



La necesidad de tener que medir y analizar las vibraciones que se producen en muchas clases de estructuras en situaciones particulares ha fomentado el desarrollo de ciertos tipos de transductores, capaces de transformar las aceleraciones mecánicas en señales eléctricas. En forma análoga, debido a la gran difusión de la electrónica en las máquinas industriales, hoy en día son de uso común también, los transductores de velocidad angular. En particular, existen transductores (detectores o sensores) de aceleración llamados acelerómetros y transductores de velocidad angular llamados dínamos tacométricos. A fin de que las señales eléctricas analógicas obtenidas en las salidas de los transductores puedan ser utilizadas correctamente, es necesario emplear también sistemas de interfaces eléctricas, los cuáles se denominan acondicionadores de señal.

TRANSDUCTORES DE ACELERACIÓN: ACELEROMETROS.

Los acelerómetros son transductores electromecánicos en cuya salida suministran una señal eléctrica proporcional a la aceleración vibratoria a la cuál se les somete.

El elemento activo de un acelerómetro está constituido por uno o varios discos (o barras) piezoeléctricos sometidos en la parte superior o lateralmente a cargas representadas por una o varias masas sísmicas y mantenido en posición mediante un soporte rígido; esto se representa en la figura 1.

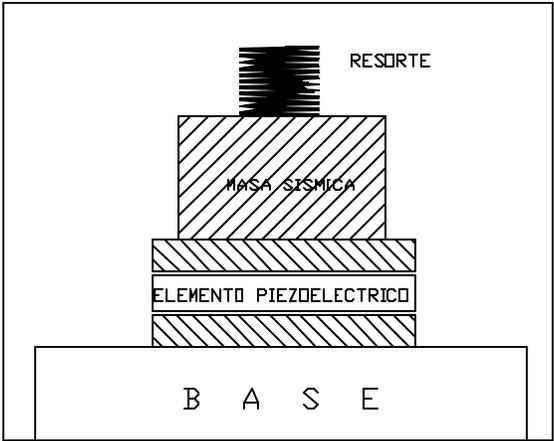


Figura 1

Cuando el acelerómetro se halla sujeto a vibraciones, la masa sísmica ejerce una fuerza variable sobre los discos o barras que, debido al efecto piezoeléctrico, generan una carga eléctrica.

La señal eléctrica producida por el elemento piezoeléctrico será proporcional a la aceleración a la que se halle sometido dicho transductor.

Esta señal eléctrica podrá medirse electrónicamente en los bornes de salida del acelerómetro y utilizarse para determinar con gran precisión la amplitud de la vibración, la frecuencia y la forma de onda.

CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE LOS ACELEROMETROS.

Sensibilidad (referida a las cargas eléctricas o a voltajes).

Un acelerómetro piezoeléctrico puede ser considerado como una fuente de carga o de voltaje. Su sensibilidad depende de la relación entre la señal eléctrica presente en su salida y la aceleración que provoca dicha señal, puede expresarse en unidades de carga por unidades de aceleración:

$$S_q = \left[\frac{pC}{m s^2} \right]$$

donde: pC corresponde a picoCoulombs

y también en unidades de tensión por unidades de aceleración:

$$S_v = \left[\frac{mV}{m s^{-2}} \right]$$

donde: mV corresponde a milivolts

La sensibilidad no sólo depende del tipo y tamaño del elemento piezoeléctrico, sino también del peso de las masas sísmicas que actúan como carga.

Los acelerómetros son relativamente sensibles a las aceleraciones que se producen sobre el plano perpendicular a su eje principal de sensibilidad, como se muestra en la figura 2. Esto se debe a pequenísimas irregularidades de la estructura, de la alineación y de la polarización del elemento piezoeléctrico.

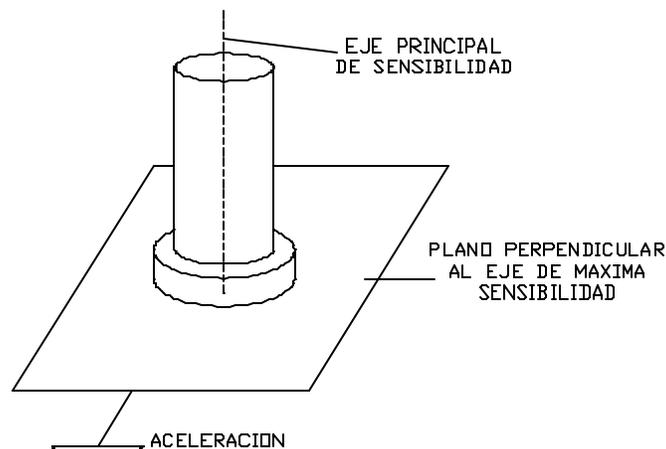


Figura 2

Los valores típicos de la máxima sensibilidad transversal varían del 3 al 5% de la sensibilidad correspondiente al eje principal.

Respuesta en Frecuencia.

La curva característica de la respuesta en frecuencia de un acelerómetro se muestra en la figura 3. Se considera normalmente el límite de frecuencia superior igual a un tercio de la frecuencia de resonancia, con un error inferior al 12%.

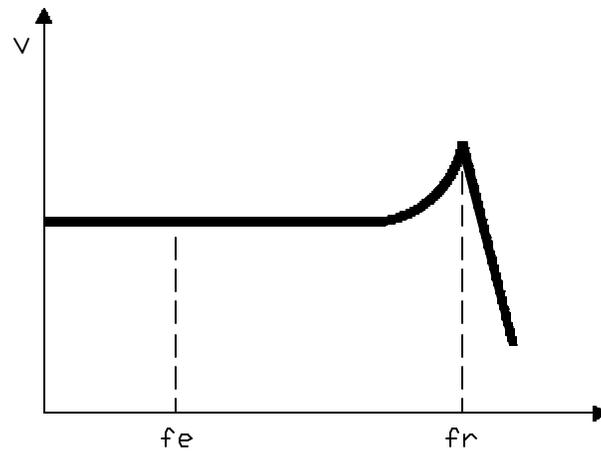


Figura 3.

La respuesta en frecuencia de un acelerómetro a bajas frecuencias depende, principalmente del tipo de preamplificador utilizado en el acondicionador.

En el caso de preamplificadores de voltaje, la resistencia de entrada de los mismos hace disminuir la constante de tiempo eléctrica del acelerómetro. Por esta razón, si se desean realizar mediciones a bajas frecuencias, es necesario utilizar preamplificadores de voltaje con resistencias de entrada muy elevadas.

Este problema no existe con los preamplificadores de carga, ya que la realimentación capacitiva hace que aumente la constante de tiempo del acelerómetro, permitiéndolo así, efectuar mediciones a frecuencias muy bajas.

Campo Dinámico.

El campo dinámico de un acelerómetro define el margen dentro del cual la señal eléctrica de salida es directamente proporcional a la aceleración aplicada en su base. Los límites son determinados por la robustez mecánica y por la eventual precarga del elemento piezoeléctrico. Los acelerómetros piezoeléctricos pueden usarse para medir niveles de vibración muy bajos.

Teóricamente, el valor de la salida de los mismos es lineal hasta cero, pero en el nivel de ruido del sistema de medición y el ambiente en que se realizan las mediciones impone un límite práctico. En consecuencia, cuando se realizan mediciones con bajos niveles de vibración es importante utilizar un preamplificador con un nivel de ruido reducido y además, habrá de efectuar las conexiones con cables cortos y fijos, para hacer que el ruido introducido por el movimiento mecánico sea mínimo.

Sensibilidad Ambiental.

Al escoger un acelerómetro se debe tomar en cuenta las condiciones ambientales bajo las cuales se utilizará, tales como:

Temperatura. Los acelerómetros poseen temperaturas límite de funcionamiento. A bajas temperaturas, la sensibilidad sufre variaciones. En la figura 4 se muestran los distintos niveles de sensibilidad en función de la temperatura, para el caso de un acelerómetro provisto de un elemento activo de material piezoeléctrico tipo PZ 23.

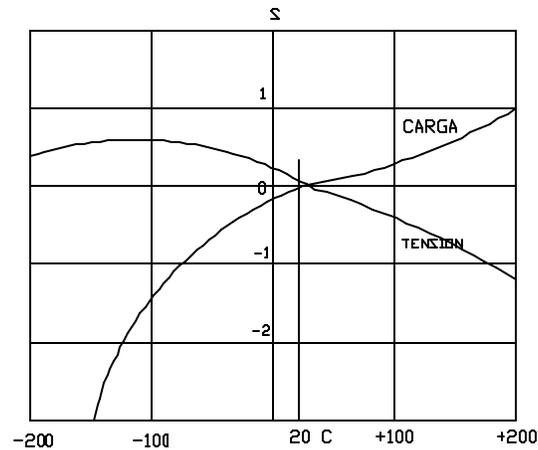


Figura 4

Los acelerómetros piezoeléctricos son sensibles también a los cambios de temperatura y esta característica es muy importante en las mediciones con bajas frecuencias y niveles.

Presión acústica. La sensibilidad acústica de los acelerómetros es mínima y se le puede despreciar en la mayor parte de las aplicaciones. Normalmente, la vibración acústica introducida por una estructura es mucho mayor que la señal provocada por la sensibilidad acústica del transductor receptor de la vibración.

Voltajes en la base. Pueden llegar a originarse a causa de deformaciones de la estructura en la que está montado el acelerómetro. Es importante que las bases de estos sean muy rígidas, para reducir la sensibilidad a las tensiones generadas.

Montaje de un acelerómetro. En altas frecuencias, es importante que el acelerómetro esté bien sujeto al objeto a probar. La precisión de mediciones está vinculada sobre todo a la solidez de la montura del acelerómetro.

La respuesta en frecuencia depende de la calidad del montaje. El mejor de todos es el que se realiza fijándolo sobre una superficie plana y lisa mediante un tornillo y tuerca de acero. Usando otros sistemas la frecuencia de resonancia será inferior.

ACONDICIONADORES DE SEÑAL PARA ACELERÓMETROS.

En los sistemas de medición basados en el uso de un acelerómetro, el acondicionador de señal cumple 2 funciones:

- a) Transformar la elevada impedancia de salida del acelerómetro en otra inferior.
- b) Amplificar la señal de entrada, relativamente débil, del acelerómetro cuando los instrumentos que le siguen no poseen una sensibilidad suficientemente alta. En este caso, existen dos posibilidades de amplificación representadas por:
 - los amplificadores de voltaje.
 - los amplificadores de carga.

Los primeros actúan presentando la máxima resistencia posible al acelerómetro y manteniéndola baja la capacidad de entrada, para evitar pérdidas de sensibilidad. Los segundos presentan valores elevados de capacidad y de resistencia de entrada, por lo que no altera las características de sensibilidad.

TRANSDUCTORES DE VELOCIDAD: DINAMO TACOMETRICO.

El modo más simple de calcular la velocidad de un cuerpo rígido es el de medir el desplazamiento de uno de sus puntos en un cierto tiempo, ó el calcular el tiempo necesario para que uno de sus puntos recorra un determinado espacio.

Entre los transductores de velocidad se encuentra la dínamo tacométrica, el codificador (encoder), y el resolucionador sincro (synchro resolver). Siendo el transductor que se analizará en ésta práctica el primero en mención.

Dínamo Tacométrica. Para la medición de velocidades angulares se utilizan con frecuencia las dínamos tacométricas.

En ellas, el campo magnético se obtiene por lo general por medio de un imán permanente de herradura con 2 piezas polares entre sus ramas. La espira del inducido, situada en el entrehierro, gira a una velocidad angular ω . Dicha espira es atravesada por un flujo magnético que varía según la relación $\Phi = \Phi_0 \cos \omega t$; por lo que la tensión en sus extremos resulta ser : $e = \Phi_0 \omega \sin \omega t$ cuyo valor máximo es proporcional a la velocidad angular. Lo anterior se muestra en la figura 5.

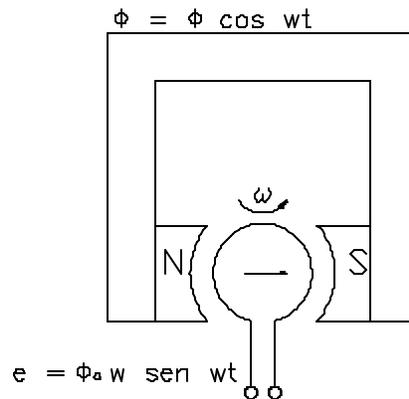


Figura 5

Realmente la dínamo está construída por un estator donde está el imán y por un rotor, en el que están arrolladas N espiras, separadas entre sí por un ángulo eléctrico cuyo valor es de $2\pi/N$.

La señal de salida se obtiene a través de 2 escobillas que, del colector, se obtienen los voltajes senoidales.

Constante Tacométrica. Es parámetro fundamental que caracteriza una dínamo tacométrica el cual indica la variación de voltaje por radianes/segundo. Para la dínamo utilizada, la constante tacométrica es de 14.5 mV/rpm.

$$K_T = \frac{60V}{2\pi N}$$

donde:

- N - Valor nominal del número de revoluciones por minuto (rpm)
- V - Voltaje nominal (Volts)
- K_T - Constante tacométrica ($V/\text{rad } s^{-1}$)

Los valores que normalmente proporciona el fabricante son N y V.

LINEALIDAD

La linealidad referida al valor de plena escala está dada por:

$$linealidad = \left(\frac{\pm 1}{2} \right) \frac{|V_1 - V_2|}{F.S.O.}$$

Este valor se expresa normalmente en porcentaje. El término F.S.O. indica la salida a plena escala (Full Scale Output), es decir, la variación de voltaje que sufre la salida cuando la aceleración varía según la cantidad igual al valor total de su escala y V1 y V2 son los valores de voltaje máximo y mínimo respectivamente cuando el valor de la aceleración está a plena escala. En este caso la linealidad especificada por el fabricante es de 0.2 %.

DESCRIPCION DEL EQUIPO.

El equipo consta de dos partes principales:

- Unidad MIL 28.
- Acondicionadores de señal

Unidad MIL 28

La unidad MIL 28, ilustrada en la figura 6, está constituida por un mecanismo de transmisión 'biela-manivela' para generar la aceleración, por un motor de cc, una dínamo tacométrica y un sistema óptico para generar y determinar la velocidad angular, respectivamente.

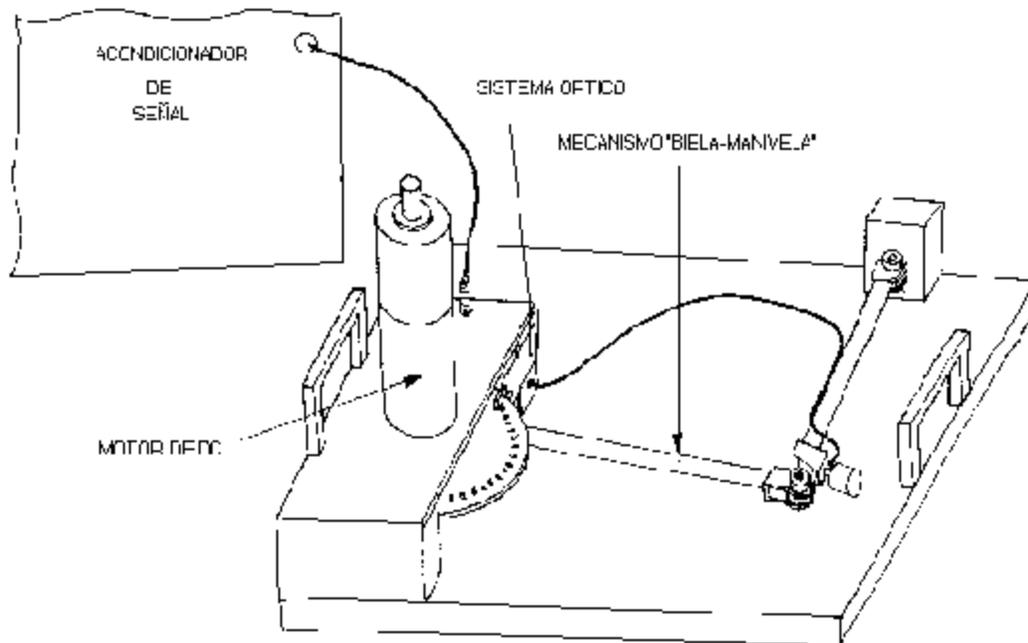


Figura 6

El motor de cc de imanes permanentes se utiliza para generar la rotación de la dínamo tacométrica y del mecanismo 'biela-manivela'. La velocidad máxima del motor sin el acoplamiento de la biela es de 3200 rpm con un voltaje de alimentación de aproximadamente 22 V.

Cuando se usa el mecanismo de la 'biela-manivela', éste presenta una fuerte carga dada por los movimientos extremos de la biela (puntos muertos) por lo que el motor sólo puede alcanzar una velocidad máxima de 600 rpm (4.5 V de alimentación y hasta 1.5 A).

Por lo anterior, para analizar la dínamo tacométrica en todo el campo de velocidades, se tiene que desacoplar el mecanismo de la biela del disco al cual esta atornillado.

Mecanismo de 'biela-manivela' para generar la aceleración.

Para obtener la relación que vincula la velocidad del motor con la aceleración a la que está sometido el acelerómetro, éste se coloca al pie de la biela y se considera que su movimiento es a lo largo de la recta Po y P1, es decir, punto muerto exterior e interior respectivamente, esto se ilustra en la figura 7.

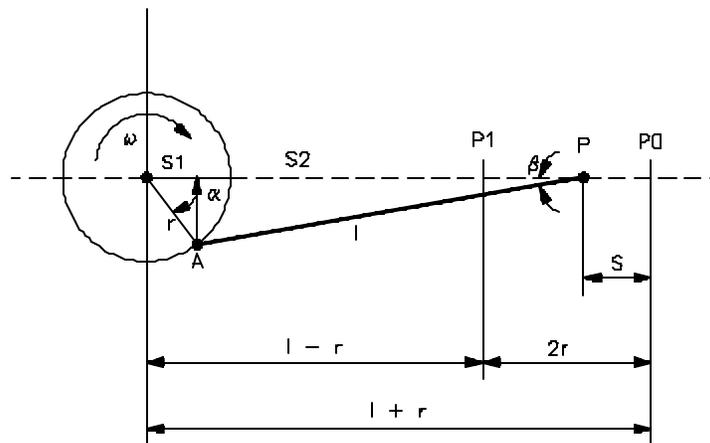


Figura 7.

Por otro lado, la fracción del recorrido del pie de la biela cuando la manivela gira en sentido horario un ángulo α desde el punto muerto exterior, es:

$$S = P_0 - P = r + l - (s_1 + s_2)$$

esto es:

$$S = r + l - r \cos \alpha - l \cos \beta$$

$$S = r (1 - \cos \alpha) + l (1 - \cos \beta)$$

Aplicando las dos siguientes identidades trigonométricas:

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \lambda$$

siendo $\lambda = \frac{r}{l}$

y

$$\cos \beta = \sqrt{(1 - \text{sen}^2 \beta)}$$

se obtiene:

$$\cos \beta = \sqrt{(1 - \lambda^2 \text{sen}^2 \alpha)}$$

completando cuadrados de:

$$(1 - \lambda^2 \text{sen}^2 \alpha) = (1 - \frac{\lambda^2}{2} \text{sen}^2 \alpha)^2 - \frac{\lambda^4}{4} \text{sen}^4 \alpha$$

por lo que:

$$\cos \beta = \sqrt{(1 - \frac{\lambda^2}{2} \text{sen}^2 \alpha)^2 - \frac{\lambda^4}{4} \text{sen}^4 \alpha}$$

y considerando que:

$$\frac{\lambda^4}{4} \text{sen}^4 \alpha \approx 0$$

$$\cos \beta = 1 - \frac{\lambda^2}{2} \text{sen}^2 \alpha$$

y por tanto, la expresión del desplazamiento s queda:

$$S = r (1 - \cos \alpha) + l \left(\frac{\lambda^2}{2} \text{sen}^2 \alpha \right)$$

o bien:

$$S = r \left[(1 - \cos \alpha) + \frac{\lambda}{2} \text{sen}^2 \alpha \right]$$

Esta ecuación representa el desplazamiento del pie de la biela, la cual si se deriva con respecto al tiempo y considerando $\alpha = \omega t$, se obtiene la ecuación de la velocidad del pie de la biela, esto es:

$$S = r - r \cos \omega t + \frac{r \lambda}{2} \text{sen}^2 \omega t$$

$$V_p = \frac{dS}{dt} = [-r(-\text{sen } \omega t)(\omega)] + \frac{r \lambda}{2} [2 \text{sen } \omega t (\cos \omega t (\omega))]$$

Simplificando, se obtiene la expresión de la velocidad:

$$V_p = r \omega (\text{sen } \alpha + \frac{\lambda}{2} \text{sen } 2\alpha)$$

y volviendo a derivar V_p con respecto al tiempo se obtiene la aceleración del pie de la biela:

$$V_p = r \omega \operatorname{sen} \omega t + \frac{\lambda r \omega}{2} \operatorname{sen} 2 \omega t$$

$$Q_p = \frac{dV_p}{dt} = r \omega [\cos \omega t (\omega)] + \frac{\lambda r \omega}{2} [\cos 2 \omega t (2 \omega)]$$

Simplificando, se obtiene la expresión de la aceleración:

$$Q_p = r \omega^2 (\cos \alpha + \lambda \cos 2 \alpha)$$

Evalutando Q_p en los puntos muertos exterior ($\alpha = 0$) e interior ($\alpha = 180$), y considerando $\omega = 2 \Pi N$, $K = (2 \Pi / 60)^2 r$ se tiene:

$$Q_{p \alpha 0} = N^2 \left(\frac{2 \Pi}{60} \right)^2 r \left(1 + \frac{r}{l} \right) \quad [m s^{-2}]$$

$$Q_{p \alpha 180} = -N^2 \left(\frac{2 \Pi}{60} \right)^2 r \left(1 - \frac{r}{l} \right) \quad [m s^{-2}]$$

$$Q_{p \alpha 0} = N^2 K \left(1 + \frac{r}{l} \right)$$

$$Q_{p \alpha 180} = -N^2 K \left(1 - \frac{r}{l} \right)$$

donde:

N = número de rpm del motor

r = 5.5 cm - radio de la manivela (en metros)

l = 50 cm - longitud de la manivela (en metros)

La aceleración entre los puntos extremos queda dada por:

$$Q_p = Q_{\alpha 0} - Q_{\alpha 180}$$

que es la ecuación que relaciona la aceleración del pie de la biela (o bien la del acelerómetro) y la velocidad del motor en los puntos muertos exterior e interior.

Evalutando la aceleración Q_p en los puntos interior y exterior, se tiene que:

$$Q_p = 2 n^2 603 * 10^{-6} \quad [m s^{-2}]$$

y la aceleración (g) estará dada por:

$$g = \frac{Q_p}{9.81} \quad [unidad de aceleración]$$

Evaluando $Q_{\alpha 0}$, $Q_{\alpha 180}$ y Q_p a una aceleración de 600 rpm:

$$Q_{\alpha 0} = 246.8 \text{ m s}^{-2} = 26.1 \text{ g} \quad \Rightarrow \quad Q_{\alpha 0} = 2.61 \text{ V}$$

$$Q_{\alpha 180} = -177.28 \text{ m s}^{-2} = -18.07 \text{ g} \quad \Rightarrow \quad Q_{\alpha 180} = -1.8 \text{ V}$$

$$Q_p = Q_{\alpha 0} - Q_{\alpha 180} = 434.08 \text{ m s}^{-2} = 44.24 \text{ g} \quad \Rightarrow \quad Q_p = 4.42 \text{ V}$$

Acondicionador de Señal

El acondicionador de señal, módulo G28, se muestra en la figura 8, esta dividido en tre partes principales:

- Sistema óptico para determinar la velocidad angular.
- Acondicionador de la dínamo tacométrica.
- Acondicionador para el acelerómetro.
- Circuito para determinar la velocidad angular

En la unidad MIL 28 está acoplado al eje del motor de cc un disco con 60 perforaciones, las cuales se encuentran dispuestas en forma radial. Un sistema óptico genera un pulso en presencia de cada perforación del disco. Dichos pulsos son enviados al módulo G28 a través del cable de interconexión y detectados en el borne 7. La señal de pulsos pasa a un comparador y a través del diodo D se fija la amplitud de los pulsos, por un lado a C-MOS compatible y por otro, mediante el transistor T y el diodo zener Z se obtiene la salida TTL compatible.

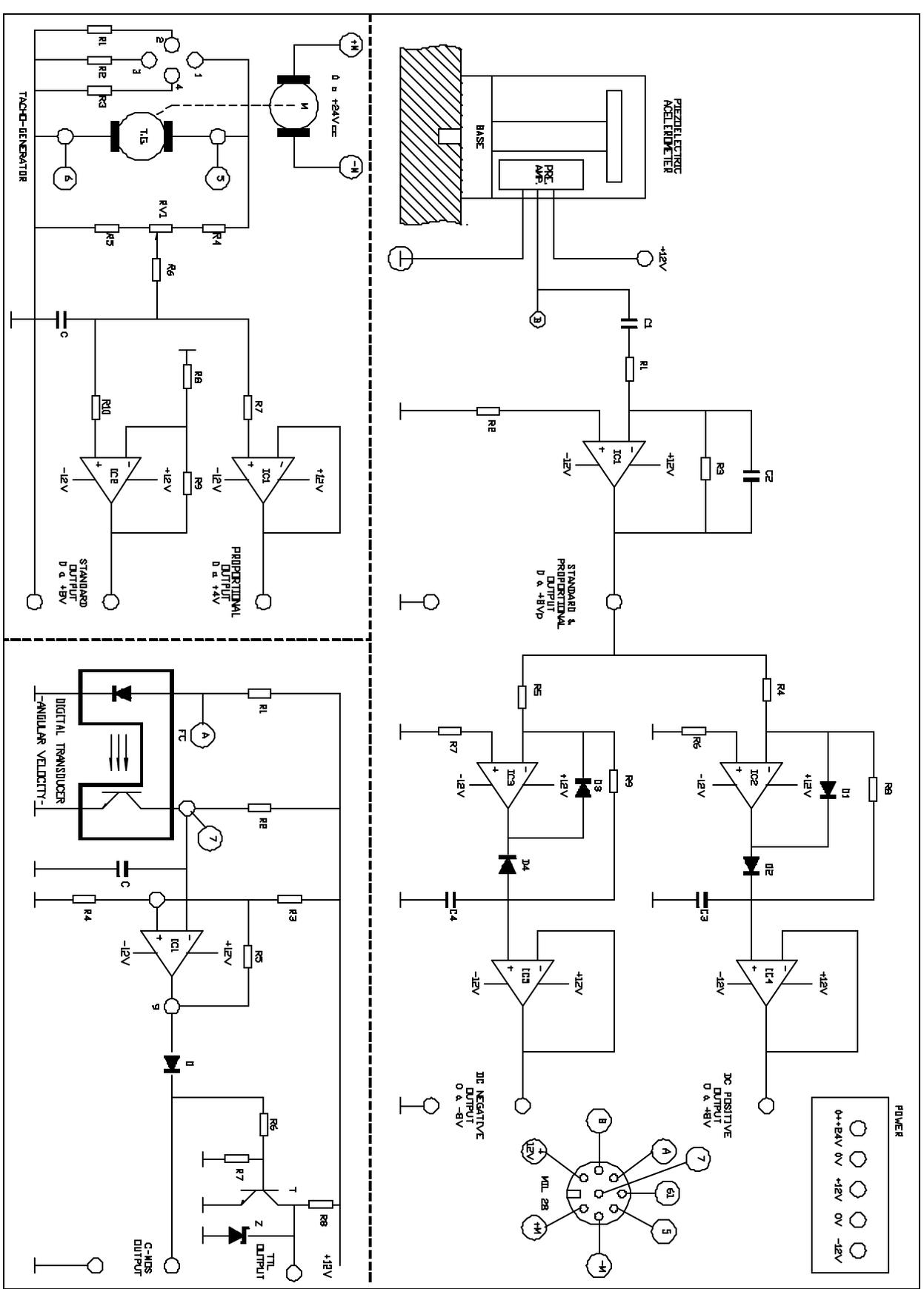
Acondicionador de la Dínamo Tacométrica

Consiste en un divisor de voltaje (R4, R5 y RV1) para poder aplicar los voltajes de la dínamo tacométrica a los operacionales IC1 e IC2, los cuales funcionan como seguidor y amplificador de voltaje para obtener una salida proporcional de 4000rpm = 4V, o bien, estandard de 4000rpm = 8V respectivamente.

Acondicionador de señal para el Acelerómetro

La señal proveniente del acelerómetro se preamplifica ahí mismo y pasa al acondicionador, aquí el capacitor C1 elimina la componente de directa presente en la salida del preamplificador, de aquí pasa al amplificador operacional IC1, el cual amplifica la señal para obtener una salida de 8Vpp y además actúa como filtro de altas frecuencias.

Los amplificadores operacionales IC2 e IC3 detectan las vibraciones en el campo positivo y negativo respectivamente, mientras que IC4 e IC5 conectados como seguidores de voltaje funcionan como elementos de acoplamiento para el instrumento de medición.



OBJETIVO

- Familiarizar al alumno con los transductores de aceleración y velocidad angular.
- Trazar la recta de cada transductor y obtener el modelo matemático de cada transductor.
- Obtener el valor de la linealidad del sistema transductor - acondicionador.
- Determinar el valor de la constante tacométrica, es decir, la cifra que indica la variación de tensión en función del número de rpm.

MATERIAL EMPLEADO

- Osciloscopio.
- Frecuencímetro.
- Fuente voltaje (PS1).
- Vóltmetro digital.
- Unidad MIL-28.
- Módulo G28.

DESARROLLO

EXPERIMENTO 1: DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA "ACELERACIÓN-TENSIÓN", SALIDA STANDAR & PROPORCIONAL.

En el panel del módulo G28 correspondiente al acondicionador de señales de los transductores, realizar las siguientes conexiones:

- Conectar los bornes de +12V, -12V y 0-24 V (variable), con sus respectivas tierras, del panel a una fuente de alimentación estable PS1 (NOTA: Asegurarse que la fuente variable esté en 0V y que esté apagada).
- Conectar el módulo G28 a la unidad MIL-28 por medio del cable correspondiente, como se muestra en la figura 6.
- Conectar el frecuencímetro entre el borne marcado C-MOS y el borne de tierra, situándolo en la posición 1 SEC, de modo que pueda leerse directamente la velocidad del motor en rpm.
- Verificar el cableado y encender la fuente.

- Aumentar el voltaje de alimentación del motor (de la fuente de 0 - 24 V) desde 0 V, de forma que el motor gire a velocidades crecientes con saltos indicativos de aproximadamente 50 rpm. La velocidad máxima que se puede alcanzar el motor con la biela es de 600 rpm.
- Medir con el osciloscopio el voltaje Standar y Proporcional con el multímetro la Salida positiva dc (α_0) y la Salida negativa dc (α_{180})

RPM ¹	Salida Estandar Proporcional ²	Salida CD Positiva ($Q_{\alpha 0}$) ³	Salida CD Negativa ($Q_{\alpha 180}$) ⁴
0			
50			
100			
200			
300			
400			
500			
600			

Tabla 1

- 1 Medición en el frecuencímetro.
- 2 Medición en el osciloscopio.
- 3 y 4 Mediciones con el vóltmetro digital.

EXPERIMENTO 2: DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA VELOCIDAD ANGULAR-VOLTAJE DEL TRANSDUCTOR

NOTA:

Para poder abarcar todo el rango de operación del transductor de velocidad, es muy importante desacoplar la biela-manivela del mecanismo de rotación, quitando el tornillo que une el disco y la biela.

- Conectar los bornes de +12V, -12V y 0-24 V (variable), con sus respectivas tierras, del panel a una fuente de alimentación estable PS1 (NOTA: Asegurarse que la fuente variable esté en 0V y que esté apagada).
- Conectar el módulo G28 a la unidad MIL-28 por medio del cable correspondiente, como se muestra en la figura 6.
- Conectar el frecuencímetro entre el borne C-MOS y el borne de tierra.
- Verificar las conexiones y encender la fuente.
- Variar la velocidad del motor, mediante el voltaje de la fuente variable a partir de cero, con saltos indicativos en el frecuencímetro de 100 rpm y en correspondencia con cada uno de dichos saltos, medir con el vóltmetro digital los siguientes puntos:
 - Salida Standard
 - Salida Proporcional

Práctica 4

- Salida del tacogenerador (en los bornes 5-6)
 - a) En vacío (sin carga)
 - b) Con carga R1 (conectando bornes 1-2)
 - c) Con carga R2 (conectando bornes 1-3)
 - d) Con carga R3 (conectando bornes 1-4)

— Registrar los datos generados en la Tabla 2.

RPM	Salida Estandar	Salida Proporcional	Salida del Tacogen. (vacío)	Salida del Tacogen. (carga R1)	Salida del Tacogen. (carga R2)	Salida del Tacogen. (carga R3)
0						
100						
200						
300						
2900						
3000						

Tabla 2

ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS

1. Calcular los valores teóricos de $Q_{\alpha 0}$, $Q_{\alpha 180}$, g y el voltaje correspondiente a la aceleración g.
2. Con base a los cálculos del punto anterior, graficar la curva teórica que caracteriza al transductor de aceleración, esto es, V vs aceleración.
3. Con base a los datos de la tabla I, calcular la aceleración g y graficar la curva real en la misma gráfica del punto 2.
4. Con base a las gráficas teórica y real del transductor de aceleración, determine la linealidad del transductor-condicionador en ambos casos.
5. Determinar el modelo matemático del transductor de aceleración incluyendo el error máximo de operación.
6. Analizar y explicar el funcionamiento del acondicionador de señales del transductor de aceleración.
7. Con base a los datos de la tabla II, grafique las diferentes curvas características del transductor de velocidad, teniendo en el eje de las abscisas los valores de rpm y en el eje de las ordenadas los voltajes de h dínamo tacométrica en vacío y con cada una de sus cargas, así como el voltaje en la salida estándar y proporcional.
8. Explique cada una de las curvas del punto anterior, mencionando como afectan las cargas en la respuesta.
9. Determinar la constante tacométrica K_T , interpretarla y comparala con la especificada con el fabricante.

10. Determinar la linealidad del transductor de velocidad y comparela con la que especifica el fabricante.
11. Exprese el modelo matemático de dicho transductor.
12. Analizar y explicar el funcionamiento del acondicionador de señal del transductor de velocidad, así como el circuito detector de rpm.
13. Investigue y presente una aplicación de los transductores utilizados en la práctica.