



Un transductor es un dispositivo que convierte variables físicas tales como fuerza, posición, presión, temperatura, velocidad, aceleración, etc; en una señal generalmente eléctrica para propósitos de medición o control.

La fuerza y las magnitudes directamente asociadas a ella (como el par, la presión y aceleración) pueden medirse eléctricamente por medio de una gran diversidad de tipos de transductores.

Muchos transductores de fuerza se basan en la conversión de una fuerza aplicada la cual provoca un desplazamiento mecánico, típicamente la deformación de un elemento elástico, y dependiendo del transductor se convierte en una señal eléctrica de salida.

De acuerdo al principio físico en que se basan, los transductores de fuerza se pueden clasificar en tres grandes categorías:

- Transductores basados en las leyes de la estática.
- Transductores basados en el fenómeno piezoeléctrico.
- Transductores basados en el fenómeno de la reacción elástica.

TRANSDUCTORES BASADOS EN LA APLICACION DE LAS LEYES DE LA ESTATICA

Se sabe que disponiendo de una serie de distintas magnitudes de fuerza, siempre es posible medir una fuerza incógnita recurriendo a la ley fundamental de la mecánica dada por la relación:

$$\sum F - ma = 0$$

la que indica que en un sistema de fuerzas $\sum F$ (incluyendo las activas y reactivas) aplicadas a un cuerpo de cierta masa "m", proporciona una aceleración "a". En forma análoga con un sistema rotacional, examinando la aceleración angular $d\omega/dt$ de un cuerpo, con un momento de inercia axial J alrededor del eje de rotación relativo, bajo la acción de un sistema de pares $\sum M$ cuya dirección es la de dicho eje; se obtiene la siguiente relación:

$$\sum M - J \frac{d\omega}{dt} = 0$$

Por lo general, en las mediciones industriales, los transductores que se basan en las leyes definidas por las ecuaciones anteriores, están empleados en condiciones de carga constante.

Una aplicación, bajo dichas condiciones, está representada por la balanza automática de contrapesos cuyo principio de medición está ilustrado en la figura 1.

Pasando por alto los pesos de los brazos con respecto al peso patrón P_c y al peso incógnito P, puede obtenerse la relación:

$$P = P_c \frac{b_2}{b_1} \tan \theta$$

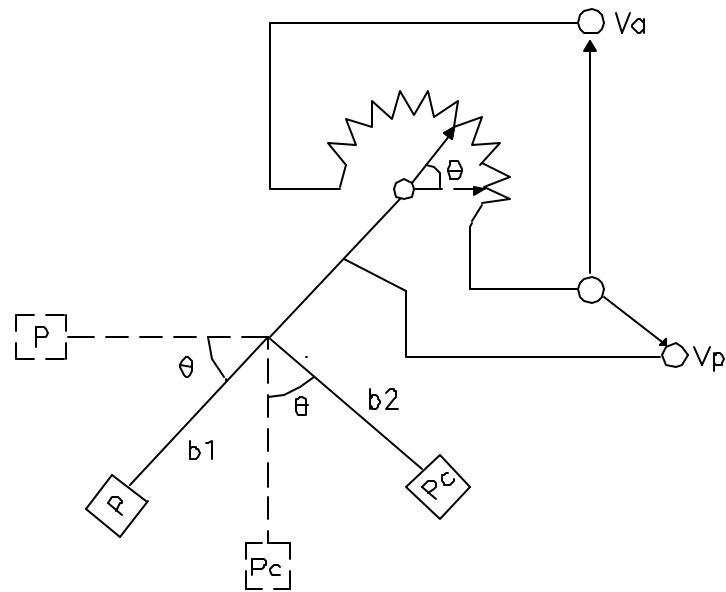


Figura 1

Ya que utilizando el potenciómetro puede leerse un voltaje proporcional al ángulo, la balanza de contrapesos viene a ser un sensor de rotación angular con característica no lineal.

TRANSDUCTORES BASADOS EN EL FENOMENO DE LA PIEZOELECTRICIDAD

Dichos transductores se emplean sobre todo cuando las fuerzas que hay que medir son dinámicas, estos dispositivos aprovechan un fenómeno descubierto por Pierre y Jacques Curie en 1880 en el que las variaciones de carga se presentan en algunos materiales cuando estos están sujetos a fuertes acciones físicas.

Estos dispositivos piezoeléctricos se usan en instrumentos, como acelerómetros, utilizados para el estudio de las vibraciones¹. Los materiales con que están hechos estos transductores son cerámicos (materiales de síntesis), como lo son el titanato de bario o el de plomo. Entre los cristales se utiliza la turmalina, sal de "seignette" (titrato de sodio y potasio) y el cuarzo, siendo este último el más común.

TRANSDUCTORES BASADOS EN EL FENOMENO DE LA REACCION ELASTICA

Considerando un cuerpo homogéneo e isótropo de forma prismática, como el de la figura 2, que tenga una de sus bases (de cierta área A) apoyada en un soporte de material con rigidez infinita, mientras que a la otra base se le aplica una fuerza F perpendicular a la misma. El cuerpo sufre una deformación al aplicarle una fuerza la cual puede medirse como la relación entre el cambio de dimensión y el valor total de la dimensión en la que ocurre el cambio.

La ley que rige estas deformaciones es la ley de Hook, la cual se define como :

$$E = (\text{constante}) = \frac{S}{\epsilon}$$

1 Para más detalles ver la Práctica de Aceleración y Velocidad.

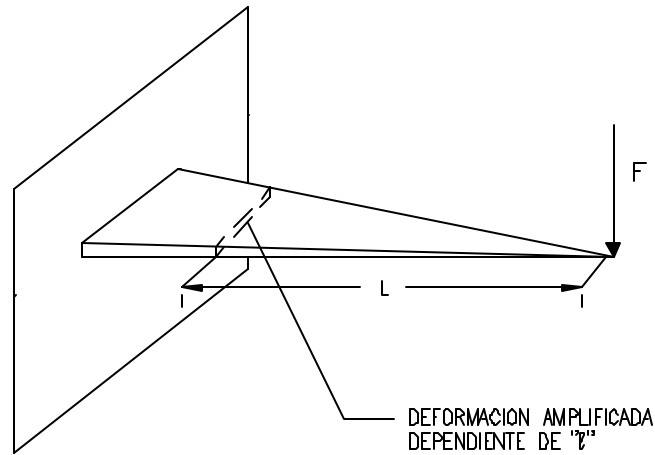


Figura 2

donde $E \Rightarrow$ módulo de elasticidad o módulo de Young en $\frac{Kg}{cm^2}$

$S \Rightarrow$ esfuerzo (en tensión o compresión) en $\frac{Kg}{cm^2}$

$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \Rightarrow$ deformación, adimensional.

donde $F =$ fuerza (en tensión o compresión)

$A =$ Area de la sección (normal a la dirección de aplicación de la fuerza)

$L =$ Longitud original del sólido.

Entonces, al aplicar una fuerza F el cuerpo se deforma produciendo una fuerza reactiva F_r , mientras que el comportamiento resulta ser puramente elástico.

En el punto de equilibrio, es decir cuando F es igual a F_r , y apartir de la ley de Hook, se tiene una relación lineal de la deformación longitudinal ϵ_l dada por:

$$\epsilon_l = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{EA} = K F$$

De aquí, todo cuerpo que satisfaga la ley de Hook, puede constituir un sensor lineal de fuerza en función de la deformación longitudinal.

En correspondencia con la deformación longitudinal ϵ_l , se tiene la deformación transversal ϵ_v relacionadas mediante el coeficiente de Poisson ν , por lo que se tiene también una relación lineal entre la fuerza aplicada y la deformación transversal dentro del campo de la ley de Hook dada por :

$$\epsilon_v = -\nu \quad \epsilon_l = \frac{-\nu}{EA} F = -K' F$$

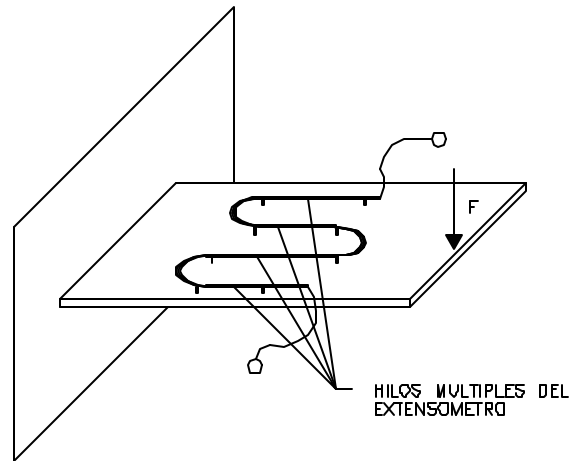


Figura 3

De lo anterior se puede obtener una conversión lineal "Fuerza/Deformación" determinando la deformación y transformandola en una señal eléctrica proporcional a la fuerza.

Para determinar las deformaciones producidas por una fuerza se utilizan los siguientes sensores:

- "Strain gage" resistivos
- "Strain gage" de semiconductor

Transductores en los que se emplean "Strain gage" resistivos

Estos sensores, también llamados galgas extensométricas o extensómetros, tienen dos características de deformación elástica que se utilizan en la transducción de fuerzas: la deformación local y la deflexión. Un valor máximo de cada uno se detecta en algún punto del elemento sensor, aunque no necesariamente siempre en el mismo punto, y es este valor el que da la magnitud transducida (ya sea la deformación o la deflexión). Los elementos sensores de fuerza están fabricados con materiales de homogeneidad controlada, normalmente de algún tipo de acero, y una serie de tolerancias muy cuidadosamente dimensionadas.

Como parámetros básicos de diseño de los elementos sensores de fuerza se tiene: tamaño y forma, densidad del material, módulo de elasticidad, sensibilidad a la deformación y a la deflexión, respuesta dinámica y los efectos de la carga del transductor sobre el sistema a medir.

De modo particular puede decirse que: $\frac{dR}{R} = K \frac{dL}{L}$. El coeficiente de proporcionalidad K se llama también "factor de calibración o factor de galga", y puede asumir valores comprendidos entre -11 y 4.5 según los materiales empleados (níquel, manganina, constantán, platino, tungsteno). Un elevado factor de calibración de un material hace que este sea más sensible a la temperatura y menos estable que los materiales con factor de calibración menores.

La forma más sencilla en como trabajan los extensómetros consiste en medir la variación de la resistencia de un alambre metálico cuyos extremos están sujetos en los dos puntos entre los cuales se desea medir la variación de distancia dL y en consecuencia la fuerza.

Para tener valores de dR fácilmente medibles, se adicionan varias longitudes útiles del hilo metálico como se muestra en la figura 3.

En la mayoría de los casos, los extensómetros se utilizan para medir la deformación de una superficie en una dirección preestablecida.

Cabe señalar que los tramos curvos tienen una sección mucho mayor que la de los tramos rectilíneos, y por lo tanto una resistencia despreciable. Los valores de L pueden variar de 2 a 20 mm aproximadamente.

En los transductores de fuerza, los extensómetros ya se encuentran pegados en el dispositivo que se deforma cuando se le aplica la fuerza a medir.

Estos sensores tienen el inconveniente de depender de la temperatura, esto es, si existe una variación de temperatura, se provoca una variación en la resistencia y una variación del volumen del material (lo cual se puede definir como una deformación no presente).

Para evitar esto, se requieren dos extensómetros, uno deformado y otro no, y medir la diferencia de la resistencia existente entre los dos. También se puede recurrir a extensómetros termocompensados, es decir, elementos que tengan materiales con coeficiente de temperatura igual y opuesto al coeficiente de dilatación térmica del material alterable.

Sensores en los que se emplean "Strain gages" de semiconductor

Debido a que la piezoresistividad (variación de la resistencia eléctrica al cambio de volumen) se hace muy intensa en los semiconductores, el coeficiente de calibración K logra alcanzar valores muy elevados (entre 40 y 200) haciéndose presente un fuerte incremento en la sensibilidad, pero así mismo una fuerte dependencia de la temperatura, por este motivo dichos dispositivos se emplean solamente en casos en los que la sensibilidad es muy elevada y las variaciones de temperatura son casi nulas.

Los transductores "strain gages" proveen tiempos rápidos de respuesta, buena resolución, mínimo movimiento mecánico, y buena exactitud. Compensación predecible por los efectos de temperatura, fuente de baja impedancia.

Los bajos niveles de salida pueden causar problemas de ruido y generalmente se requiere aislamiento de la tierra de excitación con la tierra de salida.

Celdas de Carga

La celda de carga es el tipo de transductor de fuerza dotado de extensómetros de tipo resistivo que más se usa en la rama industrial. Su configuración es la de un puente de extensómetros, que es la que se utiliza en esta práctica.

La celda convierte una fuerza aplicada (peso) en una variación del voltaje presente en la salida del puente.

Las celdas de carga que emplean "strain gages" del tipo resistivo tienen una impedancia de aproximadamente 350 ohms y una sensibilidad de $2 \frac{mV}{V}$ a plena escala, es decir, por cada volt que se aplique al puente, la salida será de 2 mV.

Debido a que la variación de temperatura es una fuente de errores, es posible usar una de las siguientes técnicas para reducirlos:

1. Especificando la exactitud sobre el total de errores en lugar de hacerlo en una base de parámetros individuales.
-

2. Usando técnicas en la calibración del sistema que funcionen por reducción de datos.
3. Monitoreando los cambios ambientales y corrigiendo los datos conforme ocurran.
4. Controlando artificialmente el medio ambiente del transductor para minimizar estos errores.

PARAMETROS QUE CARACTERIZAN UN TRANSDUCTOR DE FUERZA

Las características fundamentales en el empleo de un transductor de fuerza y que definen su calidad son las siguientes:

- El margen o campo de medidas,(expresado en Kg, N ó Ton);es decir, el campo de las fuerzas que el sensor es capaz de convertir sin alterar sus características de medición. El margen de medidas puede ser unipolar (compresión) o bipolar (compresión y tensión).
- El valor de sobrecarga estática admitido (expresado en Kg, N ó Ton), es decir, el valor de la máxima fuerza que puede soportar el dispositivo sin dañarse.
- El campo de temperaturas de funcionamiento (expresadas en °C).
- El campo de temperaturas de almacenamiento (expresado en °C).
- El campo de precisión primaria (expresado en °C),o sea el margen de temperaturas dentro del cual los datos de medición satisfacen valores determinados.

Con lo que respecta a la exactitud de las medidas pueden darse algunas especificaciones relativas al campo de precisión primaria, que son :

- Linealidad, es una medida del comportamiento diferencial de la curva de calibración respecto a una línea recta especificada, la linealidad se expresa en porcentaje del valor de plena escala, dada por la expresión:

$$Linealidad = \pm \frac{1}{2} \left| \frac{V_1 - V_2}{V_2} \right|$$

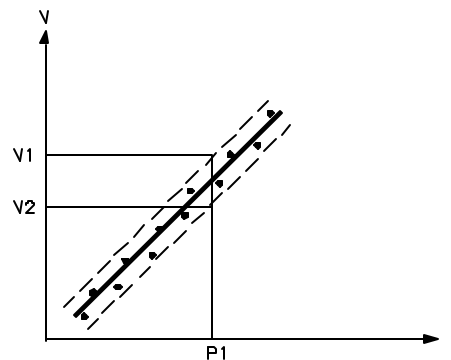


Figura 4

Para obtener estos valores de voltajes se tiene que determinar la recta óptima del transductor y obtener una gráfica como la que se muestra en la figura 4; donde P1 es el valor de fuerza máxima dentro del rango de operación.

— De la misma manera, la variación relativa V_r al voltaje de plena escala en porcentaje es:

$$V_r = \frac{V_2 - V_1}{V_1}$$

- Resolución; es la más pequeña variación detectada de la magnitud de salida. Este parámetro se expresa como el inverso del valor de la señal de salida para una determinada entrada unitaria.
- La repetibilidad, expresada en porcentaje del valor a plena escala, indica la capacidad que tiene el transductor de reproducir la señal de salida cuando a la entrada se presenta, en tiempos sucesivos, la misma muestra de magnitud a medir.

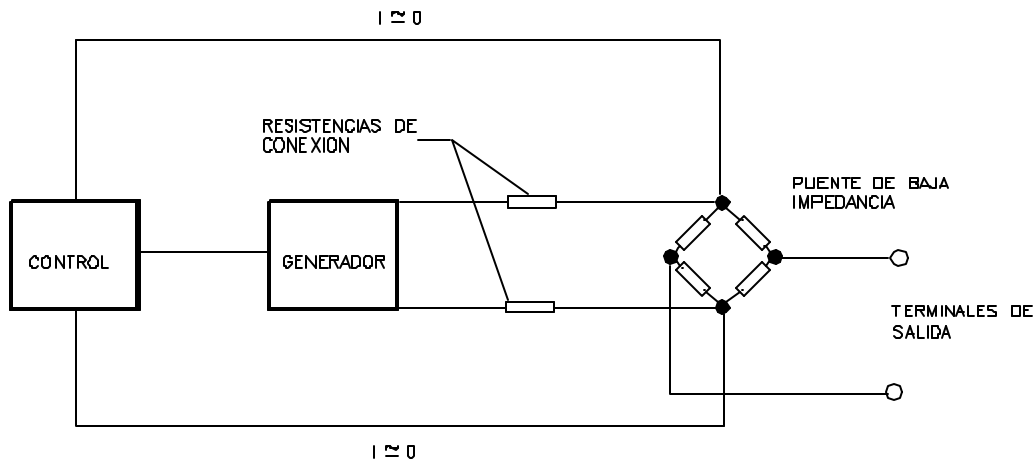


Figura 5

- La estabilidad, expresada en porcentaje del valor de plena escala, indica la capacidad que tiene el transductor de mantener el valor de la señal de salida cuando en la entrada se mantiene fijo el valor de la fuerza a convertir.
- La histéresis, la cual representa la diferencia entre dos indicaciones dadas por el transductor, para un mismo valor de fuerza, cuando este es alcanzado desde direcciones opuestas.

ACONDICIONADORES DE SEÑAL EMPLEADOS CON LOS TRANSDUCTORES DE FUERZA

Para los transductores de fuerza que emplean extensómetros del tipo resistivo (Celdas de carga), el sistema de interface debe ser capaz de excitar el transductor con un voltaje constante.

Dado que la resistencia ohmica del extensómetro es baja, a menudo se recurre a las terminales de salida del puente para controlar si el voltaje aplicado es constante, como se indica en la figura 5.

Dado que el voltaje a la salida del transductor es pequeño, se amplifica a través de un amplificador diferencial para instrumentos de alta ganancia, como se muestra en la figura 6.

La elección del amplificador diferencial habrá que hacerla de tal modo, que al variar la temperatura la desviación del voltaje será el mínimo posible.

Además se suele utilizar un potenciómetro para eliminar el voltaje de "offset" y un potenciómetro de calibración para regular la salida en correspondencia con su valor exacto a plena escala.

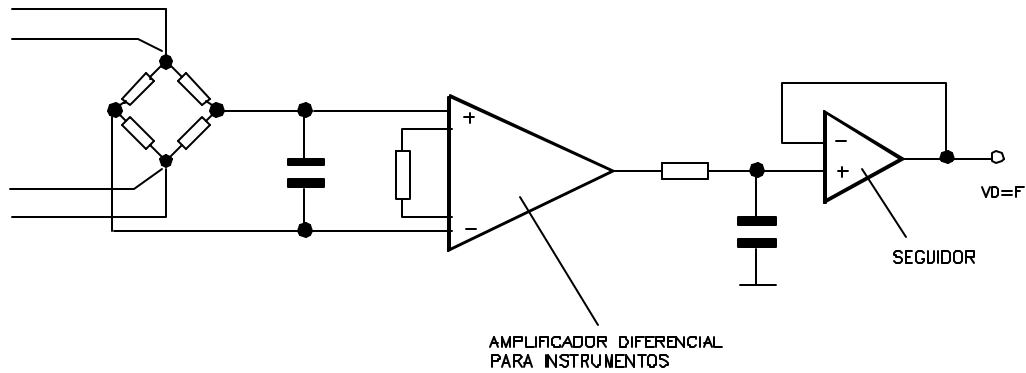


Figura 6

Algunas celdas de carga están dotadas también de una terminal de verificación, con la cual es posible hacer que el puente se desequilibre; a fin de poder obtener a la salida por ejemplo el 50 % del valor a plena escala.

Normalmente los transductores de fuerza dotados de extensómetros resistivos se calibran durante la fase de producción y, muchas veces, están dotados de un circuito de compensación térmica.

Debido a que estos sensores están montados en dispositivos en los que no se presentan rápidas variaciones de fuerza, a fin de reducir el ruido se utiliza un filtro de paso bajo de segundo orden.

Los transductores de fuerza provistos de extensómetros de semiconductor presentan señales eléctricas de salida de alto nivel; requiriendo, por ello, sistemas de interface muy simples con lo que respecta al "offset" y a las escalas.

En cuanto a los transductores de fuerza del tipo piezoeléctrico el sistema de interface está constituido por un amplificador de carga, cuyo esquema teórico está representado en la figura 7.

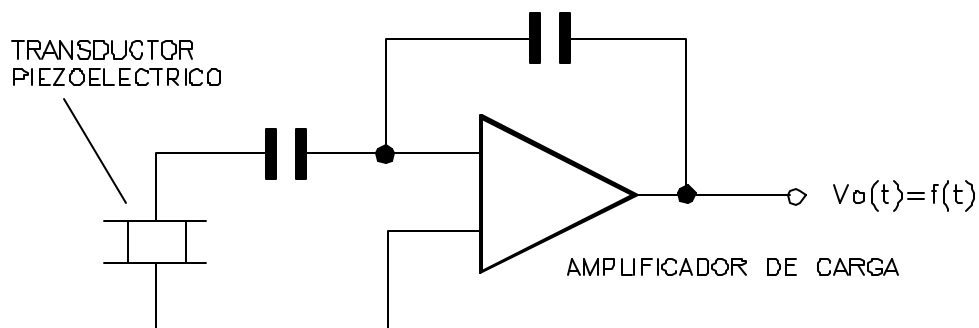


Figura 7

DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo, representado por un sistema didáctico para la conversión de la fuerza, está constituido por dos partes fundamentales, que son: El modulo G25, que contiene el acondicionador de señal, y el transductor de fuerza. Como se muestra en la figura 8.

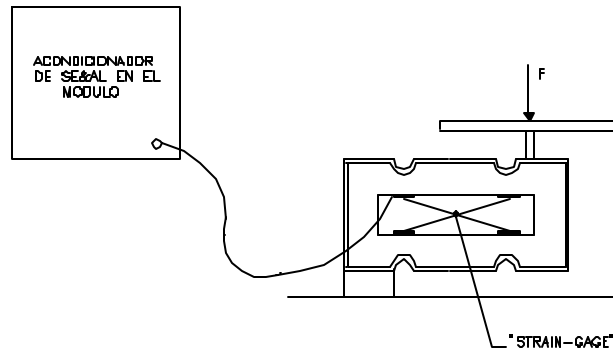


Figura 8

EL Transductor de fuerza

El transductor empleado es una celda de carga dotada de extensómetros resistivos. Al aplicarse al dispositivo una fuerza se obtiene una deformación de la estructura metálica como la ilustrada en la figura 9.

La precisión de la conversión, y por lo tanto de la medida de la fuerza, depende notablemente de la calidad de las conexiones entre la celda de carga y sus planos de apoyo. Estos últimos han de ser rígidos, muy planos y deben crear un contacto lo mas extenso posible que no sea variable según la posición y el valor de la carga. Esta óptima rigidez permite una mayor extensión del área del plano de carga del transductor, es decir, que el transductor de fuerza conviene mucho para convertir cargas que se hallan fuera del eje; esto es, que puede aceptar planos de ponderación que alcancen una superficie de 15 X 20 cm.

Ya que, debido a las sobrecargas, las celdas pueden dañarse (aunque no estén conectadas eléctricamente), deberá prestarse mucha atención durante la fase de montaje de las celdas con bajo valor de plena escala (por ejemplo, de 0.5 a 20 kg); en este caso, es absolutamente necesario evitar torsiones y sobrecargas superiores al valor de plena escala.

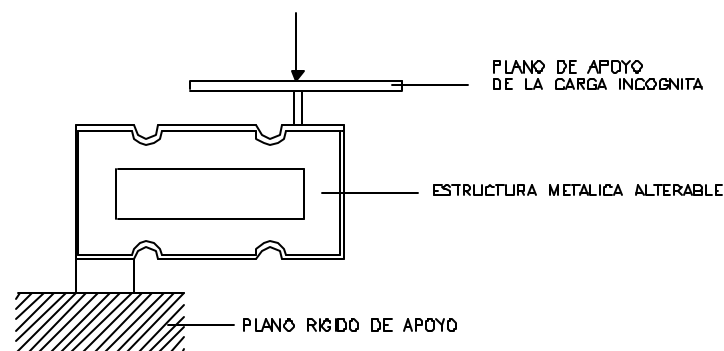


Figura 9

La fuerza resulta ser siempre el producto de la masa y de la aceleración (es decir $F = m a$); por ello, si se golpea la celda, esta podría ser sometida a acciones fuera de su campo de tolerancia. En el caso de ciclos de ponderación rápidos o de caídas de carga sensibles, se prefiere escoger celdas con valores de plena escala sobreexcedentes.

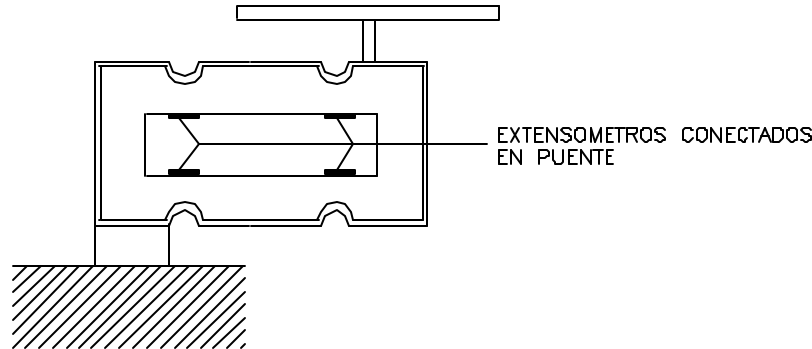


Figura 10

En el dispositivo, hay cuatro extensómetros utilizados para determinar las deformaciones de la estructura mecánica al aplicarse las cargas; éstos son del tipo resistivo y están conectados en puente.

En la figura 10 se halla representada la disposición de los extensómetros.

La celda de carga procede a la compensación térmica automática y a la eliminación del efecto de rigidez de los conductores de interconexión.

Además los extensómetros están protegidos generalmente contra la humedad, esto para obtener parámetros eléctricos más constantes y una estabilidad de medición mejor.

Debe observarse que en el transductor falta el tornillo de regulación de la sobrecarga; por lo tanto habrá que poner atención en no superar el valor límite del dispositivo, pues, de otro modo, podría ocurrir la ruptura de la celda.

Cabe mencionar que la polaridad de la señal de salida es negativa en condiciones de compresión, y positiva en condiciones de tensión.

Acondicionador de Señal para el Transductor de Fuerza con Extensómetros Resistivos.

Debido al transductor utilizado (celda de carga), la señal de salida del transductor es muy baja, por lo que el acondicionador tendrá que encargarse de efectuar una amplificación elevada, con el fin de poder obtener una señal de salida de fácil manipulación. Además deberá proporcionar un "offset" adecuado que permita la adaptación de las escalas (variaciones de amplificación), para poder obtener una correspondencia numérica entre la fuerza y el voltaje. El circuito de interface, íntegramente reproducido en el panel didáctico (módulo G25), es el que se muestra en la figura 11.

El voltaje de referencia de 10 V. se consigue por medio del regulador de voltaje IC1. En este circuito integrado la variación del voltaje de referencia, en función de la temperatura, es muy baja (siendo el máximo de 0.015%/C); de esto resulta que para una variación de temperatura de 50C, se obtiene una variación de excitación igual a 0.075 Volts, esta variación resulta notablemente despreciable respecto a la variación vista en el transductor.

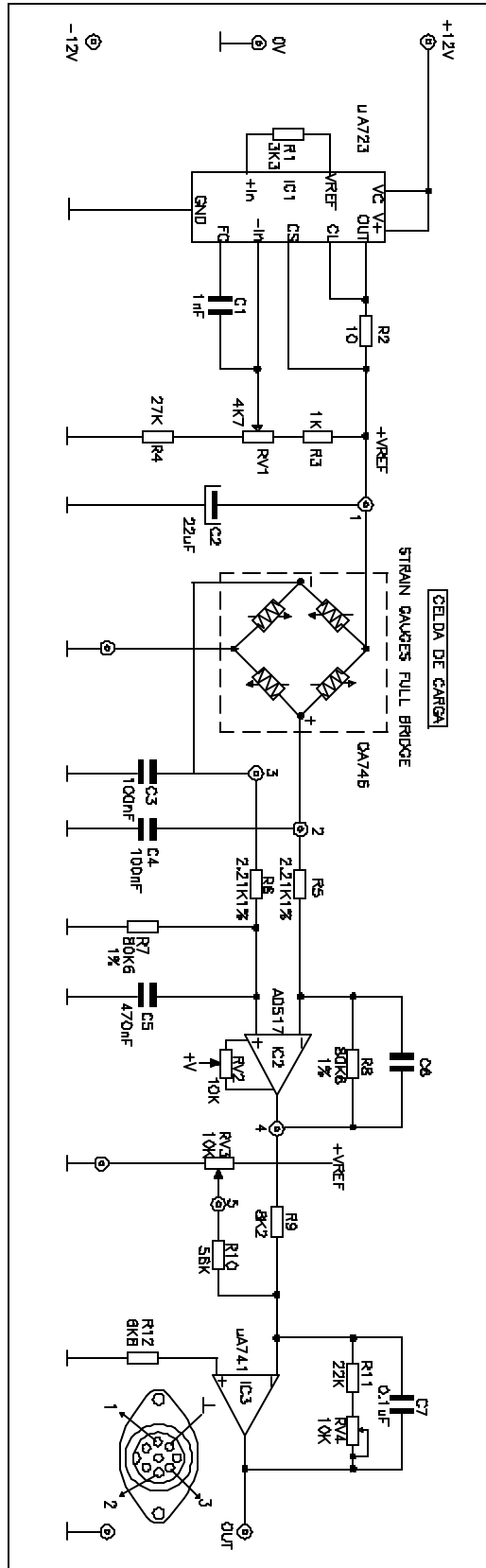


Figura 11.

La regulación del voltaje de referencia se realiza mediante el potenciómetro RV1.

El voltaje de referencia alimenta a la celda de carga en configuración de puente y su salida está conectada a la entrada diferencial de la etapa amplificadora.

La etapa de amplificación está constituida por un amplificador diferencial (amplificador operacional IC2 en conexión diferencial). El operacional empleado presenta, al variar la temperatura, una baja desviación del voltaje de "offset" en la entrada.

Este operacional indica un valor de $3 \frac{\mu V}{^{\circ}C}$; con el cual se obtiene una variación del voltaje de "offset" de $150 \mu V$ para una variación de la temperatura de $50 ^{\circ}C$. Debido a que $2mV$ corresponden a $1 Kg$, se obtiene un error total de 75 gramos ($\frac{150 \mu V}{2mV} \times 1000gr$), el cual corresponde aproximadamente al error de no linealidad del transductor y es netamente inferior a la desviación de la medida debido a la variación de temperatura del transductor.

El amplificador diferencial ofrece una ganancia de 36.5 y está provisto de un potenciómetro (RV2) para la puesta a cero del voltaje de "offset" del transductor.

La salida del amplificador diferencial entra a otra etapa de amplificación (IC3) cuya función es la de adaptar las escalas y eliminar el "offset".

Para esto, se ha previsto una amplificación regulable por medio del potenciómetro RV4 (amplificación de 2.7 a 3.9) y una regulación de "offset" variable entre 0 y 6.8 Volts mediante el potenciómetro RV3.

De este modo, a la salida se obtendrá un voltaje que será proporcional a la fuerza según la relación: $100mV=1Kg$.

Los amplificadores del acondicionador realizan también una función filtrante (Filtro paso bajo), para eliminar los ruidos de alta frecuencia.

OBJETIVO:

— Familiarización con el uso del transductor de fuerza, tipo celda de carga resistiva, y determinación de la linealidad del propio transductor, la linealidad del transductor-acondicionador así como el análisis y calibración del acondicionador de señal.

EQUIPO Y MATERIAL:

- Voltmetro digital.
 - Fuente de voltaje (PS1).
 - Módulo G25 (Acondicionador de fuerza).
 - Celda de carga.
-

- Pesos patrón
- Cables de conexión.
- Lámpara incandescente.

DESARROLLO

EXPERIMENTO 1. CALIBRACION DEL ACONDICIONADOR DE SEÑAL.

- Conectar los bornes +12,-12 y 0 V del panel a la fuente de voltaje (apagada).
- Utilizando el conector apropiado, conectar la celda de carga al panel.
- Conectar el voltmetro digital entre el borne 1 y el borne de tierra.
- Encender la fuente.
- Regular el potenciómetro RV1 hasta que se lea un voltaje de 10.0 V en el voltmetro digital .
- Conectar ahora el voltmetro digital entre el borne 4 y el borne de tierra.
- Conectar a tierra los bornes 2 y 3 del panel.
- Regular el potenciómetro RV2 hasta que se lea 0 V en el voltmetro digital.
- Desconectar los bornes 2 y 3 de tierra.
- Conectar el voltmetro digital en la salida "out".
- Regular el potenciómetro RV3 hasta que se lea 0 V en el voltmetro digital.
- Cargar la celda de carga con un peso patrón menor o igual a 20 Kg.
- Regular el potenciómetro RV4 hasta obtener una lectura correspondiente a una sensibilidad de $\frac{0.1V}{Kg}$

EXPERIMENTO 2. DETERMINACION DE LA CURVA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR.

- Llevar a cabo la calibración del acondicionador.
 - Conectar el voltmetro digital con la salida "out".
 - Cargar la celda con pesos de valor conocido (en saltos de 250 gr.) y medir el voltaje de salida.
 - Anotar los resultados en la tabla 1
-

N	F [Kg]	Vout [V]

Tabla 1

EXPERIMENTO 3. DETERMINACION DE LA CURVA DEL TRANSDUCTOR BAJO EFECTO DE TEMPERATURA.

- Llevar a cabo la calibración del acondicionador.
- Calentar la celda de carga (mediante una lámpara incandescente) y en estas condiciones de temperatura, obtener los datos en forma similar que en el experimento 2 y registrarlos en una tabla similar a la tabla 1.

EXPERIMENTO 4. DETERMINACION DE LA CURVA DEL TRANSDUCTOR BAJO EL EFECTO DE CALENTAMIENTO DEL TRANSDUCTOR.

- Llevar a cabo la calibración del acondicionador.
- Calentar el acondicionador de señal mediante una lámpara incandescente y en estas condiciones de temperatura obtener los datos de forma similar que en el experimento 2 y registrarlos en una tabla semejante a la tabla 1.

ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS

1. Mencione cual es el objeto de la calibración, especificando las funciones de los potenciómetros utilizados.
2. Hacer una grafica de fuerza contra voltaje a partir de los datos obtenidos en el experimento 2.
3. Trazar la recta óptima del transductor por medio de un método gráfico, como el de pares de puntos, o analíticamente con un método de ajuste de curvas.
4. Obtener la linealidad del transductor bajo las condiciones del experimento 2.
5. Obtenga el modelo matemático del transductor.
6. Obtenga los siguientes parámetros:
 - Resolución.

-Sensibilidad.

-Rango de operación.

7. Con base a los datos del experimento 3 repita los puntos 2 , 3 y 6 .
8. Dibujar en una misma gráfica la recta óptima obtenida del experimento 2 y la recta óptima del experimento 3.
9. Con base a los datos de la gráfica anterior, calcular la variación relativa al voltaje de plena escala, expresada en valores porcentuales, donde V_1 es el voltaje a una fuerza dada a la temperatura ambiente y V_2 el voltaje a la misma fuerza con la celda calentada.
10. Con base a los datos del experimento 4 repita los puntos 2, 3 y 6.
11. Dibujar en una misma gráfica las rectas óptimas obtenidas de los experimentos 2 y 4.
12. Con base a los datos de la gráfica anterior, calcular la variación relativa al voltaje de plena escala, expresada en valores porcentuales, donde V_1 es el voltaje a una fuerza dada a la temperatura ambiente y V_2 el voltaje a la misma fuerza con el acondicionador calentado.
13. Explique como afecta la temperatura en la respuesta del transductor y compárela con la variación teórica.