

---

---

## **CAPÍTULO 2.**

### **PRINCIPIOS DE LA INSTRUMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS.**

La instrumentación de estructuras no es una tendencia novedosa. Desde la antigüedad, los ingenieros, arquitectos y artesanos han sido cuidadosos en observar el comportamiento las construcciones con el afán de descubrir fallas, signos de degradación o simplemente extender sus conocimientos e implementarlos en el diseño de futuros proyectos (Branko, et. al., 2007). Lo único novedoso son los métodos empleados para llevar a cabo esta actividad.

#### **2.1 El monitoreo estructural.**

El monitoreo de la salud estructural es un proceso que consiste en la captura continua o periódica; de forma permanente o habitual, de los parámetros más representativos que permiten conocer el estado de una estructura. Lo cual significa que puede realizarse a corto, mediano, largo plazo o inclusive durante la vida útil de un inmueble.

Las principales actividades que conforman el monitoreo estructural son:

- I. Selección de la estrategia del monitoreo
- II. Instalación del sistema de monitoreo.
- III. Mantenimiento del sistema de monitoreo.
- IV. Manejo de los datos.
- V. Cierre de actividades.

Cada una de estas etapas se divide a su vez en sub-actividades, las cuales complementan el monitoreo de la salud estructural (tabla 2.1). Todas estas en conjunto, son importantes, pero la más trascendente de ellas, es la creación de una buena estrategia de monitoreo, debido a que de esta se derivarán el resto de las tareas a realizarse.

Al iniciar un proyecto de monitoreo es necesario definir la meta e identificar los parámetros que se emplearán para realizar los objetivos propuestos. Esta selección debe ser cuidadosamente analizada ya que los parámetros deben mostrar el comportamiento real de la estructura. Lo cual, no es una tarea fácil ya que cada construcción posee sus propias particularidades tanto geométricas como funcionales.

Una vez identificados los parámetros a monitorear se seleccionan los distintos aparatos que ayudarán a obtener las mediciones y a registrarlas correctamente. Al conjunto de todos los elementos que permiten llevar a cabo estas actividades se denomina sistema de monitoreo. Existen a su vez distintos tipos de sistemas de monitoreo que difieren entre sí, por sus principios de funcionamiento. Sin embargo, todos ellos constan de componentes similares, como sensores, unidades para el almacenamiento y lectura de la información recopilada y programas de computadora para el manejo del sistema y control de la información.

La selección sistema de monitoreo más adecuado, depende entre otros factores de los objetivos a alcanzar, los parámetros elegidos, la precisión de las mediciones, la frecuencia de las capturas, las condiciones del lugar en donde será instalado (presencia de campos electromagnéticos, variaciones de temperatura, humedad, etc.), el procedimiento requerido para la instalación de los diferentes componentes del equipo, la posibilidad de automatizar el sistema, conectividad remota, la forma de manejar los datos, el nivel en que la estructura será supervisada (global o local), etc.

<b>Estrategia de monitoreo</b>	<b>Instalación del sistema de monitoreo</b>	<b>Mantenimiento del sistema de monitoreo</b>	<b>Manejo de los datos</b>	<b>Cierre de actividades</b>
Objetivo del monitoreo	Instalación de los sensores	Proporcionar el suministro eléctrico	Ejecución de las mediciones	Interrupción del monitoreo
Selección de los parámetros a monitorear	Instalación de accesorios	Proporcionar líneas de comunicación	Almacenamiento de los datos	Retiro del sistema de monitoreo
Selección del equipo	Instalación de las unidades de lectura	Ejecución de planes mantenimiento para diferentes dispositivos	Proporcionar acceso a los datos	Almacenamiento del equipo de monitoreo
Establecer los puntos de medición	Instalación del software	Reparación y reemplazo de elementos descompuestos	Visualización	
Determinar el calendario de monitoreo	Interacción con los usuarios		Salida de datos	
Aprovechamiento de los datos			Interpretación de los datos	
Costos			Análisis de datos	
			Uso de los datos	

Tabla 2.1: Actividades fundamentales del monitoreo estructural (Branko, et. al., 2007)

El diseño de la red de sensores depende de la geometría y el tipo de estructura observada, ya que esto determina la manera de colocar los instrumentos y los resultados que se desean alcanzar con los parámetros seleccionados, de acuerdo con los puntos de interés. Es por ello que la instalación del equipo de monitoreo es una etapa delicada y debe ser planeada a detalle considerando el estado del sitio donde se instalará, así como los tiempos en que se efectuará.

En aquellas estructuras donde se planea un monitoreo permanente, es indispensable instalar el sistema de monitoreo en la etapa constructiva, por ello, se debe prestar singular atención a la planeación del montaje del equipo. Esto debido a que pudiera consumir tiempo importante en el avance de la obra causando retardos indeseables. También puede presentarse la situación en que los sensores requieran incrustarse dentro de elementos de concreto, en este caso se dispone de un periodo de tiempo muy corto entre la colocación del sensor, el colado del concreto y el fraguado del mismo. Esta es la razón por la cual resalta la importancia de un programa y calendario de actividades, ya que hay que sincronizar las acciones del monitoreo con las de la construcción y tomar en cuenta los posibles retrasos que pudieran presentarse, debido a las labores constructivas, por lo cual es recomendable que exista un cierto grado de flexibilidad en el manejo del tiempo. Una vez hecha la instalación, el sistema debe ser protegido, sobre todo si aun se realizan trabajos constructivos. Se deben tomar todas las precauciones necesarias ante

accidentes durante y después de la construcción que garanticen la integridad del equipo permanentemente.

La adquisición de información normalmente se realiza durante la etapa constructiva y la vida útil de una estructura. En el calendario de actividades se establecerán las fechas de realización de mediciones además de la frecuencia de adquisición de datos. Esto dependerá de la rapidez con la cual varían parámetros seleccionados y de la seguridad de la estructura. Es recomendable que la frecuencia de adquisición de datos sea razonablemente establecida, debido a que una frecuencia de adquisición muy alta representa costos elevados. Esto solamente es justificable en el caso de estructuras que puedan correr el riesgo de un colapso repentino, ya que deben ser monitoreadas continuamente con la máxima frecuencia de mediciones posible. Por lo cual se puede decir que la frecuencia de mediciones depende principalmente del comportamiento esperado de la estructura.

El manejo de los datos puede ser básico o avanzado. El manejo básico consiste en la ejecución de las mediciones (lectura de los sensores) almacenamiento de los datos (local o remoto) y el acceso a los datos. Los datos pueden ser recolectados manualmente, semi-automáticamente o automáticamente, en el sitio o remotamente, periódicamente o continuamente, estáticamente y dinámicamente. Estas opciones pueden ser combinadas de distintas formas. Por ejemplo, durante las pruebas realizadas a un puente es necesario realizar mediciones semi-automáticamente, en el sitio y periódicamente (después de cada aplicación de carga). Para un monitoreo a largo plazo, el desempeño máximo se obtiene realizando el proceso automáticamente y de forma remota (en gabinete). Las posibles combinaciones del proceso de recolección de datos se presentan esquemáticamente en la siguiente figura:

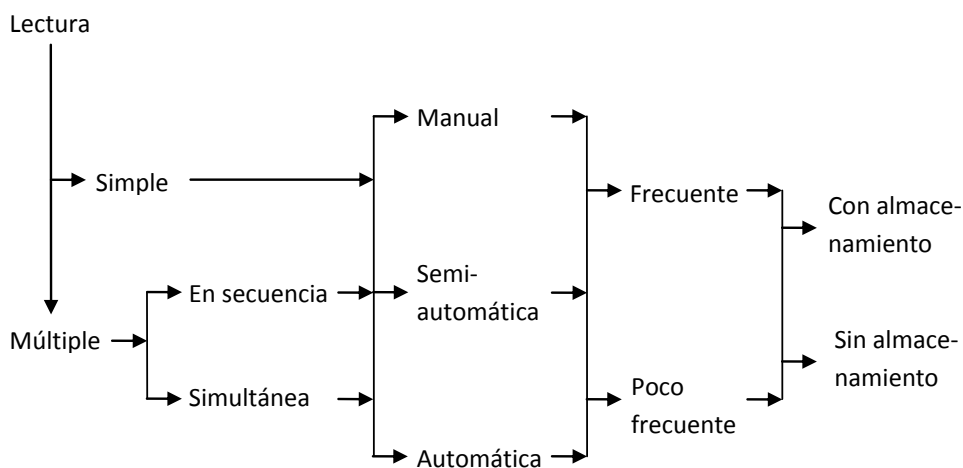


Figura 2.1: Métodos para recolectar datos (Branko, et. al., 2007)

Los datos pueden ser almacenados en forma de reportes, tablas, gráficas y diagramas con diferentes tipos de soporte como archivos electrónicos o versiones impresas en papel. El modo de almacenamiento de los datos garantiza que no se pierdan y hace posible que el acceso a cualquier dato seleccionado sea rápido. Las posibles formas de almacenamiento y acceso de los datos se presentan en la figura 2.2. Los programas de computadora que administran y almacenan la colección de datos, forman parte del sistema de monitoreo. De otra forma, el manejo de los datos puede ser difícil, demandante y costoso.

El manejo avanzado de los datos consiste en la visualización, interpretación, análisis, envío y uso de la información (generación de avisos y alarmas). Los datos conseguidos son de hecho, una gran cantidad de números (fechas y magnitudes de parámetros medidos) y han de ser transformados en información relacionada con el comportamiento de la estructura. Esta transformación depende de la estrategia de monitoreo y los algoritmos que son utilizados en la interpretación y análisis de los datos. Esto puede ser realizado manualmente, semi-automáticamente o automáticamente.

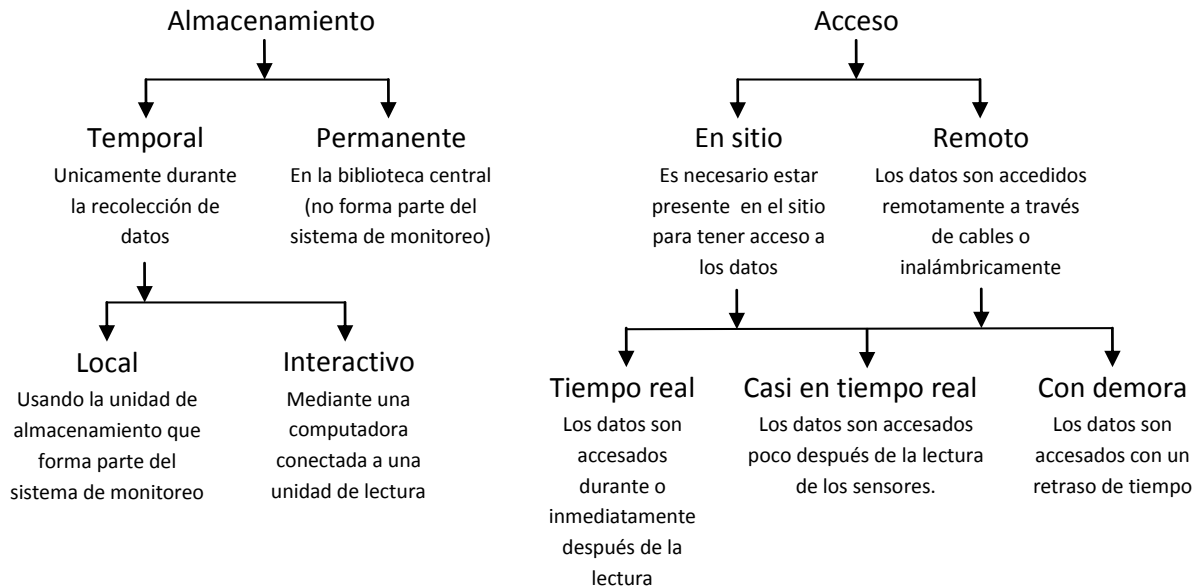


Figura 2.2: Posibles métodos de acceso a los datos (Branko, et. al., 2007)

El manejo manual de los datos consiste en la interpretación, visualización, envío y análisis de los datos. Se practica en casos donde la cantidad de los datos es limitada. El manejo semi-automático de los datos consiste en la combinación de acciones manuales y automáticas. Generalmente, el envío de datos se realiza de forma manual y el análisis, automáticamente, empleando los algoritmos y herramientas de cómputo adecuados. Se debe tener mucho cuidado a la hora de seleccionarlos, ya que deben ser compatibles con el sistema de control elegido.

El uso de estos recursos se aplica en casos en donde el análisis de la información se realiza en forma periódica. El manejo automático de la información es el más conveniente, ya que puede realizarse rápidamente e independientemente de la cantidad de los datos o la frecuencia del análisis. Y finalmente, con base en la información obtenida del análisis de los datos se pueden planificar las acciones que se deben realizar, como generar advertencias y detener el uso de un inmueble como medida de seguridad.

La gestión de la información debe ser planeada junto con la selección de la estrategia de monitoreo. Desafortunadamente, las decisiones tomadas no se pueden aplicar a todos los proyectos. No se pueden encontrar dos estructuras con las mismas características, por lo cual, la estrategia de monitoreo es diferente para cada estructura y con frecuencia es limitada por el presupuesto disponible en el proyecto. Desde el punto de vista del desempeño del equipo, lo mejor es el uso de poderosos sistemas de monitoreo, con muchos sensores instalados en cada parte de la estructura y programas de computadora que permitan operarlo en forma remota y

automática. Sin embargo, los costos de un sistema de monitoreo con estas particularidades, pueden ser elevados y excesivos. La experiencia de algunos especialistas en el monitoreo de estructuras, permite estimar que el presupuesto destinado para monitorear una estructura nueva, oscila entre un 0.5% y un 1.5% de su costo total. El aspecto económico es importante para el desarrollo de una estrategia óptima de monitoreo, ya que es necesario proporcionar buenas evaluaciones del comportamiento de la estructura con escasos recursos económicos.

## 2.2 Diferentes tipos de instrumentación en la ingeniería civil.

Existen varios tipos de monitoreo derivados de los distintos objetivos que se plantean, a partir de los cuales se puede identificar los parámetros que se desean monitorear (Branko, et. al., 2007). Por lo tanto, en la práctica es común hablar de instrumentación sísmica, geotécnica, topográfica, hidráulica, etc. Sin embargo, existe una clasificación más general, la cual abarca tres categorías, denominadas:

- Monitoreo estático.
- Monitoreo dinámico.
- Sistema de identificación y análisis modal.

También existe la posibilidad de combinar estos tipos de monitoreo. Esto obedece al tipo de estructura que se pretende analizar, la función que desempeña, los materiales que la constituyen, su importancia, entre otros aspectos. De igual manera, los parámetros que se desean monitorear dependen de otros factores como la magnitud de las cargas que se espera que soporte la estructura, las condiciones ambientales, la degradación de los elementos estructurales, etc. Algunos de los indicadores más empleados para ser monitoreados son el esfuerzo cortante promedio, la deformación, desplazamiento, agrietamiento, la curvatura de vigas, losas y cascarones, etc. Estos y otros índices del comportamiento estructural se pueden clasificar como parámetros mecánicos, físicos o químicos. La siguiente tabla, muestra algunos ejemplos de parámetros medibles.

Tipo	Parámetro
<b>Mecánico</b>	Esfuerzo, deformación, desplazamiento, agrietamiento, carga
<b>Físico</b>	Temperatura, humedad, presión de poro
<b>Químico</b>	Penetración de cloruros, sulfatos, carbonatos; oxidación, descomposición

Tabla 2.2: Parámetros comunes en la instrumentación de estructuras (Branko, et. al., 2007)

El uso por separado de sistemas de monitoreo y sensores, para cada parámetro mencionado sería costoso y complicado desde el punto de vista de la instalación y valoración de los datos. Por lo tanto es recomendable el uso de un número limitado de sistemas de monitoreo y sensores de diversos tipos en un mismo sitio.

## **2.3 Sensores y Transductores.**

Los sensores y transductores son instrumentos de medida que forman parte de un sistema de medición, el cual se constituye por otros dispositivos que en conjunto permiten producir valores que reflejan las magnitudes de los parámetros medidos. Sin embargo, existe una diferencia entre estos dos dispositivos. De acuerdo con el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM, 2007), el concepto de sensor y transductor, se presenta a continuación:

**Sensor:** Elemento de un sistema de medición que es afectado directamente por el fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud que será medida.

**Transductor:** Dispositivo empleado en mediciones, que hace corresponder una magnitud de entrada a una magnitud de salida, según una relación determinada.

El hecho de saber identificar estos términos de manera correcta en un sistema de medida es indispensable, ya que en muchas ocasiones se utilizan para nombrar diversos dispositivos de medición sin importar la diferencia. Por ejemplo, cuando nos bañamos, tocamos el agua para saber si está fría o caliente. En este caso la piel, es la parte sensorial y las terminales nerviosas son el transductor, el cual transmite las sensaciones detectadas por la piel en forma de impulsos eléctricos que viajan a través del sistema nervioso central hasta llegar al cerebro, el cual es el órgano encargado de interpretar las sensaciones.

En ocasiones, la diferencia no es tan sencilla de establecer. Por ejemplo, en un sistema para controlar la temperatura de un horno, la medición de la temperatura se realiza a través de un termopar, el cual es un transductor de temperatura que en ocasiones es mal llamado sensor de temperatura. El elemento sensible al cambio de temperatura lo conforman los metales que componen el termopar, los cuales, en este caso se encuentran integrados al transductor.

En conclusión, si se conocen las características físicas de un transductor y las restricciones que le impone el ambiente se puede minimizar la diferencia entre la percepción y la realidad, ya que el grado de confianza de una medición se incrementa cuando todos los factores de influencia son entendidos (Velasco, 2009).

### **2.3.1 Selección de sensores.**

Un sensor puede involucrar diversos principios de operación, por lo cual, es elegido dependiendo de las características del transductor y las necesidades del operador. Los transductores más comunes son del tipo capacitivo, electromagnético inductivo piezoeléctrico y resistivo (Mendoza, 1997). Es por ello que al seleccionar un dispositivo, para una aplicación en particular hay que considerar varios factores:

1. El tipo de medición que se requiere, por ejemplo, la variable que se va a medir, su valor nominal, el rango de valores, la exactitud, velocidad de medición y confiabilidad requeridas, las condiciones ambientales en que se realiza la medición.

2. El tipo de salida que se requiere del sensor, lo cual determinara las condiciones de acondicionamiento de la señal, a fin de contar con las señales de salida idóneas para la medición.
3. Con base en lo anterior se pueden identificar algunos sensores, teniendo en cuenta el rango, exactitud, linealidad, velocidad de respuesta, confiabilidad, facilidad de mantenimiento, duración, requisitos de alimentación eléctrica, disponibilidad y costo (Bolton et. al, 2006).

La mayoría de los sensores disponibles en el mercado se fabrican con el aval de estrictas normas de calidad internacional. Sin embargo, es recomendable realizar pruebas de calibración, las cuales, además de validar las características de los instrumentos que menciona el fabricante, permiten conocer el funcionamiento de los mismos antes de utilizarlos en mediciones de campo, lo que es muy ventajoso si no se está familiarizado con el uso de los aparatos, ya que esta práctica permite visualizar y corregir las posibles contingencias que se pueden presentar a la hora de realizar una prueba en campo.

### **2.3.2 Algunos sensores comunes en la instrumentación de estructuras.**

En esta sección se presentarán a algunos de los dispositivos que se utilizan comúnmente en campo, ya que es difícil hacer una recopilación de todos los aparatos que se emplean en la práctica y explicar la manera en que funcionan. Sin embargo, al comprender la manera en que operan estos artefactos, se podrán entender con mayor facilidad los fundamentos manejados por otros dispositivos tales como los inclinómetros, las celdas, de carga, los medidores de presión, de caudal, etc., los cuales operan de manera muy similar.

#### **2.3.2.1 Acelerómetros.**

Los acelerómetros son instrumentos que utilizan para conocer la magnitud de la aceleración a la que se son sometidos los cuerpos. Se suelen emplear para medir inclinación, distancia y velocidad; vibración en vehículos, maquinas, edificios, así como la actividad sísmica. Los transductores de aceleración son capaces de detectar incluso los movimientos más leves, desde la inclinación de un edificio hasta la más mínima vibración causada por un instrumento musical.

Por otro lado, siempre es recomendable que los aparatos sean adheridos a la superficie del objeto en estudio, ya que esto evita que sean desplazados del punto de medición, además que permite realizar lecturas más exactas. Con este propósito se pueden utilizar resinas especiales, pegamentos a base de silicón o dispositivos tales como tornillos, bases de acrílico, etc.

Los acelerómetros pueden ser clasificados dependiendo de la dirección en la cual se desea conocer la aceleración, por lo tanto se pueden catalogar como acelerómetros uniaxiales biaxiales y triaxiales. Otra forma de clasificarlos se da a través de las características que definen su funcionamiento en el instante en que miden la aceleración.

La forma en que trabajan los transductores de aceleración se puede ejemplificar fácilmente considerando un sistema masa-resorte, en el cual, un bloque conocido como masa sísmica o masa de prueba, es conectado a una base a través de un resorte, tal como lo muestra la siguiente figura:

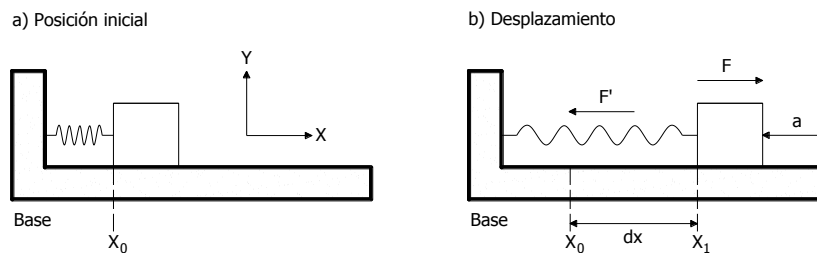


Figura 2.2: Configuración típica de un sistema masa-resorte (National Instruments).

En la figura 2.2a), se puede observar que tanto el bloque como el resorte se encuentran en reposo y posteriormente el bloque cambia de posición, como lo muestra la figura 2.2b). Al aplicar una fuerza  $F$  al bloque, éste se desplaza hacia la derecha y el resorte se extiende. Esta situación produce que el resorte aplique una fuerza de reacción  $F'$ . Al retirarse la fuerza  $F$ , el bloque se libera y se mueve al lado contrario. En ese instante,  $F'$  es proporcional a la masa del bloque y a la aceleración que este desarrolla durante su desplazamiento de acuerdo con la segunda ley de Newton, por lo cual:

$$F' = ma \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

$m$ : masa en kg

$a$ : aceleración en  $m/s^2$

Por otro lado, si se considera que la fuerza que el resorte ejerce sobre el bloque es proporcional a la rigidez y elongación del mismo. La relación que existe entre estas variables se puede establecer con base en la ley de Hooke, entonces:

$$F' = kdx \quad \text{Ec. 2.2}$$

$$dx = x_1 - x_0 \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

$K$ : Constante del resorte en N/m

$dx$ : Extensión del resorte en m

Igualando la fuerza calculada con las ecuaciones 2.1, 2.2 e incluyendo la ecuación 2.3, se obtiene lo siguiente:

$$ma = k(x_1 - x_0) \quad \text{Ec. 2.4}$$

Despejando la aceleración:

$$a = \frac{k}{m}(x_1 - x_0) \quad \text{Ec. 2.5}$$



Este principio es aprovechado en diseño de una gran variedad de acelerómetros, ya que el transductor sólo se limita a efectuar la medición de un desplazamiento lineal. Los componentes de un acelerómetro son básicamente los mismos que se observaron en la figura 2.2, la única variante es el método empleado para medir el desplazamiento, en el cual se utilizan transductores que operan a base de elementos resistivos, campos electromagnéticos o cristales que producen piezoelectricidad. Por ejemplo, los acelerómetros piezoeléctricos se basan en una propiedad que sólo se encuentra en algunos cristales como el cuarzo. En este caso, dicho cristal se encuentra en contacto con una masa sísmica. Cuando ésta se encuentra en movimiento como producto de la aceleración, ejerce una fuerza de compresión o de tensión, sobre el cristal. Esto ocasiona un reacomodo de electrones y por lo tanto un desequilibrio en las cargas de los átomos del cristal. De esta manera, se produce una diferencia de potencial o voltaje, la cual es proporcional al desplazamiento de la masa. La unidad de voltaje es el Voltio y al medir su magnitud, se puede conocer la cantidad de desplazamiento y por lo tanto, la aceleración registrada en ese instante. Los elementos que componen este tipo de acelerómetro se pueden observar en la siguiente figura:

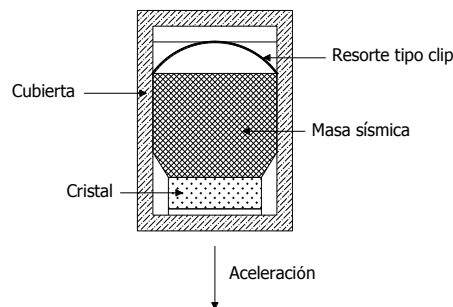


Figura 2.4: Acelerómetro piezoeléctrico (National Instruments).

La unidad de aceleración estándar es la aceleración de la gravedad "g" o bien  $9.81\text{m/s}^2$ , por lo cual, es común expresar el rango de medición de un acelerómetro en estas unidades. La mayoría de los acelerómetros que se encuentran comercialmente miden desde 2g en adelante y suelen usarse en pruebas de impacto, en aviones, automóviles, etc. Sin embargo, para aplicaciones relacionadas con el monitoreo de estructuras se acostumbra realizar pruebas de vibración ambiental para conocer sus propiedades dinámicas. Para tal propósito, las magnitudes de aceleración no son tan grandes, por lo tanto se pueden utilizar acelerómetros de 1g hasta 0.5g.

Por otro lado, es necesario contar con amplificadores de señal o con un sistema de captura diseñado para operar estos aparatos, ya que los voltajes de salida son relativamente pequeños, del orden de unos cuantos milivolts. De esta manera, se pueden apreciar estas variaciones y alcanzar el rango de medición deseado. Otra característica importante de estos dispositivos, es su frecuencia natural de vibración, la cual suele exceder los 5kHz. En general, se recomienda que los acelerómetros no sean utilizados para medir vibraciones con frecuencias cercanas a su frecuencia natural de vibración, ya que esto puede producir problemas de no linealidad en su respuesta. También hay que tomar en cuenta el rango medición, ya que por la resolución de los instrumentos y el ruido eléctrico que hay en las lecturas, no conviene utilizarlos en intervalos muy amplios. En el caso de edificios y puentes, las frecuencias que resultan de interés, tales como las que se encuentran asociadas a las primeras formas modales de vibración, generalmente no rebasan los 30 Hz, dada la rigidez de los mismos. Por lo cual, las mediciones pueden limitarse a este valor, mediante un filtrado pasa bajas.

### 2.3.2.2 Deformímetros.

Los deformímetros son instrumentos utilizados para medir la deformación producida por la aplicación de esfuerzos así como para determinar las propiedades mecánicas de los materiales empleados en elementos tales como piezas mecánicas de maquinaria o en vigas y columnas que forman parte de edificios y puentes. Entre los más comunes se encuentra el deformímetro de lámina, el cual se consta de una placa de metal delgado con un grabado en patrón de retícula, similar al que se utiliza en la elaboración de circuitos eléctricos, acoplada sobre una base delgada de resina como aislante eléctrico, tal como se muestra en la siguiente figura:

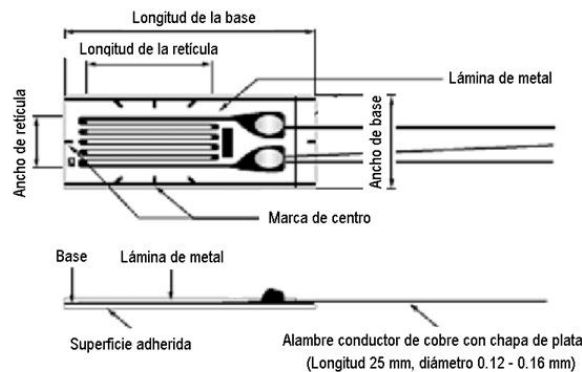


Figura 2.5: Elementos básicos de un deformímetro

El deformímetro es adherido al objeto que se va a medir con un adhesivo especial, de tal modo que si se presenta una deformación en el punto en estudio, esta se transmita a través de la base de resina hacia la placa metálica que conforma el elemento sensible. Para lograr una medición exacta, el deformímetro debe estar unido al objeto de interés, lo mejor posible, por lo se requiere que la superficie de aplicación este limpia, lisa y libre de humedad para que el pegamento surta el efecto deseado.

El principio de funcionamiento de un deformímetro se basa en el hecho de que algunos metales como el cobre, son buenos conductores de la corriente eléctrica, lo cual, se debe a que sus átomos ceden y aceptan electrones sin oponerse demasiado. Al grado de oposición que presenta un material al paso de la corriente eléctrica se le denomina resistencia eléctrica y se mide en Ohms. Los valores nominales de resistencia de estos dispositivos, comercialmente oscilan entre los 30 hasta los 3000 Ohms, siendo 120, 350 y 1000 Ohms los valores más comunes. Cuando la placa metálica que conforma el elemento sensor es deformada, como consecuencia de la aplicación de una fuerza de tensión o compresión, se incrementa o disminuye su resistencia. Suponiendo que la resistencia original del material en cuestión es  $R$  y la variación de la resistencia es  $\Delta R$ , la relación que existe entre deformación y resistencia es:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_g \varepsilon \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

- $K_g$ : Factor de calibración.
- $\varepsilon$ : Deformación unitaria.

El factor de calibración  $K_s$  es un coeficiente que determina la sensibilidad de un deformímetro. Generalmente, el elemento resistente del deformímetro se elabora con aleaciones de cobre y níquel o níquel y cromo, ya que las propiedades de estos metales proporcionan un valor del factor de calibración de 2 aproximadamente. Sin embargo, este valor depende de los materiales utilizados por el fabricante, por lo cual, éste proporciona la magnitud de esta constante.

Otra situación que se presenta cuando ocurre la deformación es que la variación de la resistencia inicial es extremadamente pequeña. Para poder medir este cambio, se utiliza el puente de Wheatstone (figura 2.6), el cual consiste en un circuito mixto compuesto por cuatro elementos resistores, o bien, un circuito con elementos conectados en serie y en paralelo. Por ejemplo, los pares de resistencias formados por  $R_1$  y  $R_3$ ,  $R_4$  y  $R_2$ , representan dos conjuntos de elementos conectados en serie, ya que cada componente se coloca uno a continuación del otro, en el sentido del flujo de la corriente de eléctrica (desde el polo negativo hacia al polo positivo de la fuente de alimentación). Como ésta alimenta a ambos pares de resistores simultáneamente, lo que se obtiene es una conexión de derivación o bien un circuito conectado en paralelo. De esta manera, se constituye un circuito mixto.

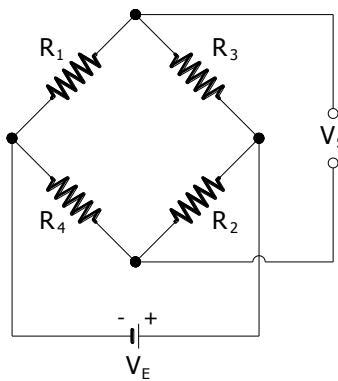


Figura 2.6: Puente de Wheatstone.

Las resistencias que conforman el puente de Wheatstone, transforman el incremento de resistencia en un cambio de voltaje de acuerdo con la ley de Ohm. Suponiendo que las resistencias tienen como valores  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$  y que la diferencia de potencial en la entrada del puente es  $V_E$ , entonces, el voltaje de salida  $V_S$  se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$V_S = \frac{R_3 R_4 - R_1 R_2}{(R_4 + R_2)(R_1 + R_3)} V_E \quad \text{Ec. 2.7}$$

Si se considera que la resistencia  $R_4$  es un sensor de deformación y cambia hasta un valor  $R_4 + \Delta R$  debido al incremento de deformación. Entonces, la salida de voltaje es:

$$V_S = \frac{R_3(R_4 + \Delta R) - R_1 R_2}{(R_4 + \Delta R + R_2)(R_1 + R_3)} V_E \quad \text{Ec. 2.8}$$

Ahora, si  $R_1=R_2=R_3=R_4$ , la ecuación 2.8 se reescribe de la siguiente manera:

$$V_S = \frac{R^2 + R\Delta R - R^2}{(2R + \Delta R)2R} V_E \quad \text{Ec. 2.9}$$

En consecuencia el valor de R puede ser considerado extremadamente mayor que  $\Delta R$ , por lo tanto:

$$V_S = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R}{R} \right) V_E \quad \text{Ec. 2.10}$$

Sustituyendo la ecuación 2.6 en la ecuación 2.10 y despejando la deformación unitaria se obtiene lo siguiente:

$$\varepsilon = \frac{4V_S}{K_g V_E} \quad \text{Ec. 2.11}$$

De este modo se obtiene la deformación unitaria en términos de una salida de voltaje, la cual es proporcional a la variación de la resistencia. Esta microscópica salida de voltaje es amplificada y convertida en una señal digital mediante un convertidor analógico-digital.

Por otro lado, en un puente de Wheatstone, es común catalogar dos tipos de deformímetros, denominados deformímetros activos y pasivos. Los primeros, miden los esfuerzos que se desean conocer en el punto y dirección deseados. Los segundos, miden las deformaciones que no se desean medir tales como las ocasionadas por los cambios de temperatura. Para este efecto, se conectan en serie, un deformímetro activo y otro pasivo al puente de Wheatstone. El deformímetro pasivo, se adhiere a una muestra del mismo material, mientras ésta se encuentre la misma temperatura que el elemento en cuestión y no esté sometida a ningún otro esfuerzo, o en su defecto se instala cerca del punto de medición, pero, en una posición perpendicular a la dirección de la deformación, lo cual, prácticamente surte el mismo efecto.

Complementando lo anterior, también, se pueden mencionar tres formas distintas de acoplar los deformímetros al puente de Wheatstone. Por lo tanto, un deformímetro activo conectado a uno de los cuatro extremos o brazos del puente, representa un circuito de cuarto de puente; dos brazos con deformímetros activos constituyen un circuito de medio puente. Y una configuración que abarque los cuatro brazos con deformímetros activos conforma un circuito de puente completo. La figura 2.7 muestra algunos casos de aplicación.

En el caso a) se emplea una configuración de cuarto de puente en un voladizo, donde se tiene un deformímetro activo (1) y otro pasivo (3) para compensar la temperatura. El caso b) representa otra manera de compensar la temperatura en el mismo voladizo, para lo cual se coloca un deformímetro en dirección longitudinal (1) y el otro orientado transversalmente (3). En el caso c) se tiene una celda de carga, en la cual se colocan tres deformímetros activos en dirección longitudinal para compensar la temperatura (3) y otros tres en dirección transversal para considerar en la medición, las excentricidades en la aplicación de la fuerza (1). En el caso d) se emplean cuatro deformímetros, dos activos en la dirección longitudinal (1 y 2) y dos pasivos en la dirección transversal (3 y 4). En el caso e) se emplea una configuración de medio puente, donde hay dos deformímetros activos (1 y 2) y dos pasivos para compensación (3 y 4). En el caso f) se emplea una configuración de puente completo mediante cuatro deformímetros activos para detectar esfuerzos de torsión con sentidos opuestos, dos a dos. Estos arreglos con deformímetros se pueden utilizar también para medir presiones, cargas y aceleraciones mediante el uso de aditamentos especiales. También es importante cuidar que la fuerza aplicada, no deforme el material que compone el deformímetro más allá del 50% de su límite elástico, ya que esto permite garantizar el funcionamiento lineal del dispositivo.

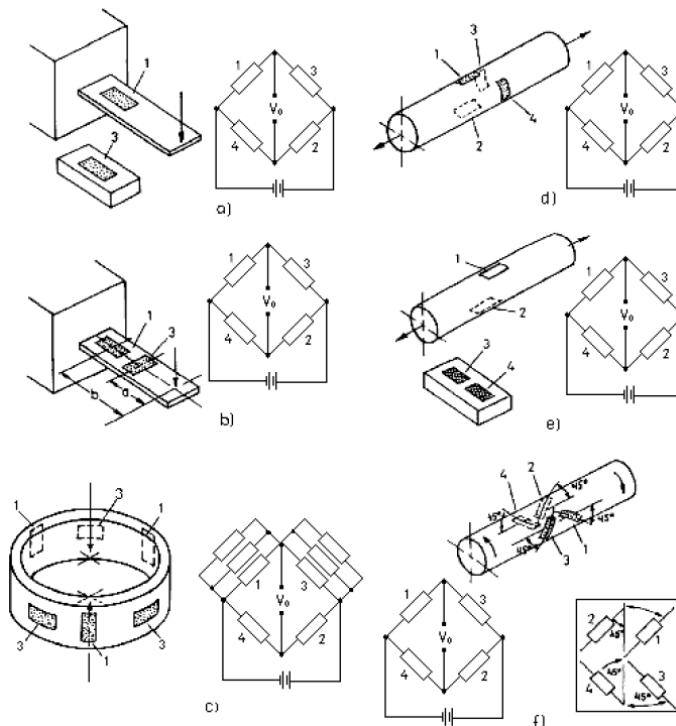


Figura 2.7: Diversas aplicaciones de los deformímetros para medir magnitudes mecánicas.

### 2.3.2.3 Transductores de desplazamiento.

El desplazamiento, se puede medir de diversas formas inclusive con deformímetros. De la gran gamma de dispositivos que se pueden utilizar, se encuentra el transformador diferencial variable lineal (LVDT) el cual es un dispositivo universal y se puede utilizar incluso como acelerómetro. La figura 2.8 muestra un LVDT convencional. Los desplazamientos que puede detectar son superiores a los que se pueden medir con deformímetros. Así los LVDT son adecuados para aplicaciones donde los desplazamientos son demasiado grandes como para ser medidos con deformímetros (Wolf et al., 2001). Sin embargo, cuando se emplean para medir pequeños desplazamientos la situación se complica, debido a que requieren de un punto de referencia para efectuar la medición y aditamentos de sujeción especiales, de acuerdo a su tamaño y forma. En cambio los deformímetros no tienen tantos inconvenientes, ya que sólo necesitan adherirse a la superficie del objeto en estudio, lo cual, facilita su instalación.

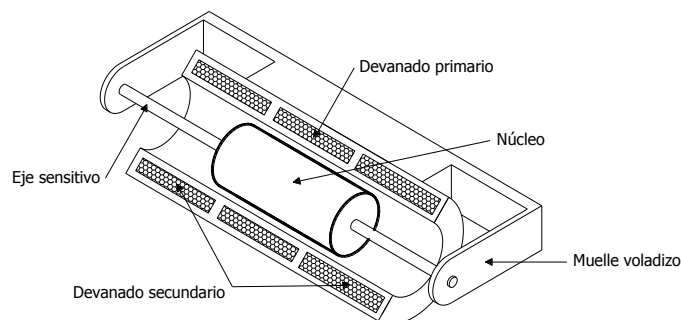


Figura 2.8: Transformador LVDT (National Instruments)

El LVDT mide el desplazamiento mediante el movimiento del núcleo ferromagnético contenido en su interior, el cual interactúa con el campo magnético que produce el devanado primario al ser alimentado con un voltaje. De esta forma se establece una diferencia de potencial en el núcleo por inducción electromagnética, lo cual le proporciona un campo magnético propio (figura 2.9).

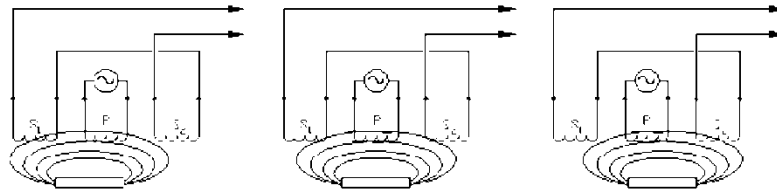


Figura 2.9: Interacción del núcleo con los devanados primario y secundario

Cuando el núcleo se encuentra en medio, el voltaje inducido en el devanado secundario es igual a cero. Sin embargo si este se mueve hacia la derecha o hacia la izquierda del devanado primario, se obtiene un voltaje de salida, el cual aumenta o disminuye dependiendo del sentido de la corriente de alimentación. El voltaje de salida es linealmente proporcional a la magnitud del desplazamiento. Entonces el desplazamiento medido se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{V_S}{sV_E} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde:

- d: Desplazamiento
- $V_E$ : Voltaje de entrada
- $V_S$ : Voltaje de salida
- s: Sensibilidad

La sensibilidad de un LVDT es un dato que proporciona el fabricante, por lo cual este parámetro depende del proveedor. En cambio, su resolución es independiente del modelo y marca utilizados, ya que sólo depende de la capacidad del sistema de captura utilizado, por lo cual, puede considerarse infinita.

### 2.3.2.4 Transductores de temperatura.

Una de las variables que se miden comúnmente en los procesos industriales, es la temperatura. Para tal efecto se utilizan transductores que operan bajo diversos principios de funcionamiento por lo cual se pueden encontrar detectores de temperatura resistivos, termopares y circuitos integrados específicos. Por ejemplo, el termistor es un dispositivo que mide la temperatura mediante un cambio de resistencia (figura 2.9). La resistencia de los materiales de los cuales se construyen decrece al aumentar la temperatura en un rango de -100 hasta +300 °C. La disminución de la resistencia involucra a las propiedades de los enlaces químicos de los semiconductores que constituyen al termistor. En estos materiales, los electrones de valencia se encuentran asegurados en enlaces covalentes a sus átomos respectivos. Cuando aumenta la temperatura, las vibraciones térmicas rompen los enlaces y liberan electrones. Como los electrones no están ligados a átomos específicos en la red, se suman a la corriente eléctrica que pasa a través de un semiconductor y el material parece tener menos resistencia.

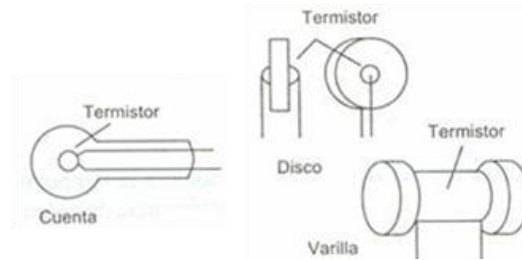


Figura 2.9: Diferentes tipos de termistores.

Este principio de funcionamiento es muy ventajoso ya que si el termistor se conecta a un puente de Wheatstone, el sistema de medición puede llegar a detectar cambios de temperatura tan pequeños como  $\pm 0.005$  °C. Sin embargo la variación de la resistencia no es lineal, por lo cual dicha respuesta puede ajustarse aproximadamente con la ecuación de Steinhart-Hart:

$$T = \frac{1}{A + B \ln R + C (\ln R)^3} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde:

- A, B y C: Constantes de ajuste de curva
- R: Resistencia del termistor en Ohms
- T: temperatura medida en K

Las constantes A, B y C se calculan seleccionando tres puntos que son datos proporcionados por el fabricante, por lo cual se obtienen tres ecuaciones que pueden resolverse simultáneamente. El resultado es una ecuación de ajuste que tiene una aproximación de  $\pm 0.02$  °C con la curvatura real (Wolf et al., 2001).

### 2.3.2.5 Anemómetros.

El viento es un fenómeno meteorológico que se caracteriza por el movimiento del aire como consecuencia del desplazamiento de las masas de gas que conforman la atmosfera; desde las zonas de alta presión hacia las zonas de baja presión. La presencia de las ráfagas de viento produce sollicitaciones en las estructuras tales como desplazamientos en edificios altos y en puentes, lo que en ocasiones puede dificultar el proceso constructivo o en casos extremos, poner en peligro la estabilidad de los mismos. Por otro lado, también, se pueden aprovechar para generar electricidad mediante el uso de generadores especiales o aerogeneradores. Para ello es indispensable medir la velocidad del viento y determinar la dirección en la cual se presenta con mayor intensidad.

La velocidad del aire, se mide con el anemómetro y su dirección con la veleta. Existen una gran variedad de modelos en el mercado y los hay, tanto fijos como portátiles. La figura 2.10 muestra la imagen de un anemómetro de molinete o tipo Robinson. Este, es uno de los más utilizados en mediciones de campo, por su simplicidad constructiva y su constitución robusta, ya que esto le permite soportar corrientes de aire muy fuertes.



Figura 2.10: Anemómetro tipo Robinson.

Su principio de funcionamiento es muy básico. La forma de las cazoletas que conforman el molinete, está diseñada de tal modo, que su resistencia aerodinámica sea diferente tanto en la parte cóncava y como en la convexa. Cuando el aire incide en la superficie cóncava de alguna de las cazoletas, la oposición al paso del mismo es tal, que se transmite gran parte de la fuerza del viento al eje rotatorio del molinete. El momento mecánico producido entre las cazoletas y el eje rotatorio hace que el molinete gire con una determinada velocidad angular, la cual es proporcional a la velocidad del viento. Por lo tanto, esta última, se puede conocer mediante la siguiente expresión:

$$v = r\omega \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde:

v: Velocidad del viento en m/s

r: Radio medido desde centro de las cazoletas al eje rotatorio en m

$\omega$ : Velocidad angular en rad/s

La velocidad angular puede obtenerse de diversas formas, ya sea mediante dinamos tacométricas, sensores de efecto Hall y sensores ópticos. En el caso de los anemómetros tipo Robinson, es común utilizar una dinamo tacométrica o generador eléctrico de corriente continua y medir el voltaje suministrado por la acción del viento. La siguiente figura muestra esquemáticamente, el principio de operación de un generador eléctrico de corriente continua:

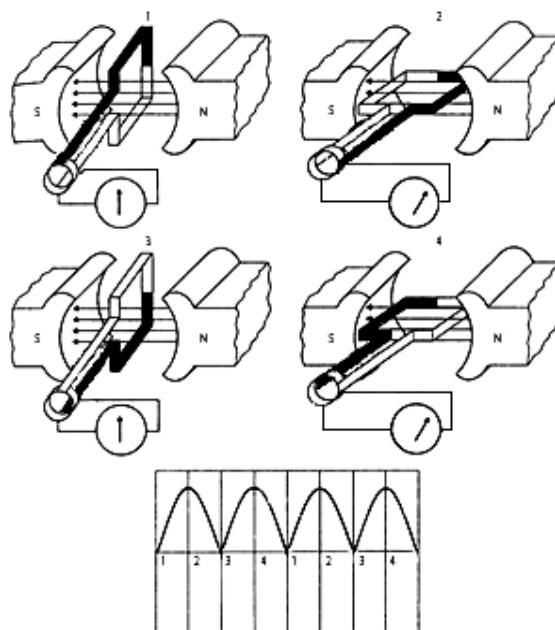


Figura 2.11: Principio de funcionamiento de un generador eléctrico de corriente continua.



El voltaje a medir, se obtiene cuando un elemento del generador denominado armadura gira en el interior de un campo magnético producido por imanes permanentes. En un instante, la armadura forma un ángulo de  $90^\circ$  o  $270^\circ$  con las líneas del campo magnético, por lo tanto, la diferencia de potencial es nula (posición 1 y 3). En contraste el valor máximo se alcanza cuando ésta, forma un ángulo de  $180^\circ$  o  $360^\circ$  (posición 2 y 4). Mientras que en ángulos intermedios se generan voltajes de menor magnitud. Al medir secuencialmente estas variaciones se puede observar una gráfica como la que se muestra al final de la figura 2.11. En la cual, se puede apreciar que el voltaje obtenido, es positivo. Si la armadura girara en el sentido contrario las manecillas del reloj, se obtendría un voltaje negativo. Esta es una característica propia de las dinamos tacométricas, ya que en otras aplicaciones, además de ayudar a determinar la velocidad, permiten conocer el sentido de giro. Sin embargo, esto último no es necesario, ya que las cazoletas están diseñadas de tal modo, que su rotación se da en un sólo sentido.

De lo anterior, se puede concluir que el voltaje generado, depende de la velocidad angular que alcanza la armadura al girar, del ángulo que forma en relación a las líneas de acción del campo magnético y de la intensidad del mismo. La siguiente ecuación muestra la relación que existe entre las variables mencionadas:

$$V_g = cB\omega \quad Ec \ 2.15$$

Donde:

- $V_g$ : Voltaje generado
- c: Constante de proporcionalidad en  $V \cdot s/T$
- B: Intensidad del campo magnético en Teslas
- $\omega$ : Velocidad angular en rad/s

La constante de proporcionalidad  $c$ , depende de algunos detalles constructivos del generador tales como el diámetro y la longitud de la armadura. Por lo tanto, este dato suele ser proporcionado por el fabricante, al igual que la intensidad del campo magnético. Al tomar en cuenta lo antepuesto y considerando que el radio de giro de las cazoletas no cambia. Se despeja la velocidad angular de la ecuación 2.15 y se sustituye en la ecuación 2.14. Por lo tanto, la velocidad del viento puede obtenerse a través de la siguiente expresión:

$$v = kV_g \quad Ec \ 2.16$$

Donde  $k$  concentra los valores de las constantes representados en las ecuaciones 2.14 y 2.15. El valor de dicha constante se almacena en el sistema de captura del anemómetro y por lo tanto, al multiplicarla por el voltaje medido y haciendo las conversiones pertinentes, se puede conocer la velocidad del viento, ya sea en m/s, en km/hr o en nudos (si se realizan mediciones en el mar).

Por otro lado, para conocer la dirección del viento, la veleta cuenta con mecanismo a base de un potenciómetro. En este caso, la veleta se alinea en la dirección norte y el potenciómetro se alimenta con un voltaje fijo. De este modo, la tensión máxima registrada corresponde a la dirección norte, y a medida que la veleta gira, el valor de voltaje decrece hasta un valor mínimo, el cual se fija para una posición cercana a los  $360^\circ$ . La mayoría de los sistemas de captura comerciales, permiten obtener rumbos en un rango de  $0$  a  $360^\circ$  y con una resolución de  $1^\circ$ , ya que en realidad no se requiere gran exactitud, dadas las variaciones de las corrientes de aire.

### 2.3.2.6 Cuerdas vibrantes.

La ventaja de los sensores de cuerda vibrante sobre los tipos más convencionales es que estos miden principalmente una frecuencia en lugar de un voltaje. Las frecuencias se pueden transmitir a través cables largos (más de 2000 m) sin la degradación apreciable de la señal causada por variaciones en la resistencia del cable que puede presentarse por penetración del agua, de fluctuaciones de temperatura, de resistencia de contacto o de salida a tierra. Lo cual satisface idealmente las mediciones a largo plazo en ambientes adversos (Geokon, 2005). La siguiente figura muestra los elementos básicos que integran una cuerda vibrante.

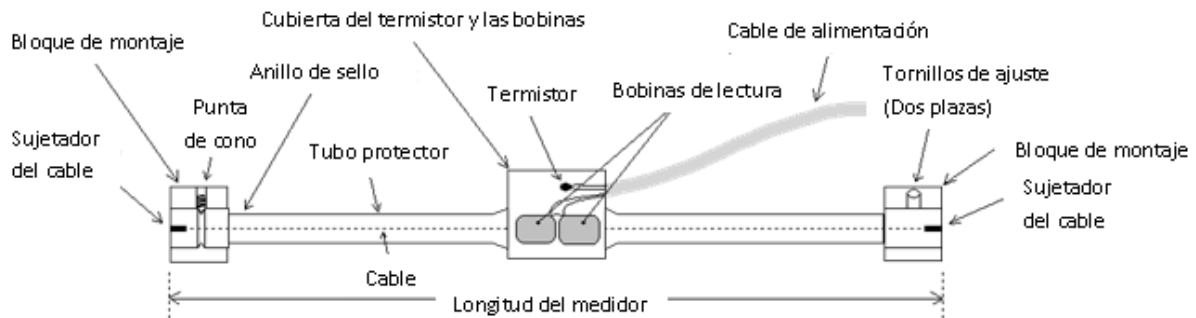


Figura 2.12: Cuerda vibrante, marca Geokon, modelo 4000.

Una de las dos bobinas localizadas al centro del medidor es alimentada con un voltaje variable, lo cual produce un campo electromagnético que se intensifica y atenúa; atrayendo y liberando el cable de acero, haciendo que este vibre. Mientras tanto, la bobina restante, sirve como medio para medir la frecuencia de una señal de voltaje alterna. Esta es generada, debido a la interacción de dicha bobina con el campo magnético que adquiere el cable por inducción electromagnética. La magnitud de la señal es independiente del voltaje de alimentación, ya que está asociada la amplitud de las vibraciones del cable. Por lo tanto, la frecuencia sólo depende de la densidad lineal y la fuerza de tensión ejercida en el cable.

Cuando un cable vibrante llega a deformarse, se modifican sus dimensiones alterando la magnitud de la tensión y en consecuencia, también la frecuencia natural de vibración. Esta relación fundamental se utiliza en una variedad de configuraciones de dispositivos para la medir tensión, carga, fuerza, presión o inclinación. La relación entre la frecuencia y la deformación es descrita a continuación:

La frecuencia natural de vibración un cable se relaciona a la tensión, longitud y la masa del mismo por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{2L_w} \sqrt{\frac{F}{m}} \quad \text{Ec. 2.17}$$

Donde:

- $L_w$ : Longitud del cable en pulgadas
- $F$ : Tensión en el cable medida en libras
- $m$ : Masa del cable por unidad de longitud

La masa del cable se puede expresar de la siguiente manera:

$$m = \frac{W}{L_w g} \quad Ec. 2.18$$

Donde:

- W: Peso  $L_w$  por pulgada de cable
- g: Aceleración de la gravedad
- m: Masa del cable por unidad de longitud

Mientras, el peso se obtiene como:

$$W = \rho a L_w \quad Ec. 2.19$$

Donde:

- $\rho$ : Densidad del cable
- a: Area de la sección transversal del cable

Combinando las ecuaciones 2.17, 2.18 y 2.19 se tiene lo siguiente:

$$f = \frac{1}{2L_w} \sqrt{\frac{Fg}{\rho a}} \quad Ec. 2.20$$

La tensión puede expresarse en términos de la deformación del cable, por lo cual:

$$F = \varepsilon_w E a \quad Ec. 2.21$$

Donde:

- $\varepsilon_w$ : Deformación unitaria
- E: Módulo de elasticidad del cable

Con base en lo anterior, la frecuencia se puede calcular sustituyendo la ecuación 2.21 en la ecuación 2.20 de la siguiente manera:

$$f = \frac{1}{2L_w} \sqrt{\frac{\varepsilon_w E g}{\rho}} \quad Ec. 2.22$$

Al despejar la deformación unitaria de la ecuación 2.22

$$\varepsilon_w = \frac{4\rho(fL_w)^2}{Eg} \quad Ec. 2.23$$

Por otro lado, Hay que tomar en cuenta que tanto el cable de acero como el tubo protector son del mismo material, por lo cual, ambos elementos son sometidos a la misma deformación, entonces:

$$\varepsilon_w L_w = \varepsilon L_g \quad Ec. 2.24$$

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación unitaria del tubo protector.

$L_g$ : Longitud del tubo protector.

Despejando la deformación unitaria del tubo protector de la cuerda vibrante y sustituyendo la ecuación 2.23, se obtiene lo siguiente:

$$\varepsilon = \frac{4\rho f^2 L_w^3}{2Eg L_g} \quad Ec. 2.25$$

Para el modelo 4000 de Geokon, los valores de las constantes proporcionados por el fabricante son los siguientes:

$$\begin{aligned} L_g &= 5.875 \text{ in} & g &= 386 \text{ lb/in}^2 \\ L_w &= 6.25 \text{ in} & \rho &= 0.283 \text{ lb/in}^3 \\ E &= 3 \times 10^7 \text{ psi} \end{aligned}$$

Finalmente, al sustituir valores, se tiene:

$$\varepsilon = (4.0623 \times 10^{-3}) f^2 \quad Ec. 2.26$$

De acuerdo con la ecuación 2.26, se puede determinar la deformación unitaria en el punto seleccionado, solo basta con conocer la frecuencia de vibración de la cuerda, la cual, es proporcionada por el sistema de captura empleado.