia a conectar. Este voltaje es seleccionado por el "buffer" de control.

A2: es un amplificador diferencial de ganancia variable (1 ó 100) constituido por un INA101 de la Burr Brown, de alta precisión, cuya configuración clásica es formada por tres operacionales, y el esquema simplificado se muestra a continuación.

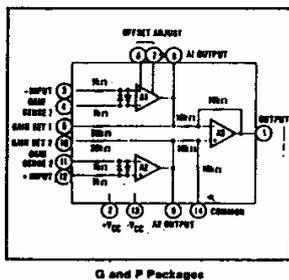


Fig. 3.6 Amplificador diferencial de ganancia variable

La ganancia puede ajustarse entre 1 y 1000, siendo regulada por una resistencia exterior R_g (en ohmios) a través de la expresión :

$$G = 1 + \frac{40000}{R_g}$$

c) Convertidor A/D:

La digitalización se realiza con un convertidor A/D de 12 "bits" con resolución de 0.5 mV/bit. Considerando que siempre existe un desbalance inicial del puente de Wheatstone o transductor, se realiza una primera lectura para compensar dicho error con el convertidor D/A, ya que dicho desbalance debe ser nulo.

d) Presentación:

Esta etapa gobierna el funcionamiento de todo el sistema diseñado, utilizando un microcontrolador (μC 8303R) que sigue las instrucciones de un programa grabado en memoria EPROM.

Entre las principales funciones que desempeña esta etapa se pueden mencionar las siguientes :

- Recibir datos numéricos a través de un teclado.
- Elaborar constantes con los datos ingresados.
- Determinar un resultado con el dato acondicionado y las constantes.
- Presentar el resultado en una pantalla de cristal líquido.
- Controlar los periféricos A/D, D/A, "buffer" de control. El diagrama de bloques general de esta etapa se muestra en la fig. 3.7

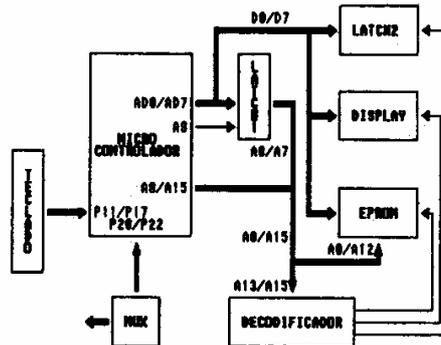


Fig. 3.7 Diagrama de bloques del sistema microcontrolador

4. SOFTWARE DEL SISTEMA

El software del sistema utiliza cinco programas principales además de los programas de interrupción, a ser usados en las diferentes opciones que presenta cada uno de ellos.

Los programas se escogen según el tipo de entrada:

- 1) Transductores (TRANS)
- 2) Cuarto de puente (1/4)
- 3) Medio puente (1/2)
- 4) Puente completo (FULL)
- 5) Roseta de deformación (RTAS)

La forma de acceder a estos es a través de un menú principal que se indica en pantalla (Fig. 4.1).

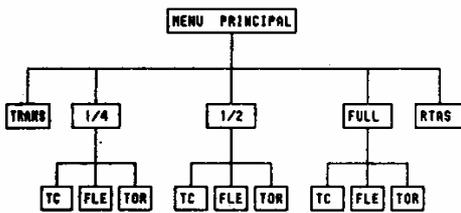


Fig. 4.1 Menú principal

Para el caso de 1/4, 1/2 y FULL existe un sub-menú que selecciona el tipo de esfuerzo a medir :

- a) TC: tracción-compresión.
- b) FLE: flexión.
- c) TOR: torque.

Los programas presentan en su ejecución una estructura semejante : inicializar, memorias, registros y puertos, recepción de datos, tara del error inicial, evaluación de constantes, presentar resultados en pantalla, opciones (programas de interrupción).

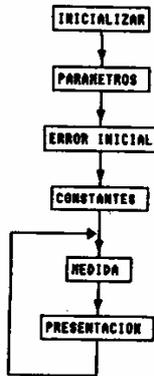


Fig. 4.2 Secuencia de programas

- Inicializar: los programas configuran el puerto P1, ponen en cero las memorias a utilizar, configuran los registros del μC y el display antes de iniciar cualquier acción.

- Parámetros: se encarga de recepcionar los datos numéricos de los parámetros a través del teclado. Cada parámetro ingresado presenta el formato decimal que luego es transformado a hexadecimal y almacenado en la zona de memoria de datos, en espera del siguiente.

Los parámetros pueden tener cinco dígitos como máximo, incluidos enteros y decimales; y el número de parámetros depende del programa que se esté ejecutando (tabla 4.1).

- Tara del error inicial: los transductores o circuitos con bridas extensométricas siempre presentan un voltaje de error inicial y que puede tomar diferentes valores. Este error se corrige con una rutina que controla el convertidor D/A generando un voltaje de compensación. La fig. 4.3 muestra el proceso de la rutina de tara del error inicial.

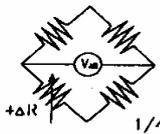
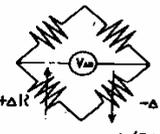
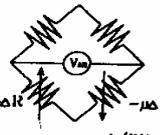
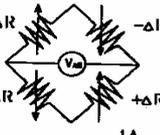
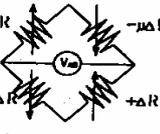
TIPO DE PUENTE	$e = f(V_{AB})$	$e = f(C.D)$
 1/4	$\frac{4V_{AB}}{K \cdot V_{CC}}$	$\frac{2 \cdot C.D}{K \cdot V_{CC} \cdot 100000}$
 1/2A	$\frac{4V_{AB}}{2 \cdot K \cdot V_{CC}}$	$\frac{C.D}{K \cdot V_{CC} \cdot 100000}$
 1/2H	$\frac{4V_{AB}}{K \cdot V_{CC} \cdot (1+\mu)}$	$\frac{2 \cdot C.D}{K \cdot V_{CC} \cdot (1+\mu) \cdot 100000}$
 1A	$\frac{4V_{AB}}{2 \cdot K \cdot V_{CC}}$	$\frac{C.D}{2 \cdot K \cdot V_{CC} \cdot 100000}$
 1H	$\frac{4V_{AB}}{K \cdot V_{CC} \cdot (1+\mu)}$	$\frac{C.D}{K \cdot V_{CC} \cdot (1+\mu) \cdot 100000}$

Tabla 4.1 Constantes de acuerdo al tipo de puente

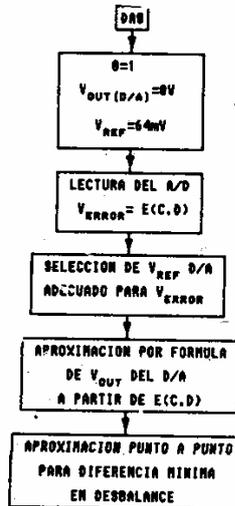


Fig. 4.3 Tara del error inicial

- **Constantes:** los programas principales evalúan constantes para obtener los resultados. Estas son determinadas a partir de los parámetros ingresados utilizando las operaciones básicas de suma, resta, multiplicación y división.

La relación de las constantes en función de los parámetros y el tipo de esfuerzo a medir se muestra en la tabla 4.1 (deformación unitaria) y tabla 4.2 (tipo de esfuerzo).

	TRACCION COMPRESION	FLEXION	TORQUE
ESFUERZO	$K\sigma = K\sigma E$	$K\sigma = K\sigma E$	$K\sigma = 2(K\sigma G)$
CARGA	$K_Q = K\sigma E A$	$K_Q = (K\sigma E I) / y$	$K_Q = (4\pi K\sigma G \pi r^3) / d$

1: Módulo de Young.
 2: Área de la sección transversal.
 3: Momento de inercia.
 4: Distancia a eje neutro.
 5: Módulo de elasticidad.
 6: Diámetro del eje.
 7: Momento polar de inercia.
 8: Constante básica según el tipo de puente y configuración utilizada.

Tabla 4.2 Constantes según tipo de esfuerzo

- **Medida:** la medida se realiza después de definir las constantes (K_e) en los diferentes esfuerzos o sistemas de unidades. El proceso se muestra en la fig. 4.4 donde: D, es el dato digital correspondiente al voltaje presente; ER, es el código correspondiente al voltaje de corrección (inicialmente es cero) y K_e constante utilizada en la medida.

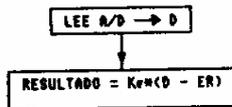


Fig. 4.4 Proceso de medida.

Al inicio de este proceso, el programa de interrupción de tara de la medida es activado en espera de su ejecución (presionar INT). Cuando se ejecuta, el valor D pasa a ER, obteniéndose la tara de la medida.

- **Presentación en pantalla:** El resultado obtenido en la etapa anterior se encuentra en el sistema hexadecimal el cual es convertido a código compatible para que el "display" pueda procesar. En la pantalla de cristal líquido se muestran los menús necesarios y los resultados obtenidos

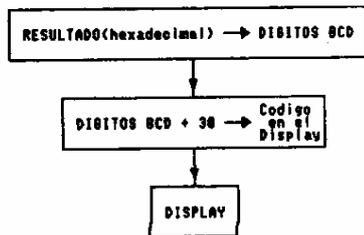


Fig. 4.5 Presentación en pantalla

Los programas de interrupción se ejecutan al activar el IRQ1, utilizando el pulsador INT del tablero. Durante la ejecución de los programas principales se utilizan tres programas de interrupción que se ejecutan en forma consecutiva cambiando el vector de interrupción (IRQ1) una vez terminado el proceso.

1. El primero corrige el valor numérico de los parámetros que ingresan por teclado, siendo ejecutado durante el proceso de ingreso de parámetros, en caso de cometer un error en la introducción de los mismos. La manera de acceder a él es presionando INT para cada corrección. Luego de este proceso el vector de interrupción es cambiado por el correspondiente TARÁ.

2. El segundo realiza la tara de la medida a realizar; siendo ejecutado una sola vez y activado al presionar INT después de la evaluación de constantes. Al ser activado se muestra un menú esperando la opción.

3. El tercer programa de interrupción queda activo después de la tara de la medida permaneciendo residente y puede ser activado pulsando INT en cualquier momento durante la medición. Presenta las opciones del cambio de tipo de esfuerzo y el sistema de unidades.

5. ANALISIS DE APLICACIONES ESPECIFICAS

Suponiendo que se quiera medir una deformación haciendo uso de una banda extensométrica (BE), se tendría que usar la configuración de cuarto de puente.

Analizando un puente de resistencia en dicha configuración, con resistencia de rama R, se obtiene:

$$V_{ab} = \pm (\delta R / R) \cdot V_{cc}$$

donde:

- δR : variación de resistencia
- R: resistencia nominal
- V_{cc} : excitación del puente
- V_{ab} : salida del puente

Si se recuerda el factor gage K, da una relación entre la variación porcentual de resistencia y la longitud, este último sería la deformación unitaria que se desea medir: $\epsilon = \delta L / L$ y que con la expresión anterior conducen a:

$$\epsilon = V_{ab} \cdot (4 / K \cdot V_{cc})$$

Analizando dicha ecuación se puede deducir los parámetros y condiciones que se necesitan para realizar una medida, los cuales son:

- K: factor gage, constante.
- V_{cc} : excitación del puente constante
- V_{ab} : Voltaje de salida del puente variable, dependiendo de la variación de resistencia por efecto de una deformación mecánica.

Los parámetros constantes (K, V_{cc}) u otro que se presentara (como el módulo de Poisson μ) son ingresados por teclado. El parámetro variable (V_{ab}) es leído cada cierto tiempo por el A/D y transferido al microcontrolador para la evaluación puntual de la deformación. El voltaje V_{ab} en la mayoría de los casos es pequeño amplificándose antes de ser leído por el A/D. Los esfuerzos y la carga son relación directa de la deformación unitaria:

$$\begin{aligned} \sigma &= f(K, V_{cc}) \\ \sigma &= f(\epsilon, E) \\ P &= f(\epsilon, EA) \end{aligned}$$

siendo: E el módulo de Young y A, el área de la sección transversal.

Teniendo en cuenta esta consideración se evalúan las constantes correspondientes al esfuerzo a medir y se obtiene una lectura directa.

Cada configuración de puente Wheatstone presenta una ecuación que es relacionada con el voltaje de salida y la deformación unitaria.

Haciendo uso de un transductor :

Existen una gran variedad de transductores a base de strain gages con los siguientes datos de placa :

Sensibilidad	= (mV/V)
Voltaje de excitación	= (V)
Carga nominal	= Q_n (pef. Kg. Tn. T)

Teniendo en cuenta estos datos, el equipo los recibe por teclado y determina una constante lineal, para calcular la carga presente cuya relación es

$$Q = \frac{Q_n}{2.S.Vcc.G} \cdot (C. Digital)$$

C. Digital = lectura del A/D (Código digital)
G = ganancia del amplificador

Al momento de realizar la medida se visualiza la carga presente y las unidades ingresadas, con la alternativa de cambiar del sistema internacional al sistema inglés.

Se debe tener presente que los transductores utilizados sean para medidas estáticas, considerando el tipo de tratamiento de la señal.

CONCLUSIONES

1. La fiabilidad de medida depende de :
 - La exactitud de la instalación de las bandas extensométricas
 - La conexión entre las BE y el instrumento la cual deberá ser a través de conductores apantallados.
 - Las condiciones de temperatura, que en el caso de temperatura elevada se recomienda usar la configuración de puente completo.

2. El error en la medida que genera la circuitería se puede compensar con el uso de BE, de valor nominal cercano al de los valores del puente de Wheatstone (de 120 o 350 Ω)

3. La configuración de cuarto de puente es la más inestable por estar expuesta a variaciones de temperatura.

4. El máximo valor aceptado se restringe por el máximo número que puede almacenar una constante, en nuestro caso, 4 bytes hexadecimales.

No se puede dar una restricción en los parámetros porque la constante es un producto de los mismos.

5. En el modo 'transductor' se puede utilizar un tipo diferente de transductor al strain gauge (con característica mV/V y carga nominal), siempre y cuando su salida sea en mV y los parámetros se puedan combinar para obtener una característica lineal ($CONSTANTE \cdot EXM \cdot V = CARGA$) .

6. Considerando la interface serial del microcontrolador queda pendiente la conexión a un computador para un análisis específico, sin modificaciones en hardware, sólo en software.

BIBLIOGRAFIA

- Bruel & Kjaer " STRAIN MEASUREMENTS", Alemania, 1975
- Ernest O. Doebelin "DISEÑO Y APLICACIONES DE SISTEMAS DE MEDICION", México, 1980.
- Harry N. Norton "SENSOR ANALYZER HANDBOOK", U.S.A. 1982
- Enrique Mastas García "APLICACIONES DE LAS BANDAS EXTENSOMETRICAS Y CONSTRUCCION DE UN TORQUIMETRO DIGITAL", Perú, 1987.
- Omega "PRESSURE, STRAIN AND FORCE", U.S.A. 1986.
- HITACHI "8/16 MICROPROCESSOR DATA BOOK", Alemania, 1986
- Texas Instruments " THE TTL DATA BOOK", Vol. 1, Severenth European Edition, 1983.
- National Semiconductor " LINEAR DATA BOOK", U.S., 1982.
- Electronic Distributor "DISTRELEC 90/91", Zurich.
- Burr-Brown "INTEGRATED CIRCUITS DATA BOOK", Holand, 1986.
- R.S Sirohi "MEDICIONES MECANICAS", España, 1986.



Irene Alvarado de Chumbeu : Nació en Piura el 7 de Febrero de 1961. Realizó estudios superiores en la Universidad Particular de Piura (1977-1983). Siguió cursos de especialización de Control Automático en la Universidad 'La Sapienza' de Roma (1984-1985).

Realizó algunos trabajos de investigación en el Politécnico de Zurich, Dpto. Automática (1985-1987).

Es miembro asociado de la IEEE. Actualmente se desempeña como profesora de la Universidad de Piura en los cursos de Análisis Matemático III, Sistemas de Control y Control Industrial y realiza trabajos de investigación en los laboratorios de la sección Electrónica de dicha Universidad.



Halo Chinchay Ullon : Nació en Piura el 10 de Junio de 1965. Realizó estudios superiores en la Universidad Particular de Piura (1983-1988) en la facultad de Ingeniería Industrial. Actualmente se desempeña como asistente de la Sección Electrónica de la Universidad de Piura.

Ha realizado trabajos de investigación en los laboratorios de la sección Electrónica de dicha Universidad utilizando microprocesadores, microcontroladores y controladores lógicos programables (PLC).