

LA FUERZA Y SU MEDIDA

Desde el punto de vista de la física estática, se define a la "fuerza", como aquella acción que, ejercida sobre un cuerpo, produce sobre él una deformación, que será tanto más grande como mayor sea la fuerza causante. El valor numérico correspondiente a su intensidad, que en el sistema internacional de unidades se mide en newton (N), será la primera información precisa para su conocimiento. Ahora bien, la misma fuerza aplicada sobre un mismo objeto producirá efectos distintos en función de la dirección sobre la que la fuerza actúa. Así, las deformaciones pueden serlo por tracción y compresión (fuerza paralela al eje longitudinal), flexión (fuerza perpendicular al eje longitudinal), torsión (par de fuerzas) o cizalladura (fuerzas tangenciales). Esto es debido a que la fuerza es una magnitud vectorial y, por tanto, es preciso asociar al valor de su intensidad información relativa a la dirección y sentido de actuación.

La deformación es debida a que las partículas del material se desplazan hasta una posición que permita establecer un equilibrio entre las fuerzas interiores del material y la aplicada exteriormente, y se mantendrá mientras subsista la fuerza actuante externa.

En el momento en el que una fuerza deformadora cesa en su acción, las fuerzas interiores tienden a restituir la posición inicial, pudiendo suceder que el cuerpo deformado recupere completamente, o no, su forma primitiva. En el primer caso, el cuerpo es perfectamente elástico e inelástico en el segundo. El que un cuerpo sea elástico o inelástico depende de las características del material y de la magnitud de la deformación, pudiendo considerar que, para pequeñas deformaciones, todos los cuerpos son elásticos. Situados en el margen de elasticidad de cada material, se comprueba experimentalmente que las deformaciones producidas, son directamente proporcionales a las fuerzas ejercidas. Esta constatación, conocida con el nombre de Ley de Hooke, es el punto de partida para la medida de las fuerzas.

LEY DE HOOKE

La deformación sufrida por un cuerpo elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada e inversamente a su sección.

$$L = KF/S$$

Por lo que se refiere a la tipología de las fuerzas presentes en el entorno industrial y, por tanto, sensibles a ser medidas, podemos considerar que tienen, básicamente, un comportamiento dinámico, ya que todos los sistemas mecánicos evolucionan con el tiempo. En función de la velocidad de variación a la que están sometidas, las posibles medidas a realizar serán:

1. *Estáticas*. Las referidas a soportes y estructuras resistentes sometidas a cargas fijas.
2. *Mixtas*. Cuando se realizan sobre soportes y estructuras sometidas a la acción de cargas de variación rápida.
3. *Dinámicas*. Las realizadas sobre acciones de variación rápida: fenómenos de vibración, impacto, etc.

CADENA DE MEDIDA

En su expresión más simplificada, el diagrama de bloques de una cadena de medida, contiene un elemento captador, sensible a la magnitud deseada y un aparato de medida que responda a las informaciones aportadas por aquél. La misión de esta configuración es la de asignar valor numérico proporcional a cada magnitud física presente en su entrada.

El diagrama de bloques anteriormente referido será ampliado o modificado en función de las condiciones de trabajo específicas que marque el entorno o bien por las necesidades exigidas para la realización óptima del proceso de medida. Así, podemos complementarlo con circuitos amplificadores, filtros y correctores de linealidad para obtener una señal adecuada; convertidores analógico-digitales, multiplexores y registros cuando se precisa un tratamiento digital; convertidores tensión/intensidad, tensión/frecuencia o moduladores de frecuencia cuando se precise una transmisión a distancia de la señal, etc.

COMPONENTES DE LA CADENA DE MEDIDA

Sensores y transductores

En toda acción de medida de fuerzas, el primer proceso a realizar consiste en la extracción de parte de la energía del medio a medir, seguido de un segundo proceso consistente en la adaptación de esta energía obtenida a una expresión que sea directamente medible.

El primer proceso sugiere la idea de sentir, en el aspecto que detecta una variación energética, a veces insensible a nuestros sentidos, y responde con una señal que es función de la variable detectada. Veamos un ejemplo: En el proceso de medida de la tensión del hilo de un carrete bobinador, la fuerza ejercida por aquél provoca una deformación (estiramiento) en un elemento de soporte. Si este material es elástico y actúa dentro de ciertas condiciones (ley de Hooke), la relación entre deformación y fuerza es constante o lo que es lo mismo, la deformación sufrida será directamente proporcional a la fuerza ejercida.

Este primer proceso es realizado por un elemento denominado *Sensor* y su primera característica consiste en la capacidad para extraer la mínima cantidad de energía del medio a medir con el fin de no cargarlo excesivamente y alterar su valor.

Siguiendo con el ejemplo expuesto, como consecuencia de la fuerza ejercida (señal de excitación) se obtiene en el elemento sensor, una deformación (señal de respuesta), directamente proporcional a la magnitud medida. Ahora bien, esta deformación será, en la mayoría de las aplicaciones, transparente a nuestros sentidos, debido a sus bajos niveles de magnitud; por otra parte, un estiramiento o deformación es difícilmente medible y posee una baja capacidad de transmisión a distancia de la información obtenida.

Para hacer frente a estos inconvenientes junto a otros que puedan aparecer en otras aplicaciones, como niveles muy pequeños de la señal de excitación o falta de instrumentos adecuados, se deberá introducir una segunda acción dentro del proceso de medida, consistente en la conversión de la variable detectada en otra proporcional, pero en otra forma de energía que reúna las características de facilidad de medida, transmitabilidad y adecuación de instrumentos, características que anteriormente carecía.

Este segundo proceso es realizado por el *Transductor*. Su función es la de responder frente a un estímulo de entrada, con una señal proporcional pero de distinta forma física. Dado que en el entorno eléctrico y/o electrónico hay, disponible dispositivos muy adaptados al tratamiento de señales, es conveniente que los transductores respondan con magnitudes eléctricas, la variación de las cuales, aporten la información necesaria y exacta sobre el conocimiento de la magnitud medida.

Dentro de esta particularización, podemos definir al transductor como aquel dispositivo que, dentro de unos márgenes específicos de trabajo, responde con una magnitud eléctrica -V, I, Z -de relación proporcional frente a una excitación de entrada de magnitud no eléctrica.

Esto puede expresarse a partir de la relación: $D\mathbf{S}_m = \mathbf{S} D\mathbf{S}_e$

Donde, $D\mathbf{S}_m$ corresponde a las variaciones de la señal de excitación de naturaleza no eléctrica; $D\mathbf{S}_e$ corresponde a las variaciones eléctricas de la señal de respuesta; y \mathbf{S} factor de proporcionalidad definido como la sensibilidad del transductor.

Siguiendo con el ejemplo anterior de la bobinadora, una galga extensiométrica solidaria con el elemento sensor mediante adhesivos o soldadura, absorbe sus deformaciones y responde con una variación de su impedancia.

Desde el punto de vista del circuito de salida, un transductor puede ser interpretado como un generador o como una impedancia. En el primer caso, el transductor aporta directamente una señal eléctrica -V, I - que es proporcional a la magnitud medida. En este caso se trata de transductores activos.

En los dispositivos del segundo tipo, la respuesta del transductor frente a una magnitud de excitación, se traduce en una variación de los parámetros R, L o C del circuito. En este caso la medida se realizará en base a la alteración que estos parámetros provoquen sobre la tensión o la intensidad generados por una fuente externa. Los transductores correspondientes a esta segunda tipología se denominan pasivos.

Transductores para la medida de fuerzas

Galgas extensiométricas

Son transductores pasivos, que aplicados sobre un elemento sensor, permiten medir la fuerza ejercida sobre él a partir de la deformación resultante. Así, fuerzas de compresión, tracción o flexión, aplicadas sobre materiales elásticos, generan deformaciones que son transmitidas a la galga, respondiendo ésta con una variación de su propia resistencia eléctrica. Esta relación causa efecto se conoce con el nombre de factor de galga y se expresa por:

$$DR/R = K DL/L$$

Su principio de funcionamiento se basa en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la presión a la que están sometidos. Esto es debido a que una presión ejercida sobre ellos reduce su volumen y, en consecuencia, la distancia interatómica, en el caso de los metales, o la concentración de portadores en el caso de los semiconductores, factores que repercuten en una variación de su resistividad.

Estos elementos disponen de un buen margen de medida, estando sus límites impuestos, por

una parte, por el coeficiente de elasticidad de la propia galga y el tipo de unión con el elemento sensor. Por lo que respecta al otro extremo, el límite de utilización viene impuesto por el ruido eléctrico de fondo de la galga y de sus elementos asociados.

El proceso de instalación de las galgas consiste en su fijación sobre el elemento que actúa como sensor, de forma que las isostáticas de la estructura atraviesen la parte activa de la banda extensométrica. Previamente, la superficie receptora habrá sido tratada convenientemente a fin de obtener la máxima eficacia del adhesivo.

Dado que son transductores pasivos, el proceso de medida será indirecto ya que previamente al cálculo de la magnitud de fuerza, será preciso realizar la correspondencia entre resistencia y tensión o intensidad eléctricas, a partir de un circuito adaptador.

Transductores piezoeléctricos

Su principio de funcionamiento se basa en el fenómeno de la piezoelectricidad, según el cual, al someter bajo la acción de fuerzas ciertos materiales naturales o artificiales, aparecen en sus caras opuestas cargas eléctricas de igual valor pero de signo contrario.

La polaridad e intensidad de la carga eléctrica resultante, es función del plano de corte del material (posición de las caras colectoras) y de la dirección de aplicación de la fuerza.

Si este material (cristal de cuarzo, por ejemplo), es introducido entre dos placas de material conductor y la señal obtenida es tratada por un amplificador de carga, obtenemos, en los terminales de salida, una variación de tensión proporcional a la fuerza mecánica aplicada.

Dado que la piezoelectricidad es un fenómeno esencialmente dinámico, esta tecnología de transductores tendrá su campo preferente de aplicación en medidas de evolución rápida.

Transductores magnéticos

Esta tipología de transductores aprovecha las propiedades del magnetismo como medio para obtener la conversión de magnitud, ofreciendo, básicamente, dos métodos para conseguirlo: El transformador diferencial y el método de reluctancia variable.

El primero de ellos se basa en la inducción mutua entre dos bobinas, al estar una de ellas, (o arrollamiento primario), alimentada por una fuente de corriente alterna. El secundario adopta la configuración de doble arrollamiento en oposición, con lo que la tensión inducida resultante será, inicialmente, nula. Ahora bien, si por el núcleo del transformador se desplaza un material ferromagnético, cuyo movimiento sea consecuencia de la aplicación de una fuerza, obtendremos en bornes del secundario una tensión alterna proporcional a la acción mecánica.

El método de la reluctancia variable es un proceso pasivo de transducción, basado en los efectos de variación de la autoinducción de un circuito magnético, alimentado con corriente alterna, cuando se modifica su reluctancia. Como consecuencia de la variación de autoinducción, habrá un cambio en la intensidad de corriente que atravesará el circuito.

Unidades transductoras para la medida de fuerzas

Para aplicaciones experimentales o de investigación, la medida de la magnitud fuerza se realiza, generalmente, mediante un proceso artesanal a partir de galgas extensométricas fijadas directamente sobre la estructura bajo prueba. Esto implica que el usuario realice el proceso de selección de la galga, elección del punto de medida, preparación de su superficie, fijación de la galga,

medición de la variación de resistencia eléctrica y cálculo de su correspondencia en unidades de fuerza.

En el caso de aplicaciones generales de control de automatismos, sistemas de pesaje, máquinas de ensayo, etc., la medida de fuerzas se realiza a partir de unidades transductoras estándar que integran las funciones sensora y transdutora. Estas unidades son convertidores de medida que responden con una señal eléctrica analógica, proporcional a la carga que actúa sobre ellas.

Básicamente están constituidas por un núcleo de acero deformable como elemento receptor de la carga a medir. La forma y dimensionado de este elemento sensor depende del tipo de célula y determina sus características: tipo de fuerza (tracción o compresión), margen de medida, precisión y perfil geométrico. Su forma física, (columna, anillo, etc.) será función del tipo de medida a realizar y las principales características que se espera de este elemento dinamométrico, son las siguientes:

- Rigidez elevada, que le permitirá disponer de una elevada frecuencia propia del trabajo.
- Carga de ruptura elevada, para soportar altos niveles de carga.
- Limite elástico elevado, que le permitirá altos niveles de sensibilidad.
- Módulo de elasticidad bajo, que le permitirá actuar dentro de una gama extensa de medida.

El proceso de transducción se realiza generalmente a partir de galgas extensométricas adheridas al citado elemento dinamométrico, si bien hay dispositivos que lo realizan a partir de cristales de cuarzo.

Las ventajas de estos dispositivos transductores son:

- Tamaño reducido
- Peso ligero
- Desplazamientos móviles
- Ausencia de partes móviles
- Simplicidad de instalación
- Facilidad de mantenimiento

Los dispositivos transductores actúan correctamente cuando la dirección de la carga coincide con la especificada, por lo que será preciso, en la instalación de estos dispositivos, evitar la presencia de fuerzas laterales o de torsión respecto a la original, producidas por elementos parásitos externos, una instalación defectuosa de la propia célula o diseño incorrecto del sistema de aplicación de la magnitud a medir.

Como un subconjunto de estos dispositivos transductores y los más utilizados, están las células de carga que son, básicamente, transductores de fuerza adaptados para tareas de pesaje, por lo que habitualmente su calibración final no será en newton, sino en kilogramos masa.

Adaptadores para transductores pasivos

Los transductores pasivos responden con variaciones de su impedancia frente a la variación de las magnitudes a las que son sensibles. A fin de obtener señales eléctricas útiles para el proceso de medida, será preciso complementar al elemento transductor con un circuito que permita la conversión eléctrica de esta variación de impedancia. Así por ejemplo, la aplicación de una tensión estabilizada al elemento transductor, permite obtener una corriente eléctrica la intensidad de la

cual será proporcional a la variación de dicha impedancia.

Los circuitos adaptadores básicos para transductores pasivos están constituidos por los montajes potenciométricos y los montajes en puentes.

El circuito potenciométrico consiste en un divisor de tensión alimentado por una fuente continua o alterna, al que se asocia, en paralelo a una resistencia del divisor, la impedancia correspondiente al elemento transductor. Esta solución presenta, frente a la ventaja de su sencillez, los inconvenientes de su alta sensibilidad a las magnitudes parásitas, alta dependencia a las derivas de la fuente de alimentación y la superposición de las señales en el punto central del divisor, lo que dificulta la precisión de la medida.

Si bien existen medios para contrarrestar estos efectos, este circuito adaptador no se utiliza en la práctica, siendo la asociación de resistencias en puente la más comúnmente empleada. El puente de Wheatstone, debido a su proceso de medida diferencial, permite eliminar la componente de tensión permanente y una alta reducción de las influencias parásitas generadas por el sistema de alimentación ya que, en este tipo de estructura, la condición de equilibrio sólo depende del valor de las resistencias siendo independiente de la resistencia interna de la fuente de alimentación y de la carga que representa el dispositivo medidor.

Instrumentos de medida

El último eslabón de la cadena lo constituye el instrumento de medida, que tiene por funciones básicas la alimentación del transductor, la amplificación de la señal obtenida y su posterior visualización y/o control. En los instrumentos de tipo analógico, la visualización se realiza con indicadores galvanométricos o por medio de visualizadores digitales, previa conversión A/D de la señal amplificada.

Los instrumentos de medida basados en microprocesador asocian elementos de cálculo y de memoria que permiten una corrección por software de los errores producidos en el proceso de medida, ya sean de linealidad o de influencias parásitas, con lo que se consiguen mayores niveles de precisión. Por otra parte permiten incorporar nuevas funciones entre las que cabe destacar:

- Memorización de máximos de fuerza positivos y negativos,
- Generación de señal de paro por sobrecarga.
- Ajuste de niveles de alarma de fuerzas en toda la escala de medida, con visualización y accionamiento de dispositivos externos mediante relé.
- Salida analógicas de señal.

CLASIFICACION DE LAS GALGAS EXTENSIOMETRICAS

GALGAS METALICAS

Básicamente están formadas por un conductor metálico de sección circular (hoy en deshuso), soportado por una fina lámina de material aislante. Por lo que se refiere al conductor, los materiales más empleados son el constantan, aleación de cobre (55 %) y níquel (45 %); y el nicrom, aleación de Ni (80 %) y Cr (20 %), que ofrece un mayor margen de compensación de temperatura.

Por lo que respecta al material aislante de soporte, se realiza con materiales tipo nylon,

vinilo, polietileno o teflón, la elección del más adecuado, será función del margen de temperatura de trabajo.

Existe una segunda tipología (muy utilizada en la actualidad) de bandas extensométricas metálicas basada en la tecnología de trama peculiar. Esta consiste en una película de metal de 20-30 micras de grosor, realizada con los mismos procesos de fabricación de los circuitos impresos. Sus ventajas respecto a las galgas de filamento son las siguientes:

- Optimización del diseño de la galga y reducción dimensional.
- Mayor superficie de evacuación térmica.
- Reducción del error debido a la distancia elemento sensor-galga.

En general, las galgas metálicas ofrecen una resistencia eléctrica de entre 100-5000 ohm y un factor de galga que varía entre 2 para las aleaciones descritas y 4 para la aleación de platino y tungsteno.

GALGAS SEMICONDUCTORAS

Están constituidas por una lámina de material aislante que soporta al elemento activo, que en este caso se trata de un cristal dopado de silicio, su funcionamiento se basa en el efecto piezorresistivo de los semiconductores, que genera una variación de la conductividad del material en función de las deformaciones resultantes a la aplicación de una fuerza. Básicamente, sus características son función del nivel de dopado de forma que, a mayores niveles de éste, se reduce el factor de galga y la sensibilidad térmica, al tiempo que la respuesta ofrecida es mucho más lineal.

Sus ventajas principales consisten en la facilidad de instalación, alta sensibilidad (- 50 / 60 veces mayor que las metálicas) , tamaño reducido y alta resistencia a la fatiga. Su principal inconveniente radica en su respuesta no lineal y la alta dependencia del factor de galga con la temperatura, en relación inversamente proporcional.

GALGAS BIAXIALES

Son básicamente asociaciones de dos o más bandas extensométricas fijadas sobre un mismo elemento de soporte y formando entre si ángulos de 45, 60, 90 o 120 grados. Su campo de aplicación se centra en los procesos de medida en los que interesa conocer los esfuerzos ejercidos en distintas direcciones, o bien cuando no se conoce la dirección principal del esfuerzo, aplicación en la que se precisa realizar una medición sobre tres ejes.

PARAMETROS GENERALES DE UN TRANSDUCTOR DE FUERZA

- Margen nominal de medida
- Sobrecarga admisible
- Carga de rotura
- Momento de torsión máximo
- Linealidad
- Histéresis
- Sensibilidad
- Precisión
- Margen de temperatura de trabajo
- Deriva térmica
- Características tensión de alimentación

- Características señal de salida
- Forma de trabajo (tracción, compresión, etc.)
- Principio de medida
- Tipo de unión con el proceso a medir.
- Dimensiones, peso

LIMITES DE UTILIZACION DE UN TRANSDUCTOR DE FUERZA

- **MARGEN NOMINAL DE MEDIDA.** Límite superior del margen de medida para el cual el valor de error no supera al nominal.
- **MARGEN DE SERVICIO.** Zona en la que el transductor puede realizar medidas pero con valores de error superiores al nominal
- **LIMITE DE CARGA.** Fuerza aplicada en la dirección de medida, para la que un transductor no dispone de capacidad de medida y los límites de error no son mantenidos. Esta situación es reversible, ya que se recuperan las especificaciones nominales, cuando las condiciones de trabajo regresan al margen de servicio.
- **CARGA DE ROTURA.** Fuerza aplicada en la dirección especificada de medida que produce cambios y desperfectos permanentes en el transductor. Su reutilización implica un proceso previo de calibrado.