



ANÁLISIS TÉCNICO Y COMERCIAL DE LAS SOLUCIONES DE MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL

Tutor: Manuel Aenlle López
Cotutor: Abel Álvarez Álvarez

CARLOS BLANCO FERNANDEZ

Uo226103@uniovi.es

Resumen

Todas las estructuras están sometidas a cargas y agentes ambientales que, con el paso del tiempo, pueden provocar el deterioro de la misma. La monitorización del comportamiento estructural permite detectar anomalías a tiempo, por lo que se pueden adoptar medidas de mantenimiento y reparación de una manera más eficaz, así como poner a la estructura fuera de servicio, si fuera necesario.

En los sistemas de monitorización se pueden medir varios parámetros (aceleración, desplazamiento, deformaciones, temperaturas, acústica, etc.). En este trabajo fin de master se realizará inicialmente un estudio del estado del arte sobre sistemas de monitorización de estructuras.

El conocimiento de las deformaciones es fundamental en todos los análisis de fatiga. Este trabajo fin de máster se centra en la monitorización de deformaciones por lo que se realizará un estudio técnico, económico y comercial de los métodos de monitorización basados en deformaciones complementado con el análisis modal.

Palabras clave

Monitorización estructural, análisis modal, acelerómetro, galga, fibra óptica

Abstract

All structures are subject to loads and environmental agents that, over time, can cause deterioration. The monitoring of the structural behavior allows detecting anomalies in time, so that maintenance and repair measures can be adopted in a more efficient way, as well as taking the structure out of service, if necessary.

In the monitoring systems several parameters can be measured (acceleration, displacement, deformations, temperatures, acoustics, etc.). In this master's thesis, a study of the state of the art on structural monitoring systems will be carried out initially.

Knowledge of deformations is essential in all fatigue analyzes. This master's thesis is focused on the monitoring of deformations, so a technical, economic and commercial study of the monitoring methods based on deformations will be carried out, complemented by modal analysis.

Keywords

Structural health monitoring, modal análisis, accelerometer, strain gage, optic fiber

Índice

1.	Antecedentes.....	8
2.	Introducción.....	10
2.1	Descripción del SHM.....	12
2.2	Implementación de sistemas SHM	13
2.2.1	Justificación económica	13
2.2.2	Condiciones operacionales y ambientales.....	14
2.2.3	Definición de daño	14
2.2.4	Niveles en la identificación del daño	14
2.3	Variables a medir	14
2.4	Sensores y Actuadores	15
2.4.1	Tipos de sensores	15
2.5	Ubicación y redes.....	17
3.	Métodos basados en vibraciones	18
3.1	Análisis modal: definición	20
3.2	Conceptos teóricos	20
3.2.1	Frecuencias naturales y modos de vibración, descripción matemática 21	
3.3	Interpretación física.	23
3.4	Dominios del análisis modal.....	24
3.4.1	Métodos de análisis modal en el dominio de la frecuencia.....	25
3.5	Tipos de análisis modal.....	27
3.5.1	Análisis modal experimental.....	27
3.5.2	Análisis modal operacional	28
3.6	Métodos basados en el análisis modal	29
3.6.1	Cambios en las frecuencias propias.	30
3.6.2	Cambios en las formas modales.....	31
3.6.3	Modal Assurance Criterion (MAC)	31
3.6.4	Co-ordinate Modal Assurance Criterion (COMAC).....	32
3.6.5	Método de la energía de deformación	33
3.6.6	Cambios en la matriz de flexibilidad	34
3.7	Aplicaciones.....	34
3.7.1	Aplicaciones en Ingeniería civil.....	35

3.7.2	Vehículos	37
3.8	Instrumentación	39
3.8.1	Sensores	39
3.8.2	Excitadores	40
3.8.3	Toma y procesado de datos	42
3.9	Análisis comercial.....	43
3.9.1	Sensores	43
3.10	Conclusiones del apartado.....	45
4.	Métodos basados en deformaciones: Galgas extensométricas	48
4.1	Descripción general	49
4.2	Funcionamiento	49
4.2.1	Clasificación.....	51
4.3	Aplicaciones.....	53
4.4	Consideraciones de uso.....	56
4.5	Control del ruido en las mediciones con galgas.....	56
4.5.1	Reducción del ruido electrostático	58
4.5.2	Reducción del ruido debido a campos magnéticos	60
4.6	Instrumentación y accesorios	63
4.7	Análisis comercial.....	63
4.7.1	Galgas uniaxiales	63
4.7.2	Galgas en roseta	73
4.7.3	Instrumentación y accesorios necesarios para medir deformaciones	79
4.8	Conclusiones	85
5.	Métodos basados en deformaciones: Sensores de fibra óptica.....	86
5.1	Funcionamiento	87
5.1.1	Uso como sensor de deformación	88
5.2	Instrumentación: interrogador óptico.....	89
5.3	Aplicaciones.....	91
5.3.1	Ingeniería civil	91
5.3.2	Grandes máquinas eléctricas	92
5.3.3	Aerogeneradores	93
5.3.4	Industria aeroespacial.....	94
5.3.5	Sector ferroviario.	95
5.3.6	Aplicaciones en Petróleo y Gas.	96

5.4	Análisis comercial.....	97
5.4.1	Sensores FBG.....	97
5.4.2	Instrumentación y accesorios	102
5.5	Conclusiones	107
6.	Sensor ICP de deformaciones.....	108
7.	Comparativa de presupuestos	110
8.	Conclusiones generales.....	112
9.	Bibliografía.....	115

Índice de figuras

<i>Figura 1 Accidente por fallo estructural en el fuselaje de un avión</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2 Derrumbe de puente debido a fallo estructural.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3 Factores que se relacionan la hora de elegir un sensor</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4 Delaminación por impacto de un material compuesto.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5 Representación de los modos de vibración para una estructura de 2 GDL</i>	<i>24</i>
.....	
<i>Figura 6 Diagrama de bloques de la FRF</i>	<i>24</i>
<i>Figura 7 Ejemplo de FRF.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 8 Esquema de medición de la impedancia de una estructura</i>	<i>27</i>
<i>Figura 9 Análisis modal experimental de un tramo de escape.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 10: Matriz MAC.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 11 Excitación con martillo de impacto.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 12 Prueba sobre firme muy ondulado</i>	<i>38</i>
<i>Figura 13 Acelerómetro piezoeléctrico</i>	<i>39</i>
<i>Figura 14 Esquema de funcionamiento de un vibrómetro láser</i>	<i>40</i>
<i>Figura 15 Martillo de impacto</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16 Gatos hidráulicos</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17 Presupuesto vibrómetro láser.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 18 Galga extensométrica</i>	<i>49</i>
<i>Figura 19 Puente de Wheatstone.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 20 Colocación de galgas en cuarto de puente.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 21 Colocación de galgas en cuarto de puente con compensación de</i>	
<i>temperatura</i>	<i>50</i>
<i>Figura 22 Conexión en medio puente.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 23 Colocación de galgas en puente completo</i>	<i>51</i>
<i>Figura 24 Ensayo en laboratorio de viga polimérica para puente</i>	<i>53</i>
<i>Figura 25 Representación de la situación de galgas en un avión.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 26 Ensayo sobre chasis de vehículo</i>	<i>54</i>
<i>Figura 27 Uso de galgas en ensayo no destructivo.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 28 Crash test.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 29 Célula de carga</i>	<i>56</i>
<i>Figura 30 Acoplamiento capacitivo entre dos equipos eléctricos.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 31 Representación de un condensador.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 32 Acoplamiento entre circuitos.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 33 Jaula de Faraday para eliminar ruido electrostático</i>	<i>59</i>
<i>Figura 34 Campos magnéticos causantes del ruido.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 35 Inducción entre dos circuitos</i>	<i>60</i>
<i>Figura 36 Acoplamiento magnético entre circuitos</i>	<i>61</i>
<i>Figura 37 Compensación de ruido</i>	<i>61</i>
<i>Figura 38 Trenzado de cable para compensación de ruido debido a campos</i>	
<i>magnéticos.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 39 Cable coaxial.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 40 Galgas para compensación de ruido.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 41 Galgas del fabricante Omega y sus precios</i>	<i>64</i>
<i>Figura 42 Galgas de HBM</i>	<i>65</i>

<i>Figura 43 Galgas de 120 Ω en Amazon</i>	65
<i>Figura 44 Galgas de 350 en Amazon</i>	66
<i>Figura 45 Muestra de galgas en Amazon</i>	66
<i>Figura 46 Muestra de galgas en eBay</i>	67
<i>Figura 47 Muestra de galgas de 350 en eBay</i>	67
<i>Figura 48 Puente completo de galgas</i>	68
<i>Figura 49 Galgas Roarkit en AliExpress</i>	69
<i>Figura 50 Muestra de galgas de 350 en AliExpress</i>	69
<i>Figura 51 Ficha técnica de las galgas de 350</i>	69
<i>Figura 52 Muestra de galgas de 120 en AliExpress</i>	70
<i>Figura 53 Muestra de galgas de 120 en AliBaba</i>	70
<i>Figura 54 Galga semiconductor</i>	71
<i>Figura 55 Galgas en el distribuidor Digi Key</i>	72
<i>Figura 56 Galgas en roseta</i>	73
<i>Figura 57 Roseta de 120Ω de HBM</i>	74
<i>Figura 58 Galgas en roseta en Alibaba</i>	75
<i>Figura 59 Roseta de Micro Measurements distribuida por DigiKey España</i>	75
<i>Figura 60 Roseta fabricada y distribuida por HBM</i>	76
<i>Figura 61 Roseta suministrada por Omega</i>	77
<i>Figura 62 Acondicionador y amplificador de señal Phoenix Contact</i>	80
<i>Figura 63 Acondicionador y amplificador de señal Honeywell</i>	80
<i>Figura 64 Display</i>	81
<i>Figura 65 Sistemas de adquisición de datos de HBM</i>	83
<i>Figura 66 Sistemas de adquisición de datos de National Instruments</i>	83
<i>Figura 67 Ley de Snell</i>	87
<i>Figura 68 Partes de un cable de fibra óptica y su relación con la ley de Snell</i> . 87	
<i>Figura 69 Fotograbado de las redes de Bragg</i>	88
<i>Figura 70 Redes de Bragg e influencia del periodo</i>	89
<i>Figura 71 Esquema de funcionamiento de un sist. FBG para monitorización estructural</i>	90
<i>Figura 72 Espectro electromagnético</i>	91
<i>Figura 73 Instalación de sensores de fibra en un generador de potencia</i>	93
<i>Figura 74 Unidad FBG para aeronáutica y módulo para integración en la RTU2015 de Airbus DS (aplicaciones espaciales)</i>	95
<i>Figura 75 Sensores de deformación y temperatura instalados en los raíles.</i>	96
<i>Figura 76 Puntos críticos de una plataforma petrolífera</i>	96
<i>Figura 77 Sensores FBG individuales de HBM</i>	98
<i>Figura 78 Cadena de sensores FBG</i>	99
<i>Figura 79 Sensores con compensación de temperatura</i>	100
<i>Figura 80 Sensores FBG Korea</i>	101
<i>Figura 81 Interrogador de HBM</i>	102
<i>Figura 82 Interrogador INST C+L</i>	103
<i>Figura 83 Interrogadores en eBay</i>	104
<i>Figura 84 Especificaciones del interrogador BaySpec</i>	104
<i>Figura 85 Sensor ICP y su esquema interno</i>	109
<i>Figura 86 Sensores FBG conectados en serie en una viga en voladizo</i>	113

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Condiciones de medida de distintos parámetros en las pruebas dinámicas de carga</i>	36
<i>Tabla 2 Oferta de acelerómetros de sensores de medida</i>	44
<i>Tabla 3 Oferta acelerómetro de gran sensibilidad y aja frecuencia de B&K</i>	44
<i>Tabla 4 Oferta acelerómetro de gran sensibilidad y baja frecuencia de B&K</i> ..	44
<i>Tabla 5 Oferta de martillos de impacto de B&K</i>	45
<i>Tabla 6 Ventajas y desventajas de las galgas metálicas</i>	52
<i>Tabla 7 Ventajas y desventajas de las galgas semiconductoras</i>	52
<i>Tabla 8 Especificaciones de las galgas</i>	68
<i>Tabla 9 Especificaciones de las galgas semiconductoras</i>	71
<i>Tabla 10 Especificaciones galgas Micro Measurements</i>	72
<i>Tabla 11 Precios galgas roseta de MM</i>	76
<i>Tabla 12: Resumen de precios de todas las galgas</i>	78
<i>Tabla 13 Precio de las fuentes de alimentación</i>	79
<i>Tabla 14 Precios de acondicionadores de señal</i>	81
<i>Tabla 15 Resumen de precios de módulos de adquisición de datos</i>	84
<i>Tabla 16 Dimensiones de un cable de fibra óptica</i>	88
<i>Tabla 17 Parámetros de la ecuación 55</i>	89
<i>Tabla 18 Longitudes de onda del espectro electromagnético</i>	91
<i>Tabla 19 Especificaciones del sensor de FBG Korea</i>	101
<i>Tabla 20 Especificaciones del Interrogador INST C+L</i>	103
<i>Tabla 21 Presupuesto interrogador Safibra</i>	105

1. Antecedentes

El presente Trabajo de Fin de Máster surge a partir de la colaboración con ArcelorMittal para llevar a cabo las prácticas del Máster de Ingeniería Industrial.

El objetivo de dichas prácticas fue el de ayudar a Arcelor a posicionar en el mercado el sensor para monitorización estructural que desarrollan, del que no se darán datos por razones de confidencialidad. Para ello se han analizado las diferentes maneras de realizar la mencionada monitorización, tanto a nivel técnico (principios de funcionamiento, variables a medir, tecnologías de medida...) como a nivel comercial (precios de las actuales tecnologías).

2. Introducción

La monitorización de la salud estructural es un método en el que se utilizan sensores para recoger datos que se procesarán e interpretarán para crear un sistema de control durante todo el ciclo de vida de una estructura. La monitorización de la salud estructural es un proceso de inspección que facilita una gestión más eficiente de los activos al permitir al propietario conocer las condiciones de funcionamiento, implantar los planes de mantenimiento adecuados, reducir costes, aumentar la seguridad y asegurar el funcionamiento a largo plazo. Mediante una red de sensores se controlan uno o varios parámetros y por comparación con un estado 0 y sucesivos estados 1,2,3... se determina el estado actual de la estructura.

De todo esto, se observa que la monitorización de salud estructural (*SHM* por sus siglas en inglés: *Structural Health Monitoring*) no es sólo un ensayo no destructivo, es mucho más, englobando la integración de sensores, la adquisición y proceso de datos y, en general, toda la gestión de la estructura.

Motivos para la monitorización estructural

- Conocer el estado real de la estructura es un objetivo primordial para el constructor, el usuario final y los equipos de mantenimiento ya que el SHM:
- Permite optimizar el uso de la estructura y minimizar los fallos catastróficos
- Permite al constructor tener datos para mejorar su producto
- Cambia la forma de trabajar del equipo de mantenimiento: permite centrar las labores de mantenimiento en los puntos más débiles, evitando operaciones innecesarias que podrían dar lugar a nuevos fallos, optimiza los plazos entre mantenimientos.



Figura 1 Accidente por fallo estructural en el fuselaje de un avión



Figura 2 Derrumbe de puente debido a fallo estructural

2.1 Descripción del SHM

La definición más aceptada del daño en el campo de la monitorización estructural por Farrar y Worden [5]:

“Damage is defined as changes to the material and/or geometric properties of these systems, including changes to the boundary conditions and system connectivity, which adversely affect the system’s performance.”

Traduciendo al castellano sería:

"El daño se define como cambios en el material y/o las propiedades geométricas de estos sistemas, incluidos los cambios en las condiciones de contorno y la conectividad del sistema, que afectan negativamente al rendimiento del sistema".

Esta definición implica indirectamente que todas las aplicaciones *SHM*, incluida la supervisión en línea, requieren una red de sensores adecuado para evaluar posibles cambios en la estructura que pueden afectar su correcto funcionamiento. Por lo general, la sensibilidad del sistema *SHM* se asocia con una buena interacción entre la estructura y los sensores. Por esta razón, es muy importante seleccionar los sensores apropiados para el material de la estructura a inspeccionar, las variables a medir, y la información a obtener para la identificación de daños.

Los fallos causados por inconsistencias entre la información de los sensores, el procesamiento de los datos adquiridos y su análisis para el pronóstico pueden afectar a los resultados obtenidos de los algoritmos o las metodologías utilizadas en la identificación de daños.

En *SHM*, se evalúa la integridad de una estructura en diferentes instantes de tiempo bajo diferentes condiciones de operación comparando cambios en el comportamiento mecánico, físico o químico de dicha estructura. El análisis realizado en alguna de las metodologías actuales no solo tiene como objetivo identificar posibles daños existentes, sino que también se utiliza en el desarrollo de pronósticos sobre el comportamiento futuro de los materiales y estructuras inspeccionados.

En general, los tipos de SHM pueden clasificarse en dos grandes grupos: basado en modelos matemáticos que representan a la estructura, sus propiedades y comportamiento; y basado en datos que se obtienen directamente sobre la estructura. En el primer tipo de análisis, se obtiene información teórica o datos adquiridos de la estructura y se usan para predecir el comportamiento de la estructura frente a las cargas ambientales y operacionales. El segundo enfoque se basa en la identificación de daños atendiendo al análisis de los datos adquiridos directamente de la estructura. Los datos obtenidos de la estructura sin dañar se usan para construir un patrón y tenerlo como referencia para compararlo con los sucesivos estados por los que vaya pasando la estructura.

2.2 Implementación de sistemas SHM

El desarrollo de sistemas SHM debe cumplir con los requisitos económicos, ambientales, restricciones operativas y temporales, entre otros. Estos factores deben analizarse antes de proponer un sistema SHM como solución.

2.2.1 Justificación económica

Antes de emprender el desarrollo y la aplicación de un esquema de inspección estructural, es importante asegurar que la solución alcanzada sea coherente con respecto a:

- los recursos que requerirá;
- el tiempo de respuesta;
- el margen de error permitido;
- cumplimiento de las condiciones operativas y restricciones en la aplicación de este tipo de esquema.

La mayoría de las aplicaciones de los esquemas de detección de daños pueden reducir los costos de mantenimiento y la frecuencia de inspecciones. Estos esquemas de detección dan como resultado un aumento en la vida útil restante de las estructuras.

Por ejemplo, en la industria aeronáutica, la utilidad de SHM se refleja en la reducción periódica tiempos de revisión, la mayor disponibilidad y seguridad de las aeronaves, y la disminución de los costos programados.

Algunas industrias como la generación energética tienen un importante gasto en el mantenimiento y reparación de turbinas. Estos gastos se incrementan significativamente en plataformas *offshore*. Por lo tanto, el uso de SHM como herramienta para prevenir daños repentinos produce beneficios esenciales en esta industria.

Uno de los desafíos asociados con el uso de aplicaciones SHM en las industrias es la inversión inicial de implementar la tecnología y de garantizar su fiabilidad general.

En este contexto, los desarrollos tales como nuevos transductores y redes de sensores de bajo coste para inspeccionar grandes estructuras, junto con los beneficios

obtenidos por estos sensores de bajo costo en comparación con el costo de la supervisión visual tradicional, así como la rápida implementación de dichos sensores han hecho que los métodos de SHM haya tenido un gran impulso en los últimos tiempos teniendo asociada una clara consecuencia: el ahorro de dinero a largo plazo.

2.2.2 Condiciones operacionales y ambientales

Las estructuras en servicio están sujetas a la influencia de las condiciones operativas y ambientales que les afectan causando degradación, envejecimiento y daños. Dichas condiciones también son causa de posibles falsas detecciones en los sistemas SHM, debido a la sensibilidad de los métodos al funcionamiento y variables ambientales. Por esa razón, la influencia de estas variables debe ser considerado en el desarrollo de un sistema SHM confiable.

2.2.3 Definición de daño

Cuando se utilizan técnicas de detección de daños que no son invasivas y se utilizan sensores que se instalan permanentemente en la estructura, como es el caso en SHM, la influencia del uso de la estructura debe tenerse en cuenta. Esto significa que un pequeño cambio en la estructura puede ser detectado como una señal diferente por los sensores, y el resultado final del análisis puede conducir a una mayor frecuencia de clasificación errónea. En este caso, la caracterización del comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones y la definición de la influencia de las condiciones de operación son tareas críticas en la implementación de un sistema SHM. Es muy importante diferenciar entre un estado normal o aceptable y dañado para determinar si se debe informar el estado actual.

2.2.4 Niveles en la identificación del daño

La identificación de los daños se clasifica en cuatro niveles

- Nivel 1: detección. Determinación de que el daño está presente en la estructura
- Nivel 2: localización. Determinación de la localización del daño.
- Nivel 3: cuantificación. Determinación de la severidad del daño.
- Nivel 4: prognosis. Predicción de la vida útil de la estructura.

2.3 Variables a medir

Las estructuras están sometidas a distintas variables a partir de las cuales se puede determinar su estado en comparación con un estado 0 medido sobre la propia estructura o bien calculado sobre modelos teóricos y simulaciones realizadas con programas de elementos finitos normalmente.

Desplazamiento: Es la variación relativa entre la posición inicial y final de un punto medida en unidades de longitud (m ó mm). La medición de esta variable, aunque útil, suele ser compleja ya que requiere un sensor sin contacto para comparar los puntos inicial y final del desplazamiento.

Velocidad: Es la variación del desplazamiento respecto del tiempo en m/s.

Aceleración: Es la variación de la velocidad respecto del tiempo en m/s². En las estructuras se producen pequeños o relativamente pequeños desplazamientos a lo largo del tiempo cuyo valor va variando lo que hace que existan unas aceleraciones que los sensores captan y permiten calcular los parámetros modales (frecuencias naturales, amortiguamiento y modos de vibración) para conocer el estado de la estructura.

Deformación: Es la relación entre el incremento o decremento de la longitud de una pieza y su longitud total.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Ecuación 1}$$

Esta es una variable adimensional, aunque muchos fabricantes y en algunos artículos al resultado de este cociente le ponen la unidad strain (ε) o microstrain ($\mu\varepsilon$) debido a que las deformaciones son muy pequeñas y así resulta más fácil de leer el resultado.

2.4 Sensores y Actuadores

Desde la perspectiva de SHM, la detección de daños requiere la implementación de un conjunto de sensores cuya función principal es capturar información que puede usarse para determinar el estado de la estructura bajo análisis. Algunos esquemas de inspección utilizan la propagación de una señal que puede ser producida por un actuador. Los esquemas de inspección también dependen de los tipos de transductores utilizados y los tipos de señales propagadas a través de la estructura. Como parte de una red integral de sensores, pueden obtener información de diferentes partes de la muestra o estructura bajo inspección.

Las redes de sensores requieren alguna fuente de excitación (no confundir con fuentes de alimentación que aportan tensión al circuito) que aplique algún tipo de fuerza a la estructura. La misión de los actuadores es la de imprimir dicha fuerza a determinadas estructuras.

2.4.1 Tipos de sensores

Con el mayor uso de las técnicas de SHM, se han desarrollado nuevos sensores que pueden mejorar la detección, localización y caracterización de parámetros. Este desarrollo busca la reducción del consumo de energía y del peso del sistema.

La elección de sensores es clave ya que, un sensor elegido correctamente no solo detecta daños, sino que también permite su ubicación, cuantificación y clasificación.

La elección de un sensor depende de distintos factores que interactúan entre sí como son la variable a medir, el presupuesto, la instrumentación para recopilación de datos, la excitación, etc. (Ver Figura 3)

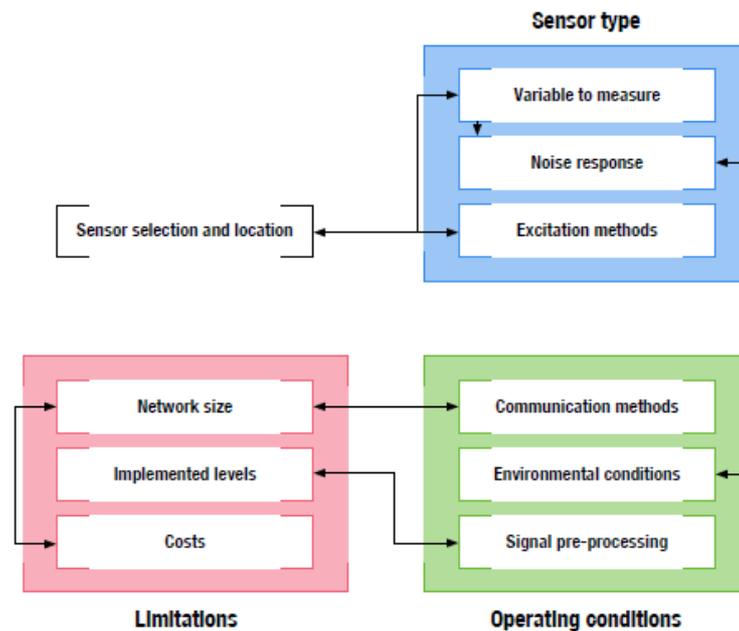


Figura 3 Factores que se relacionan la hora de elegir un sensor

2.4.1.1 Sensores piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos están formados por cerámicas y polímeros y pueden trabajar con el efecto piezoeléctrico directo e inverso. Esta es la razón por la que estos materiales se usan a menudo para hacer sensores y actuadores basados en vibraciones. Los materiales más utilizados en sensores piezoeléctricos son el titanato de circonato de plomo (PZT) y titanato de bario (BaTiO_3).

Una ventaja adicional de los sensores piezoeléctricos es que se pueden fabricar en diferentes formas, como rectangular, longitudinal y circular. Esto hace que su flexibilidad desde el punto de vista de la monitorización sea muy grande ya que se pueden adaptar a muchos tipos de estructura. Con el uso de estos sensores, es posible medir la vibración y obtener información sobre diferentes variables, como la deformación o la corrosión.

2.4.1.2 Fibra óptica

La fibra óptica se utiliza en aplicaciones que requieren alta precisión e inmunidad electromagnética. El principio subyacente de la fibra óptica se basa en la interferencia de luz blanca, que puede relacionar el desplazamiento absoluto de una señal emitida desde una fuente de luz con cualquier variable física. Este tipo de sensor se utiliza para medir deformaciones, temperaturas, concentraciones de materiales, aceleraciones, rotación, presión, vibraciones y desplazamiento.

Para mediciones de deformación, se usa la modalidad FBG (Fiber Bragg Gratings) que, a grandes rasgos, funciona como un filtro de determinadas longitudes de onda y en función de las longitudes reflejadas se pueden determinar cuantitativamente las deformaciones y su ubicación.

2.4.1.3 Sensores piezorresistivos

Están basados en el efecto piezorresistivo que es la variación de la resistencia de un conductor al aumentar o disminuir su longitud.

Se llevan usando durante décadas para la medición de deformaciones en toda clase ámbitos gracias a su economía y relativamente buena precisión de medida.

2.4.1.4 Sensores sin contacto: Vibrómetro láser

Estos sensores no necesitan estar en contacto directo con la estructura, lo que los hace muy prácticos en determinadas situaciones en las que, por temperatura, peso, ambiente agresivo... hacen inviable el uso de algún tipo de los sensores descritos anteriormente.

Los sensores sin contacto miden de forma relativa, es decir, toman una referencia y comparan las sucesivas medidas con la mencionada referencia.

2.5 Ubicación y redes

La selección de un sensor apropiado no solo depende de la variable medida, sino que también debe tener en cuenta aspectos como las condiciones ambientales y operativas, la cantidad de sensores, la ubicación de la red y el consumo de energía.

Los factores de selección se dividen en (a) tipo de sensor; (b) condiciones de operación; y (c) limitaciones. En el primer caso, diferentes elementos, como las variables a medir, la respuesta al ruido, y el método de excitación se deben tener en cuenta. Las condiciones de operación se refieren a la interacción de el sensor con la estructura durante su funcionamiento. Esto significa que se deben considerar las condiciones ambientales y operativas al determinar el enfoque para preprocesado de la información y al definir los métodos de comunicación. Finalmente, limitaciones como costes, implementación y la configuración de la red de sensores deben ser consideradas.

3. Métodos basados en vibraciones

La seguridad de las estructuras es uno de los principales problemas en la consideración del envejecimiento de puentes y edificios, aviones u otras estructuras antiguas. La metodología de monitoreo (SHM) proporciona una herramienta interesante para el continuo seguimiento de estructuras técnicas. La aplicación de métodos SHM proporciona muchas oportunidades para prolongar la vida de una estructura mediante la detección temprana de daños. Además del aspecto de la seguridad, un mayor conocimiento sobre el estado de salud de la estructura puede conducir a un diseño mejorado de estructuras.

Hasta la década de los 90, la detección de grietas y otros defectos se hacía por inspección visual, lo que hacía que los fallos se detectaran tarde y que para ello fuera necesario desmontar algunas partes de la estructura. Todo ello implicaba unos costes de operación y mantenimiento altos, con lo que se hizo patente la necesidad de implementar métodos para conocer, en tiempo más o menos real, el estado de salud de la estructura.

El uso de materiales compuestos, en aeronáutica, presenta un problema adicional: la delaminación (“Modo de fallo en materiales compuestos que consiste en la separación de las capas que lo componen, y que supone una significativa pérdida de resistencia mecánica del material.” Real Academia de Ingeniería). Este tipo de fallo no es detectable a simple vista.

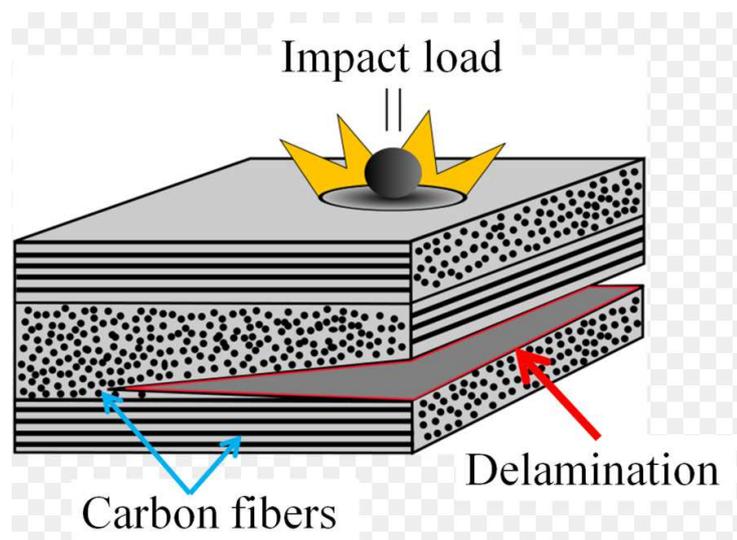


Figura 4 Delaminación por impacto de un material compuesto

En contraste con estas situaciones de sobrecarga repentina, el envejecimiento que les ocurre a estructuras sometidas a vibraciones continuas con amplitudes moderadamente bajas causa fatiga en el material y el inicio de grietas por fatiga, especialmente en puntos de concentración de tensiones, como muescas e inhomogeneidades materiales como juntas soldadas. El carácter progresivo del crecimiento de grietas en metales, en condiciones cíclicas, es claramente reconocible por la mecánica de fractura.

3.1 Análisis modal: definición

El análisis modal es el estudio de las propiedades dinámicas de las estructuras lineales, sobre la base de las pruebas estructurales o de la simulación de elementos finitos basada en análisis.

Entre estas propiedades dinámicas se encuentran las frecuencias naturales y los modos de vibración. Las propiedades dinámicas dependen de la masa, la rigidez y el amortiguamiento de la estructura, y determinan la respuesta de la vibración estructural durante la exposición a las cargas operativas. Cualquier deformación de un sistema estructural lineal se puede expresar como una combinación lineal de los modos estructurales, que forman una base de vectores ortonormal.

Los resultados de las pruebas y los análisis modales se utilizan en diferentes aplicaciones de simulación y pruebas, entre las que se encuentran los cálculos de la respuesta de vibración, el análisis de la causa de los problemas de vibración y la detección de daños. Los cálculos modales son muy efectivos y permiten una evaluación eficiente de los cambios estructurales ante respuestas de cualquier tipo.

3.2 Conceptos teóricos

En las estructuras, ocurren cambios en la respuesta dinámica debido a defectos tales como grietas o delaminaciones (si son de material compuesto). La forma clásica de obtener información sobre la medición de una estructura es añadir a dicha estructura un conjunto de sensores y excitarla con un actuador o las fuerzas naturales del medio ambiente para procesar los datos.

Para ver si algo ha cambiado, los datos de medición deben evaluarse y algunos rasgos característicos, como medias, variaciones, valores máximos y mínimos, la información espectral, etc., debe extraerse mediante análisis de señal pura.

Dentro de los métodos basados en vibraciones existen dos categorías: los locales y los globales.

Los métodos locales son aquellos que permiten encontrar pequeños defectos, tales como poros, grietas en los puntos en los que se espera que se producirán como por ejemplo soldaduras o formas que actúen como concentrador de tensiones.

Los métodos globales utilizan el hecho de que un daño local, provoca una reducción en la matriz de rigidez local, influye en el comportamiento de toda la estructura en términos de tiempo y espacio.

Por ejemplo, la reducción de rigidez provoca una disminución de las frecuencias propias, que implicará un cambio en la vibración característica. Se pueden utilizar patrones de cargas operativas o vibraciones naturales para este propósito. Estos métodos, basados en vibraciones de baja frecuencia, monitorean todo el sistema mediante mirando los cambios de frecuencias resonantes, aumentos en la amortiguación o cambios en los modos de vibración. Estos permiten distinguir entre los estados no dañados y dañados de la estructura.

3.2.1 Frecuencias naturales y modos de vibración, descripción matemática

Para comprender bien que es lo que los métodos basados en vibraciones miden es preciso definir lo que son las frecuencias naturales y los modos de vibración.

El comportamiento de un sistema vibratorio, como lo son una estructura o un componente estructural sometido a una fuerza de excitación oscilatoria, se rige por la siguiente ecuación de movimiento, que relaciona las fuerzas internas del sistema con las fuerzas externas de excitación, $f(t)$:

$$M * \ddot{u} + C * \dot{u} + K * u = f(t) \quad \text{Ecuación 2}$$

En esta ecuación, M , C y K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema y representan sus propiedades inerciales, disipativas y elásticas, respectivamente; son de dimensiones $N \times N$ donde N es el número de grados de libertad del sistema. El vector x tiene dimensiones $N \times 1$ y representa los desplazamientos asociados con los distintos grados de libertad.

Las frecuencias a las que vibra un sistema bajo vibración libre (es decir que inicia apartando a la estructura de su posición de equilibrio, imponiendo desplazamientos o velocidades iniciales en algún punto de la misma) son las frecuencias naturales del sistema. Son propiedades del sistema dinámico que dependen de su distribución de masa y rigidez. Un sistema tendrá tantas frecuencias naturales como grados de libertad.

Se irán explicando brevemente todas las opciones para tener una visión completa de los métodos y lo que miden.

3.2.1.1 1GDL sin amortiguamiento

$$M * \ddot{u} + K * u = 0 \quad \text{Ecuación 3}$$

En el caso más sencillo de un sistema de 1GDL sin amortiguamiento la frecuencia natural en rad/s es:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Pasado a Hz sería:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad \text{Ecuación 5}$$

3.2.1.2 1 GDL con amortiguamiento

$$M * \ddot{u} + C * \dot{u} + K * u = 0 \quad \text{Ecuación 6}$$

Tendrá una solución de la forma:

$$u = Ae^{st} \quad \text{Ecuación 7}$$

Siendo s un parámetro que dependerá de ξ , el coeficiente de amortiguamiento ξ es la relación entre el amortiguamiento y el amortiguamiento crítico

$$\xi = \frac{c}{c_{cri}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$c_{cri} = 2\sqrt{km} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$s = \frac{c}{2m} \pm \sqrt{\frac{c^2 - c_{crit}^2}{4m}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Con la existencia de amortiguamiento las frecuencias naturales quedan amortiguadas dependiendo del coeficiente ξ :

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Por último, con una fuerza externa de la forma $f(t)=Fe^{i\omega t}$ se obtiene una amplitud de movimiento $u(t)=Ue^{i\omega t}$ que da lugar a una respuesta en frecuencia (FRF) de la forma:

$$H(\omega) = \frac{1}{k - \omega_d^2 m + i\omega c} \quad \text{Ecuación 12}$$

3.2.1.3 *N GDL sin amortiguamiento*

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento se pueden escribir en forma matricial:

$$M * \{\ddot{u}\} + K * \{u\} = f(t) \quad \text{Ecuación 13}$$

Cuando se tiene más de 1 GDL las frecuencias naturales se obtienen resolviendo el determinante:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad \text{Ecuación 14}$$

Una vez obtenidas las frecuencias naturales se pueden obtener los modos de vibración, resolviendo la Ecuación 15:

$$[-\omega_i^2 * M + K]\{\phi_i\} = \{0\} \quad \text{Ecuación 15}$$

Ahora se considera la respuesta forzada de este sistema. Se supone que la excitación es la siguiente: $\{f(t)\} = \{F\}e^{i\omega t}$ se obtiene una amplitud de movimiento $\{u(t)\} = \{U\}e^{i\omega t}$ que da lugar a una respuesta en frecuencia (FRF) de la forma:

$$H = (K - \omega^2 M)^{-1}$$

Ecuación 16

3.2.1.4 Propiedades de ortogonalidad

Los modos cumplen la propiedad de ortogonalidad respecto a las matrices de masa y rigidez, es decir, teniendo dos modos i y j , si se premultiplica M ó K por el modo j y se multiplica por i tiene que dar 0:

$$\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_i\} = 0$$

Ecuación 17

$$\{\phi_j\}^T [K] \{\phi_i\} = 0$$

Ecuación 18

3.3 Interpretación física.

La solución que las ecuaciones del movimiento proporcionan N formas posibles de movimiento. Si excitamos de forma independiente cada uno de estos movimientos, observaremos:

- A cada movimiento le corresponde un valor propio ω_i^2 , que además es la frecuencia del movimiento en cada GDL, por tanto, se tiene una frecuencia natural por cada uno de los GDL
- Cada vector ϕ proporciona la relación que existe entre las amplitudes de cada grado de libertad en cada instante de tiempo y que se mantiene constante durante todo el movimiento, ya que sus componentes no dependen del tiempo. Por lo tanto, ϕ_i proporciona la configuración deformada. Si se excita sólo la i ésima forma de movimiento, la respuesta en cada grado de libertad viene dada por la expresión:

$$\{u_i\} = A_i \{\phi_i\} \cos(\omega_i t - \theta_i)$$

Ecuación 19

Los vectores ϕ se les conoce como modos de vibración (cada modo indica la forma o la deformada que adopta la estructura en su movimiento) y a la matriz Φ como matriz modal.

La Figura 5 ilustra, para 2 GDL, de forma gráfica y clara el concepto de modo y su significado físico.

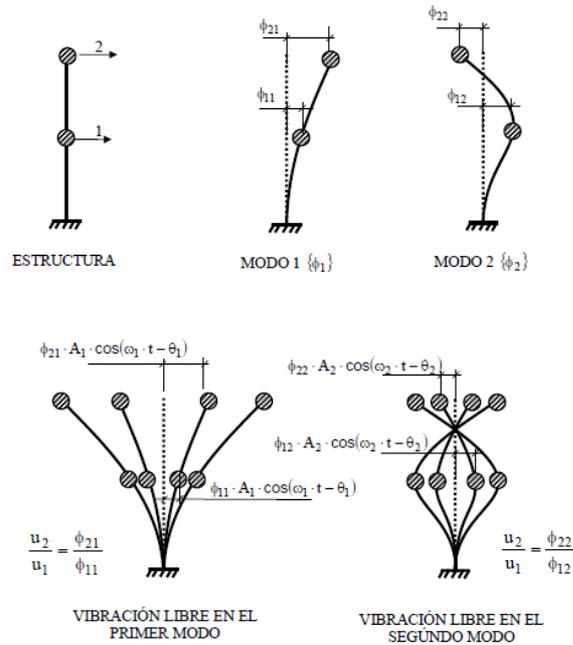


Figura 5 Representación de los modos de vibración para una estructura de 2 GDL

3.4 Dominios del análisis modal

En el análisis modal se puede trabajar tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. En análisis modal es más interesante trabajar en el dominio de la frecuencia ya que una estructura suele tener más de una frecuencia natural y así con una sola gráfica se pueden visualizar todas las frecuencias.

La FRF o función de respuesta en frecuencia relaciona una señal de salida (output) en el numerador con una señal de entrada (input) en el denominador.

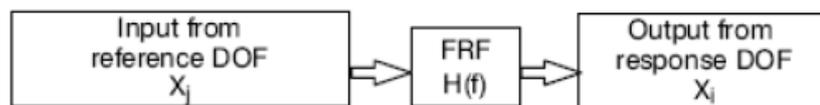


Figura 6 Diagrama de bloques de la FRF

Para el análisis modal, las señales de salida que se miden son las aceleraciones. Los picos en las FRF indican desplazamientos grandes en la salida para entradas al sistema bajas, es decir, nos indicaría cada pico una frecuencia natural. Se puede ver un ejemplo de FRF en la Figura 7.

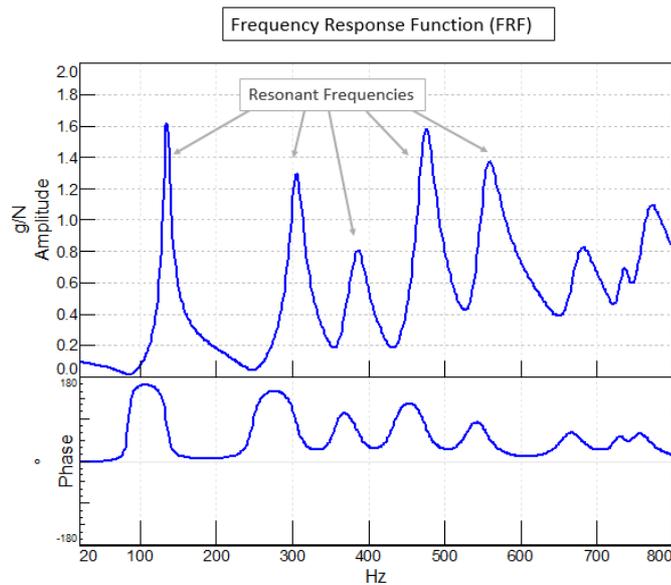


Figura 7 Ejemplo de FRF

Se puede relacionar la ecuación fundamental del movimiento con la función de respuesta en frecuencia.

$$M * \ddot{u} + C * \dot{u} + K * u = f(t) \quad \text{Ecuación 20}$$

Aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT) se pasa la ecuación del dominio del tiempo al de la frecuencia:

$$-\omega^2 M * U(\omega) + i\omega C * U(\omega) + K * U(\omega) = F(\omega) \quad \text{Ecuación 21}$$

Sacando factor común el desplazamiento $U(\omega)$:

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K)U(\omega) = F(\omega) \quad \text{Ecuación 22}$$

Despejando $U(\omega)$:

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K)^{-1}F(\omega) = U(\omega) \quad \text{Ecuación 23}$$

Siendo la FRF:

$$H(\omega) = (-\omega^2 M + i\omega C + K)^{-1} \quad \text{Ecuación 24}$$

3.4.1 Métodos de análisis modal en el dominio de la frecuencia

3.4.1.1 Residuo de salida.

Se comparan las respuestas en el dominio de frecuencia de los sucesivos estados dañados con el sistema no dañado. Este es un método basado en datos medidos (desplazamientos, aceleraciones, etc), es decir, usa datos medidos directamente para cuantificar los daños.

$$r_0(\omega) = X_d(\omega) - X_0(\omega) \quad \text{Ecuación 25}$$

Siendo $X_d(\omega)$ la salida de la FRF de un estado que no sea el inicial, $X_0(\omega)$ la salida de la FRF en el estado inicial de referencia con el que se compara e

3.4.1.2 *Residuo de entrada (IRM).*

Similar al método anterior el IRM utiliza el desajuste de la ecuación de movimiento cuando los datos de medición no coinciden con el modelo representado por matrices del sistema "0".

$$r_l(\omega) = F(\omega) - (-\omega^2 M + i\omega C + K)X_d \quad \text{Ecuación 26}$$

3.4.1.3 *Método residual de entrada proyectada (PIRM).*

Oeljeklaus[37] presentó un método interesante para superar el problema de los datos de medición incompletos. La intención es aprovechar las buenas propiedades del método residual de entrada que garantizan su convergencia al mínimo. Esto se logra mediante la introducción de una matriz de proyección especial que se construye de manera de enmascarar los componentes que faltan en la respuesta.

3.4.1.4 *Funciones de respuesta de frecuencia (FRF).*

Usando el hecho de que el producto de la rigidez y la flexibilidad dinámica (representada por la matriz $H(\omega)$) es la matriz de identidad I , se pueden correlacionar los parámetros M-C-K con los datos de medición de la FRF.

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K)H(\omega) = I \quad \text{Ecuación 27}$$

El método de impedancia trabaja en el rango de frecuencia más alto (típicamente > 30 kHz) comparando cambios en el espectro de impedancia del sistema electromecánico (EM) debido a daños.

3.4.1.5 *Cambios en la impedancia*

La impedancia del sistema EM está determinada por el voltaje de entrada y la corriente de salida del actuador piezoeléctrico. La idea es que el daño en la estructura cambia la impedancia y, por lo tanto, la impedancia resultante del sistema EM acoplado. La impedancia $Z_{struct}(\omega)$ de la estructura mecánica (que es una relación de velocidad sobre fuerza en la posición del actuador / sensor PZT) puede relacionarse de la masa continua o discreta, amortiguación y rigidez:

$$Z(\Omega) = \frac{1}{i\Omega C} \left(1 - k^2 \frac{Z_{struct}(\Omega)}{Z_{PZT}(\Omega) + Z_{struct}(\Omega)} \right)^{-1} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde C es la capacidad de carga y k es un coeficiente de acoplamiento cruzado electromecánico del transductor piezoeléctrico. La parte real del espectro real se compara con la almacenada.

Se puede realizar el espectro de referencia Z_0 del sistema no dañado y una detección de Nivel 1.

El método de impedancia es un método cualitativo y posee un carácter local. A altas frecuencias, las resonancias estructurales son localizadas y altamente sensibles al daño. Además, la energía se dispersa en la estructura para que los efectos del daño solo se puedan ver de cerca posición del actuador.

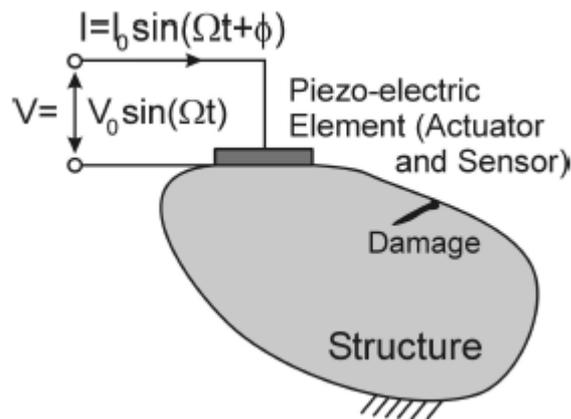


Figura 8 Esquema de medición de la impedancia de una estructura

3.5 Tipos de análisis modal

Existen dos clases de análisis modal que se diferencian principalmente en su manera de excitar la estructura a estudiar y con ello también la aplicación de cada una de las clases.

Las mencionadas clases de análisis modal serían:

- Análisis modal experimental
- Análisis modal operacional

En los subapartados 3.5.1 y 3.5.2 se resumirán las características de cada uno.

3.5.1 Análisis modal experimental

Es la modalidad más usada en la experimentación en laboratorio para la experimentación con pequeñas o relativamente pequeñas estructuras. Dichas estructuras se montan en un banco de pruebas y se excitan con martillos de impacto u otro tipo de agitadores. Es decir, para este análisis se conocen tanto la entrada al sistema como la salida y se obtienen los parámetros modales a partir de la Función de Respuesta en Frecuencia (FRF).

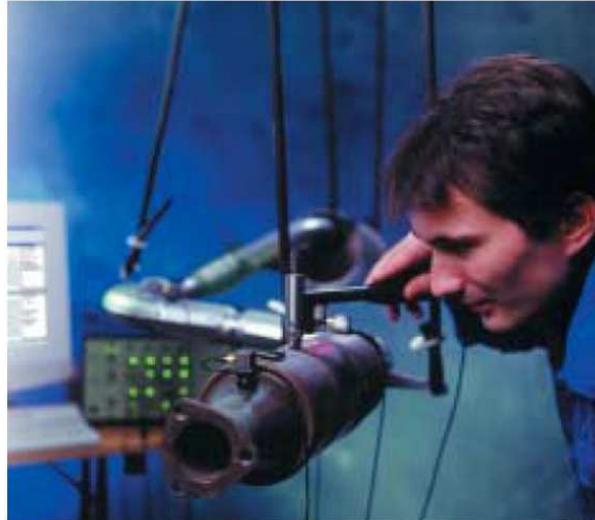


Figura 9 Análisis modal experimental de un tramo de escape

Los datos obtenidos por los sensores están en el dominio del tiempo, por lo que se deben referenciar al dominio de la frecuencia usando la transformada de Fourier (Fast Fourier Transform: FFT)

3.5.2 Análisis modal operacional

El análisis modal operacional se basa en la medición de la respuesta de una estructura usando sólo el ambiente y las fuerzas de servicio que actúan sobre la misma. Se usa para obtener una descripción de los modos de la estructura bajo sus condiciones de servicio. Se toma como excitación las fuerzas que actúan que actúan durante la operación de la estructura como por ejemplo las cargas debidas al viento en el caso de puentes o edificios. En vez de cargar la estructura artificialmente y tratar la excitación ambiental como una fuente de ruido no deseado se usa como fuente de excitación.

Este análisis es muy utilizado en estructuras que bien por su tamaño o situación dificultan el análisis modal experimental:

- Grandes estructuras, como edificios de gran altura, puentes, torres y presas.
- Maquinaria rotativa, como turbinas eólicas, generadores, motores y bombas.
- Estructuras marítimas, como barcos, submarinos y plataformas en alta mar.

En este tipo de análisis al no conocer la entrada al sistema no es posible determinar la FRF. Lo único que aún se puede obtener de una estructura operativa es la respuesta debido a las fuerzas de excitación desconocidas. Esta respuesta generalmente se mide en una serie de posiciones que se denominan los grados de libertad (GDL o DOF por sus siglas en inglés). Es en estos puntos donde se determinan las formas de los modos.

La respuesta generalmente se mide con acelerómetros, pero se pueden usar otros dispositivos que para medir la respuesta dinámica tales como vibrómetros láser (cuando

se requiere que no haya contacto, por ejemplo, debido a altas temperaturas) o galgas extensométricas (para completar información).

Al no conocer las fuerzas de entrada el modelo pasa de ser determinista a ser estocástico. Un modelo estocástico es aquel que sirve para usar magnitudes aleatorias que varían con el tiempo o para caracterizar una sucesión de variables aleatorias que evolucionan en función de otra variable, generalmente el tiempo. Cada una de las variables aleatorias del proceso tiene su propia función de distribución de probabilidad y pueden o no estar correlacionadas entre sí.

El marco estocástico utilizado en el Análisis Modal Operacional supone que la excitación que está impulsando el sistema es un llamado Proceso estocástico de ruido blanco gaussiano. Esto se puede traducir a un lenguaje más humano como una entrada de excitación que tiene el mismo nivel de energía en todas las frecuencias que estamos viendo. Por lo tanto, significa que este supuesto solo implica que todos los modos están excitados por igual.

Sin embargo, normalmente este no es el caso en el mundo real, ya que siempre hay entradas en algunas frecuencias que contienen más energía que otras. Para compensar esto, se supone que las fuerzas de excitación desconocidas que se modelan en este marco estocástico son el resultado de una "conformación" del ruido blanco. Se supone que la conformación se realiza mediante un filtro lineal que puede dar forma al ruido blanco plano en la forma correcta que tiene una distribución de energía como las verdaderas fuerzas de excitación desconocidas.

Entonces, en este marco se supone que la respuesta de una estructura es la salida de un sistema combinado compuesto por el sistema estructural que contiene la dinámica de la estructura que se está probando, así como el filtro de excitación que genera las fuerzas de excitación desconocidas que no podemos medir.

En la práctica, la teoría anterior implica que la excitación necesaria para realizar el Análisis modal operacional debe ser de banda ancha en el rango de frecuencia de los modos de interés. Si no hay nada que excite constantemente los modos durante la prueba, el resultado será muy pobre.

Es aceptable tener una excitación de banda muy estrecha, como la excitación armónica, pero todavía tiene que haber excitación de banda ancha al mismo tiempo.

Otra implicación práctica del marco anterior es que algunos de los "modos" que aparecen en la respuesta medida podrían no originarse en la estructura misma. En realidad, podrían ser "modos" de entrada que se han filtrado a través del sistema estructural. En la práctica significa que algunos picos de los espectros pueden no estar relacionados con la estructura sino con la entrada.

3.6 Métodos basados en el análisis modal

Las pruebas de vibración ambiental se pueden realizar con grandes estructuras, bajo cargas ambientales, lo que conduce a cambios en las características dinámicas. Se supone que este tipo de excitación tiene un carácter estocástico con un espectro de banda ancha. Si este no es el caso, no se puede lograr una identificación completa, ya que solo aquellas frecuencias que están presentes en la fuente de excitación podrían ser

identificadas. Las pruebas se pueden realizar de manera relativamente rápida y económica.

Los tipos habituales de excitación en vibración forzada son impulso (martillo de impulso, caída de peso, etc.), fuerzas que siguen una función escalón (*Heaviside step*) y también excitaciones reguladas (armónicas, periódicas y estocásticas) usando sistemas electrodinámicos y electrohidráulicos. La selección del tipo de excitador depende de las características dinámicas de las estructuras y de las condiciones existentes del sitio. Usando la función escalón, la energía de entrada se concentra dentro del rango de baja frecuencia. Las excitaciones por impulso no serían adecuadas para grandes edificios. Con la vibración forzada se pueden medir durante intervalos más largos y en rangos de frecuencias amplios. Como principal desventaja el equipo y la operación de tales sistemas de excitación son sustancialmente más caros y requieren la exclusión del funcionamiento normal (tráfico por ej.). La ventaja es la identificación casi completa de las características modales de las estructuras.

El conocimiento de las características modales se utiliza para la identificación de daños, para el control de calidad de estructuras una vez finalizada la construcción, para la planificación y evaluación de trabajos de reparación, para la evaluación de la seguridad estructural tras una sobrecarga y para la elaboración y calibración de modelos estructurales.

Estos métodos son más fáciles de interpretar que los abstractos modelos en el dominio del tiempo o la frecuencia. La información es relativamente sencilla de interpretar, es decir, se comparan los parámetros de la estructura sin dañar y dañada.

El dominio modal proporciona un amplio conjunto de características sensibles al daño, como los cambios de frecuencias naturales, cambios en la energía de deformación modal, cambios en la curvatura de los modos, matriz de flexibilidad dinámica y curvatura de flexibilidad dinámica. También existen métodos para comprobar la correlación entre los parámetros modales obtenidos de forma experimental y los datos obtenidos numéricamente, como son el *MAC (Modal Assurance Criterion)*, *COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion)* o el *MDLAC (Multiple Damage Location Assurance Criterion)* entre otros.

3.6.1 Cambios en las frecuencias propias.

Este método utiliza el cambio en las frecuencias naturales de una estructura. El cambio en la rigidez produce un cambio en dichas frecuencias, lo que permite deducir los que causa este cambio. Como resultado del daño, las frecuencias más altas experimentan un cambio mucho más grande. Por lo tanto, tiene sentido expresar los cambios como cambios relativos. Otros problemas aparecen si los cambios de frecuencia propia son tan pequeños que los efectos debidos al daño están enmascarados por los cambios debidos a las condiciones ambientales, este es un proceso largo en el que se deben observar y cuantificar como.

Estos cambios por sí solos no permiten conclusiones sobre la fuente de los cambios de frecuencia. Por lo tanto, debe estar disponible un modelo que "conozca" la relación entre los cambios de frecuencia y rigidez. El modelo también permite el cálculo

de las derivadas parciales de primer orden que describen sensibilidades de la frecuencia propia con respecto a los cambios de parámetros.

3.6.2 Cambios en las formas modales

Las formas modales introducen información espacial sobre el daño. Los cambios locales de rigidez dan como resultado un cambio local de la curvatura de la forma del modo. Para un modo i ("d" para dañado, "0" el estado de referencia) el cambio del vector propio es:

$$r_{\phi,i} = \phi_d - \phi_0 \quad \text{Ecuación 29}$$

En primer lugar, se debe tener cuidado al asignar los pares correctos de valores propios / vectores propios, en segundo lugar, el uso de una correcta escala de las formas modales antes de compararlas. El primer problema puede resolverse mediante aplicando el MAC, el segundo por el factor de escala modal (MSF).

3.6.3 Modal Assurance Criterion (MAC)

Este es un método que permite comparar los modos obtenidos experimentalmente con los que se calculan de manera teórica.

Podemos evaluar la similitud entre dos modos que utilizan el Criterio de garantía modal (MAC), que proporciona valores entre 0 y 1. Un valor de 1 muestra una correlación perfecta entre los dos modos, mientras que 0 significa que no hay similitud entre estos dos modos.

$$MAC_{ik} = \frac{(\varphi_{iA}^T * \varphi_{kB})^2}{(\varphi_{iA}^T * \varphi_{iA})(\varphi_{kB}^T * \varphi_{kB})} \quad \text{Ecuación 30}$$

El método MAC se define comparando un conjunto de datos de formas modales A con otro conjunto B, donde, por ejemplo, el conjunto A puede ser el conjunto analítico y B el conjunto medido. El MAC funciona independientemente de la escala individual de la forma del modo medido y analítico vectores Se puede definir una versión alternativa del MAC considerando la matriz de masa:

$$MAC_{ik} = \frac{(\varphi_{iA}^T * M * \varphi_{kB})^2}{(\varphi_{iA}^T * M * \varphi_{iA})(\varphi_{kB}^T * M * \varphi_{kB})} \quad \text{Ecuación 31}$$

Sin embargo, se debe tener cuidado si la cantidad de sensores no permite número suficiente de componentes de formas modales para representar adecuadamente el modo.

En general hay una serie de circunstancias que hacen que el MAC tienda a 0 ó 1.

Puede tender a 0 por:

- El sistema no es estacionario como resultado de cambios en las propiedades de masa, rigidez y amortiguación durante las pruebas.

- La técnica de extracción de parámetros no es válida para el conjunto de datos medidos.
- Las formas modales son linealmente independientes. Si bien el MAC no es una verdadera verificación de ortogonalidad, ya que la masa o la rigidez las matrices no se han incluido en el cálculo, se puede usar como una aproximación de un control de ortogonalidad.

El MAC tiende a 1 cuando:

- El número de grados de libertad de respuesta es insuficiente para distinguir entre formas modales independiente
- Las formas modales son principalmente ruido coherente.
- Las formas modales representan el mismo movimiento diferente solo por un escalar.

Se consideran aceptables valores de MAC de entre 0,95 y 1.

El MAC se suele presentar en forma matricial, (ver *Figura 10: Matriz MAC* Figura 10). Una buena correlación de los modos sería una matriz identidad o que tienda a ella, es decir, valores de entre 0,95 y 1 en la diagonal y 0 o muy próximos a 0 en el resto de las posiciones de la matriz.

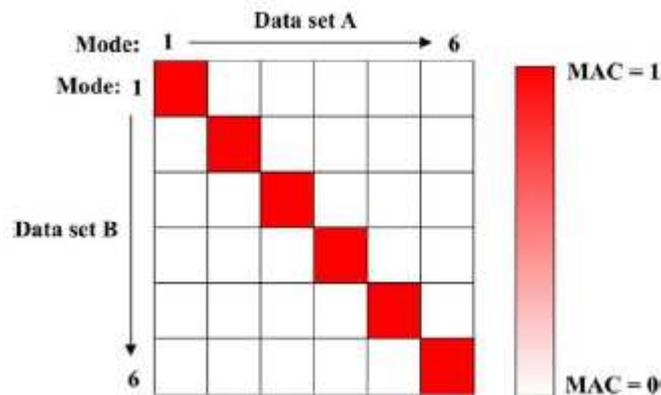


Figura 10: Matriz MAC

3.6.4 Co-ordinate Modal Assurance Criterion (COMAC)

Mientras que el MAC compara dos conjuntos de datos modales A y B, sumando sobre todos los grados de libertad en el producto escalar, el COMAC investiga cada grado individual de libertad al sumar todos los modos k.

$$COMAC_{ik} = \frac{(\sum_i \varphi_{kiA} * \varphi_{kiB})^2}{(\sum_i \varphi_{kiA} * \varphi_{kiA})(\sum_i \varphi_{kiB} * \varphi_{kiB})}$$

Ecuación 32

3.6.5 Método de la energía de deformación

El método se usa para la teoría de vigas de Euler–Bernoulli cuyo objetivo es encontrar cambios en la rigidez a la flexión. La idea básica es que el cambio en la curvatura de los modos de vibración es un buen indicador para daños. Para una viga de Euler-Bernoulli, la deformación ε es:

$$\varepsilon = \kappa z \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde κ es la curvatura del eje de la viga y z es la distancia al eje neutro. Para pequeñas deformaciones, es comúnmente aceptado que la curvatura es aproximadamente igual a la segunda derivada de la desviación w :

$$\kappa \cong w'' \quad \text{Ecuación 34}$$

La energía de deformación total del conjunto de la viga se puede obtener mediante la integración en toda su longitud L :

$$U_{tot} = \frac{1}{2} \int_0^L EI (w''(x))^2 dx \quad \text{Ecuación 35}$$

La energía de deformación modal se puede obtener reemplazando el desplazamiento general w por las formas modales $\varphi(x)$ tanto para la viga completa como para un elemento infinitesimal:

$$U_{modo} = \frac{1}{2} \int_0^L EI (\varphi''(x))^2 dx \quad \text{Ecuación 36}$$

$$U_{el} = \frac{1}{2} \int_{\Delta L} EI (\varphi''(x))^2 dx \quad \text{Ecuación 37}$$

Introducir la relación de la energía del elemento de acuerdo con la energía total para el sin daños (0) y los estados dañados (d):

$$U_{el} = \frac{1}{2} \int_{\Delta L} EI (\varphi''(x))^2 dx \quad \text{Ecuación 38}$$

$$F_{iel}^d = \frac{U_{el}^d}{U_{tot}^d} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$F_{iel}^0 = \frac{U_{el}^0}{U_{tot}^0} \quad \text{Ecuación 40}$$

Se puede relacionar los cambios de energía modal mediante un indicador que refleja como de aproximados están los estados 0 (inicial) y d (dañado).

$$\begin{aligned}
 \beta_{ij} &= \frac{\int_{\Delta L} (\varphi_d''(x))^2 dx + \int_{\Delta L} (\varphi_d''(x))^2 dx * \int_{\Delta L} (\varphi_0''(x))^2 dx}{\int_{\Delta L} (\varphi_0''(x))^2 dx + \int_{\Delta L} (\varphi_0''(x))^2 dx * \int_{\Delta L} (\varphi_d''(x))^2 dx} = \\
 &= \frac{EI_{el}^0}{EI_{el}^d}
 \end{aligned}$$

Ecuación 41

3.6.6 Cambios en la matriz de flexibilidad

Un método de cuantificación del daño es analizar los cambios en la matriz de flexibilidad (inversa de la matriz de rigidez K), comparando un estado d con el estado original 0 sin dañar de la estructura.

Se parte de la función de respuesta en frecuencia (FRF)

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^N \frac{\phi_k \phi_k^T}{(\omega_k^2 - \omega^2 + i2\zeta(\omega\omega_k))}$$

Ecuación 42

Se particulariza la Ecuación 42 para $\omega=0$; resultando la Ecuación 43:

$$H(\omega = 0) = \sum_{k=1}^N \frac{\phi_k \phi_k^T}{(\omega_k^2)}$$

Ecuación 43

La Ecuación 43 coincide con la matriz de flexibilidad que se describe en la Ecuación 44:

$$F = \sum_{k=1}^N \frac{\phi_k \phi_k^T}{(\omega_k^2)}$$

Ecuación 44

Cuando hay daño, cambian los parámetros modales, lo que indica que hay cambios en la flexibilidad ΔF . La Ecuación 45 nos indica la cuantificación del daño por diferencia de la matriz de flexibilidad entre dos estados:

$$\Delta F = F_d - F_0 = \sum_{k=1}^N \frac{\phi_{kd} \phi_{kd}^T}{(\omega_{kd}^2)} - \sum_{k=1}^N \frac{\phi_{k0} \phi_{k0}^T}{(\omega_{k0}^2)}$$

Ecuación 45

3.7 Aplicaciones

Las aplicaciones se dan en todos los campos de la industria, pero principalmente en:

- Ingeniería civil: Puentes, túneles, edificios, centrales eléctricas...

- Aeronáutica y estructuras de misiles: Helicópteros, aviones, sistemas de propulsión, carcasas de dichos sistemas...
- Industria aeroespacial: Satélites, estaciones espaciales, lanzaderas...
- Estructuras navales y terrestres: automóviles, trenes, barcos, submarinos...
- Maquinaria: Robots, máquinas rotativas...

3.7.1 Aplicaciones en Ingeniería civil

El aumento del número de estructuras civiles en los últimos años – viaductos, túneles- y la evolución y avances en materiales y tecnologías de construcción, así como los requisitos de uso de este tipo de estructuras, se ha creado la necesidad de mejorar las técnicas de inspección y verificación de la salud estructural.

La monitorización avanzada se ha convertido en un elemento fundamental a lo largo de todo el ciclo de vida de una estructura: desde el diseño y la construcción reduciendo los plazos, la explotación maximizando disponibilidad, hasta la rehabilitación y la retirada del servicio en caso de ser necesario. Sistemas que permiten la detección de sobrecargas e implementan mecanismos de seguridad, redundando todo ello en un incremento de la vida útil de la infraestructura.

Las estructuras civiles deben ser monitorizadas ya que un error de diseño puede hacer que, por el viento, tráfico, etc la estructura entre en resonancia superando incluso los Estados Límites de Servicio y pudiendo dar lugar a un fallo catastrófico de la estructura.

Todas las estructuras deberán ser sometido a pruebas de carga antes de su puesta en servicio, en el caso de puentes y pasarelas, se realizan pruebas estáticas y dinámicas. Las primeras serán siempre obligatorias, las segundas serán preceptivas en aquellas estructuras en las que sea necesario verificar que las vibraciones que se puedan producir no afectarán a la funcionalidad de la obra.

El objeto de la prueba dinámica es obtener información sobre la estructura, más allá de la proporcionada por la prueba de carga estática, determinando ciertos parámetros que identifican las características intrínsecas de la estructura, así como su respuesta bajo excitación externa.

Los resultados de una prueba dinámica pueden estar en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. En general, estos resultados podrán ser:

- Líneas de influencia
- Acelerogramas
- Frecuencias naturales
- Modos de vibración
- Impacto (amplificación dinámica)

- Amortiguamiento

En las pruebas dinámicas se excita la estructura con una aproximación a sus cargas en servicio simuladas con camiones a distintas velocidades. El tren de carga estará formado, en general, por un solo camión circulando a velocidad constante a lo largo del eje longitudinal del puente. Cuando se desee excitar un modo de torsión, dicho vehículo circulará por un lateral del tablero.

En el caso de que se desee evaluar el grado de confort en zonas de uso peatonal del puente, el tren de carga estará formado por una batería de tantos camiones como carriles de circulación tenga la calzada, avanzando con velocidad constante a lo largo del tablero en sentido único.

Para la determinación de las frecuencias propias y del amortiguamiento estructural, podrá disponerse en la calzada un obstáculo transversal a la marcha del camión, siempre que se considere necesario aumentar las vibraciones generadas durante el ensayo. Normalmente se sitúan tabloncillos sobre los que pasa el/los camión/es y simulan un impacto sobre el tablero.

La Dirección General de carreteras indica bajo qué condiciones de excitación se miden los distintos parámetros:

Parámetro medido	Tren de carga	Velocidad del tren de carga	Disposición de obstáculo
Línea de influencia	1 camión	Lenta	No
Frecuencia	1 camión	Media y rápida	Opcional
Amortiguamiento	1 camión	Media y rápida	Opcional
Impacto	1 camión	Lenta, media y rápida	No
Aceleración (confort)	1 ó más camiones	Media y rápida	No

Tabla 1 Condiciones de medida de distintos parámetros en las pruebas dinámicas de carga

En casos especiales, podrá excitarse la estructura mediante elementos mecánicos o hidráulicos (gatos), suelta repentina de peso, acción de frenado, etc.



Figura 11 Excitación con martillo de impacto

Por último, en el caso de pasarelas peatonales, la fuente de excitación empleada para obtener el registro de aceleraciones consistirá en un grupo de personas que efectúan pasadas sucesivas, andando y corriendo, y que avanzan en paralelo a lo largo del tablero. El grupo constará de una persona, de peso medio, por cada metro de ancho de la pasarela.

3.7.2 Vehículos

Los vehículos están sometidos una considerable variedad de esfuerzos vibratorios, por lo que deben ser diseñados para que no entren en resonancia y sean un peligro.

En el caso de vehículos terrestres el propio motor genera más o menos vibraciones dependiendo de su disposición, los motores tricilíndricos son los más desequilibrados frente a los 6 cilindros en línea que sería la configuración naturalmente equilibrada.

El propio firme también genera unas vibraciones, que deben estar alejadas de la propia frecuencia natural del vehículo, debido a las irregularidades del pavimento en el caso de automóviles y las uniones entre carriles en el caso del ferrocarril.



Figura 12 Prueba sobre firme muy ondulado

En el sector ferroviario surgen necesidades específicas de monitorización relacionadas tanto con las infraestructuras como con los vehículos: Monitorización continua y autónoma de cargas de vehículos, manipulación, pérdida de redondez de ruedas, medición a largo plazo en raíles, traviesas y cambios de agujas.

Para la monitorización continua de los vehículos, se desarrollan tecnologías específicas que permiten la monitorización del estado del vehículo de forma continua y de los parámetros de carga de la superestructura mediante puntos de medición en la propia vía, de forma que las mediciones no impiden el tráfico a velocidad normal.

Los raíles, están sometidos a grandes tensiones de forma permanente, debidas al propio tráfico ferroviario, variaciones térmicas diarias que pueden afectar a largo plazo produciendo diferentes tipos de daños. Mediante la monitorización continua de la red ferroviaria es posible extraer la información de dichas perturbaciones, permitiendo estimar los intervalos de servicio y las actuaciones sobre la vía. Fundamentalmente las magnitudes a medir son: fuerzas, tensiones mecánicas y aceleraciones, a partir de éstas se determinan los desplazamientos laterales y longitudinales de la vía y el desplazamiento lateral de las traviesas.

De toda esta información se extrae la medición de cargas sobre la vía durante el paso de los vehículos, valores de carga por eje. El incremento de medidas de seguridad mediante la detección y monitorización continua de factores de riesgo para descarrilamientos y sobrecargas: fuerzas $Y - Q$, estado de carga, fuerza centrífuga, características de rodadura. En su conjunto todos estos sistemas y mediciones inciden directamente en términos económicos optimizando los intervalos de servicio y la vida útil de la infraestructura.

3.8 Instrumentación

3.8.1 Sensores

3.8.1.1 Sensores de velocidad de vibración

Para la medición de los valores absolutos de movimiento, estos sensores se aplican directamente sobre el objeto vibrante. No necesitan un punto de referencia. Se pueden usar en un rango de frecuencia de entre 2–1000 Hz, aunque para las frecuencias más bajas pueden producirse desviaciones en amplitud y fase.

3.8.1.2 Acelerómetros

Un acelerómetro es un dispositivo que mide la vibración o la aceleración del movimiento de una estructura. Para la medida de vibraciones en estructuras el tipo de acelerómetro más utilizado es el piezoeléctrico. La fuerza generada por la vibración o el cambio en el movimiento (aceleración) hará que la masa ejerza una fuerza sobre el cristal piezoeléctrico generando este una carga eléctrica proporcional a la aceleración.

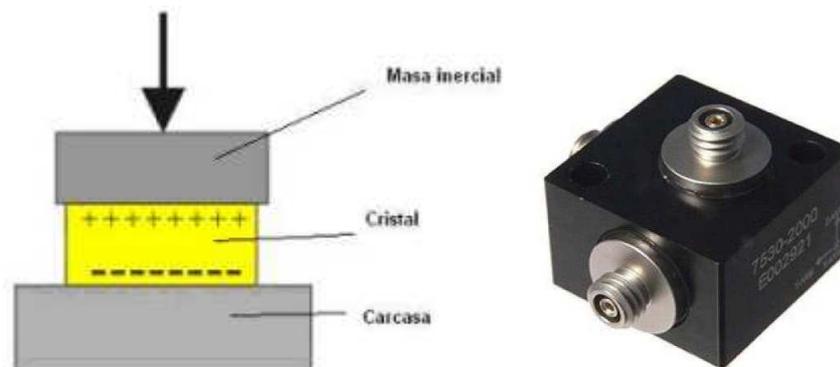


Figura 13 Acelerómetro piezoeléctrico

El hecho de que la carga sea proporcional a la fuerza y que la masa sea constante hace que la carga también sea proporcional a la aceleración.

Estos son sensores ICP, es decir, integran la amplificación de la señal en el propio sensor, lo que ahorra tener que usar equipos adicionales.

3.8.1.3 Vibrómetros láser

El Vibrómetro es un instrumento de medición que se utiliza para medir magnitudes que caracterizan las vibraciones. Este equipo sirve básicamente para el mantenimiento preventivo y predictivo de máquinas de producción.

Es utilizado en las grandes industrias, donde se hace necesario conocer cómo se está comportando una determinada maquinaria y que componentes podrían estar sufriendo desgaste para asegurar su adecuado funcionamiento. Es utilizado para ensayos a altas temperaturas ya que al ser un sensor sin contacto puede estar separado del ambiente excesivamente cálido y así no ver afectada su capacidad de medida. También se utiliza en caso de estructuras muy ligeras en las que el peso de un acelerómetro y su cableado distorsionaría por completo la medida.

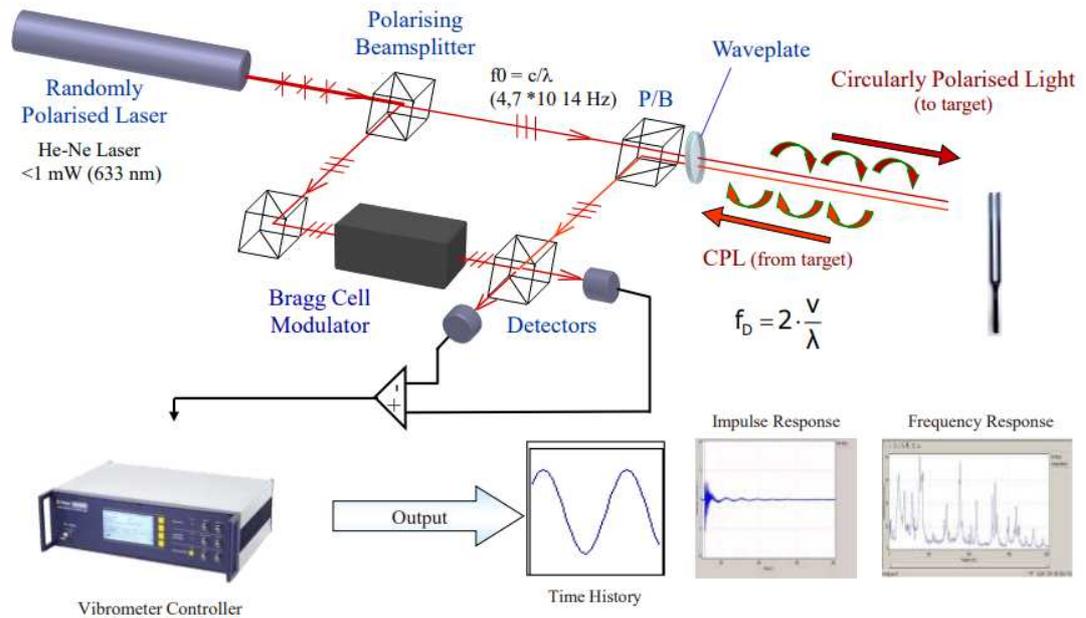


Figura 14 Esquema de funcionamiento de un vibrómetro láser

Un vibrómetro es generalmente un interferómetro láser de dos haces que mide la diferencia de frecuencia (o fase) entre un haz de referencia interno y un haz de prueba. El haz de prueba se dirige al objetivo, y la luz dispersada del objetivo se recoge e interfiere con el haz de referencia en un fotodetector, típicamente un fotodiodo. Debido al efecto Doppler, la frecuencia de la luz láser que se refleja varía si se desplaza la superficie enfocada. Esta variación de la frecuencia o corrimiento Doppler se mide en el vibrómetro con la ayuda de un interferómetro el cuál hace una demodulación del desplazamiento de la frecuencia y transforma ese corrimiento a una señal de voltaje o en una corriente de datos digital.

3.8.1.4 Inclinómetros para mediciones de desplazamiento angular

Para frecuencias de hasta 5Hz, se pueden aplicar sensores que utilizan el principio capacitivo. Para mayor frecuencia los sensores de servoaceleración son más adecuados. La resolución de estos sensores suele estar dentro del rango 0.1–0.001 °.

3.8.2 Excitadores

Las técnicas de excitación se pueden dividir en dos tipos: las que permanecen en contacto con la estructura durante el ensayo y las que no. Las primeras pueden proporcionar una función de excitación continua (sinusoidal, aleatoria, etc.) o transitoria (pulso), y para ello se emplean los excitadores electromecánicos, electromagnéticos y electrohidráulicos. Las otras están sólo en contacto durante un período de tiempo corto, mientras se aplica la excitación, como son el impacto y la excitación estática. Las fuerzas externas que se aplican determinan el contenido en frecuencia de la respuesta.

Hay ciertos parámetros que hay que tener en cuenta antes de elegir una forma de excitación:

- forma y lugar de aplicación.

- control del espectro de frecuencia excitado: es la capacidad de limitar la excitación al rango de frecuencias que interesa estudiar.
- velocidad del ensayo.
- equipos disponibles.
- comportamiento lineal/no lineal de la estructura.

3.8.2.1 *Excitadores impulsivos*

La técnica de excitación para el análisis modal más conocida es el impacto, mediante un excitador tipo martillo. La duración del impacto es normalmente muy corta en comparación con el tiempo que hay que medir la respuesta. Lo realmente importante es la medida de la señal de fuerza durante el impacto, la señal que permanece luego sólo es ruido, que puede ser debido a ruido eléctrico o a la propia vibración del martillo después del impacto. Permite excitar frecuencias hasta 5 - 10 kHz, dependiendo del tamaño del martillo.



Figura 15 Martillo de impacto

3.8.2.2 *Excitador electromecánico*

Son capaces de generar una fuerza de frecuencia variable, aunque tiene una relativamente baja flexibilidad o control en su uso. La magnitud de la fuerza está restringida por las características físicas del excitador, es decir, de la masa en movimiento. Además, se conoce tanto la magnitud como la fuerza aplicada.

Es poco efectivo para excitar bajas frecuencias, aunque la amplitud de la vibración producida llega a ser relativamente alta en comparación con la amplitud del movimiento de la masa del excitador.

3.8.2.3 *Excitador electromagnético*

La frecuencia y la amplitud se controlan de manera separada, dando así mayor flexibilidad de excitación. Pueden excitar frecuencias hasta 30 - 50 kHz. Hay una pequeña diferencia entre la fuerza que ejerce el excitador, que es la que se puede medir, y la que se aplica sobre la estructura. Debido a esto es deseable que el excitador se encuentre lo más próximo posible a la estructura para minimizar esta diferencia.

3.8.2.4 *Excitador electrohidráulico*

Pueden aplicar simultáneamente tanto una carga estática como una carga dinámica. Esto puede ser muy útil para ensayos de estructuras o de materiales cuyas cargas normales de vibración se combinan con una carga estática mayor que puede cambiar sus propiedades dinámicas o incluso su geometría. Pueden producir golpes relativamente fuertes, que permiten la excitación de las estructuras con grandes amplitudes. Operan en un rango de frecuencias relativamente estrecho, ya que sólo llegan a excitar frecuencias de hasta 1 kHz.



Figura 16 Gatos hidráulicos

3.8.3 **Toma y procesado de datos**

En general, el equipo de medición de monitoreo a largo plazo contiene los siguientes componentes:

- Amplificador de señal (amplificador de voltaje, amplificador de carga, amplificador de medición de frecuencia portadora, puente amplificador);
- Filtro antisolapamiento analógico (sintonizado a la frecuencia de corte necesaria);
- Sistema de adquisición de datos de medición con conversión analógico-digital
- Ordenador para análisis de datos para la gestión, procesamiento y almacenamiento
- Almacenamiento de datos (semiconductores, tarjetas SD, discos, memorias USB).
- Fuente de alimentación
- Unidad para transmisión remota de datos con dispositivos de telecomunicaciones (línea telefónica para datos o máquina de fax, teléfono móvil o transceptor para comunicación por satélite).

3.9 Análisis comercial

3.9.1 Sensores

Para obtener los parámetros modales se suelen utilizar acelerómetros debido a que son el sensor más fiable por su sencillez de instalación.

A la hora de seleccionar un acelerómetro es muy importante saber sobre qué estructura se colocará:

- Para el análisis modal de grandes estructuras como puente, pasarelas, torres o aerogeneradores con grandes desplazamientos y bajas aceleraciones habrá que utilizar acelerómetros muy sensibles de 10V/g, capaces de medir una aceleración pequeña de unos $\pm 0,5g$ y que tenga muy alta sensibilidad para trabajar a frecuencias de 0,1 ó 0,2 Hz.
- Para el análisis de estructuras pequeñas de maquinaria industrial o vehículos serán necesarios acelerómetros de menos sensibilidad a bajas frecuencias (que puedan trabajar a más de 10-20 Hz), sensibilidad de 100mV/g y que puedan medir aceleraciones de $\pm 50g$.

3.9.1.1 Acelerómetros

Se consultaron varios proveedores siendo el primero el distribuidor *sensores de medida* (<https://sensores-de-medida.es>) que proporcionó tres modelos diferentes de acelerómetro. El sensor de alta sensibilidad para bajas frecuencias tiene un precio de 1140€ sin incluir los accesorios. El precio del acelerómetro para altas frecuencias es de 420€

U	Referencia	Descripción	Precio Ud.	Dto	Importe
1	MMF-KS903.100	100 mV/g \pm 10%, Triaxial, weight (gr.) 9, output R/1-4-28//U.	1.140,00	0	1.140,00
1	MMF-091-CMR-B711-3	For KS903..., 1/4-28 UNF / Binder 711, 4-pins, male, 2.1 m, \varnothing 3 mm, 120°C.	172,00	0	172,00
1	MMF-034-B711f-BNC	Binder 711, 4-polig, wbl. / 3 x BNC, 0,5 m - Binder 711, 4 pins, female / 3 x BNC, 0.5 m.	79,00	0	79,00
1	MMF-003	Mounting bolt M5x10.	3,00	0	3,00
1	MMF-708	Rare Earth Magnetic Base M5 stud / 3 mm long.	36,00	0	36,00
1	MMF-KS96.100	Miniature Modal Analysis Accelerometer 100mV/g \pm 20 %, Range \pm 500g, Constant current supply 2-20mA, IEPE output, UNF 10-32 axial	420,00	0	420,00
1	MMF-009-UNF-BNC-1,5	UNF 10-32 / BNC, 1,5 m, \varnothing 2,1 mm, 120 °C - low noise, UNF 10-32 / BNC, 1,5 m, \varnothing 2,1 mm, 120 °C.	46,00	0	46,00
1	MMF-021	Mounting bolt M3x8.	3,00	0	3,00
1	MMF-108	Rare earth magnetic clamp with M3 thread, small.	36,00	0	36,00
1	MMF-KB12VD	10000 mV/g \pm 10%*, High sensitivity, weight (gr.) 150, output R/UNF/U.	756,00	0	756,00
1	MMF-009-UNF-UNF-1,5	UNF 10-32 / UNF 10-32, 1,5 m, \varnothing 2,1 mm, 120 °C - low noise, UNF 10-32 / UNF 10-32, 1,5 m, \varnothing 2,1 mm, 120 °C.	48,00	0	48,00
1	MMF-003	Mounting bolt M5x10.	3,00	0	3,00
1	MMF-008	Rare earth magnetic clamp with M5 thread.	36,00	0	36,00
1	MMF-729	Tripod floor plate with M8 hole and adjustable feet.	360,00	0	360,00
		Subtotales:	3.138,00		3.138,00

Tabla 2 Oferta de acelerómetros de sensores de medida

Bruel&Kjaer (<https://www.bksv.com/es-ES>) ofrece en su catálogo sensores de similares características a los anteriores. El precio para los acelerómetros de baja frecuencia es de 1301€.

Qty	Referencia	Descripción	Precio unitario € sin IVA incluido
1	-8340---	Acelerómetro sísmico de 10V/g, rango 0,5g y conector superior MIL-C-5015 TNC de 2 pin	1.301,00
1	UA-1281---	Imán de montaje para acelerómetro, rosca 1/4"-28 UNF	268,00
1	UA-2056---	Conjunto de 10 espárragos ¼-28 UNF (M) a ¼-28 UNF (M) con tope intermedio	373,00

Tabla 3 Oferta acelerómetro de gran sensibilidad y aja frecuencia de B&K

Para acelerómetros de baja sensibilidad y altas frecuencias el precio sin IVA es de 634€.

Qty	Referencia	Descripción	Precio unitario € sin IVA incluido
1	-4534-B-001-	Acelerómetro IEPE con TEDS, 100mV/g, rango amplitud 71g, frecuencial 0,2 Hz a 12,8 kHz, conector superior 10-32UNF, base aislada, 8.6 gramos,	634,00
1	UA-0643---	Imanes 10-32 UNF, UA0642 (paquete de 5 unidades)	485,00
1	UA-2064---	Conjunto de 10 espárragos 10-32 UNF con tope intermedio	166,00

Tabla 4 Oferta acelerómetro de gran sensibilidad y baja frecuencia de B&K

3.9.1.2 Vibrómetros láser

Al existir la posibilidad de medir vibraciones sin contacto, se consideró oportuno consultar los precios de uno de estos sensores. Debido a que usan tecnología láser su precio es considerablemente más elevado que un equipo completo de medición con acelerómetros piezoeléctricos.

Consultando precios, el grupo Álava ofrece por 116800€ un vibrómetro láser de escaneo sin contar extras que se puedan añadir.

PSV-500-B Scanning Vibrometer

116680 €

EU Machinery Directive applies to one or more options of this order item!
- PSV-G-500 Distance Sensor (PSV-029) only available via GEO-B or GEO-B-XTRA Geometry Package (PKG-013) -

Figura 17 Presupuesto vibrómetro láser

3.9.1.3 Martillos de impacto

El principal fabricante de estos actuadores es Bruel&Kjaer, se pidieron precios de dos modelos para la excitación de distintos tamaños de estructura.

Qty	Referencia	Descripción	Precio unitario € sin IVA incluido
1	-8206--003-	Martillo de impactos 1,1 mV/N, cable incluido	1.820,00
1	-8208---	Martillo de impactos de 0,227 mV/N	3.506,00

Tabla 5 Oferta de martillos de impacto de B&K

3.10 Conclusiones del apartado

El análisis modal es actualmente uno de los mejores métodos para la monitorización del estado de una estructura. Permite conocer parámetros críticos, como las frecuencias naturales, de la estructura tanto durante la fase de proyección mediante simulaciones, durante la construcción y durante la puesta en servicio y su vida útil.

Los sensores utilizados presentan una serie de ventajas: tienen electrónica integrada, lo que ahorra tener que añadir amplificadores de señal, instalación sencilla, no se ve alterada la medida por cambios de temperatura ambiente normales y permiten cablear distancias de hasta 100m.

En caso de necesitar medidas sin contacto es posible realizarlas, aunque el precio del equipo se dispara.

Por último, se resume los precios de los sensores y equipos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Fabricante (distribuidor)	Modelo	Precio web
Acelerómetros baja frecuencia		
Sensing	MMF KS 903 Triaxial	1.140,00 €
Bruel&Kjaer	8340	1.301,00 €
Fabricante	Descripción	Precio web
Accesorios para Acelerómetros baja frecuencia		
Bruel&Kjaer	Imán de montaje para acelerómetro, rosca 1/4"-28 UNF	268,00 €
Bruel&Kjaer	Conjunto de 10 espárragos ¼-28 UNF (M) a ¼-28 UNF (M) con tope intermedio	373,00 €
Fabricante (distribuidor)	Modelo	Precio web
Acelerómetros alta frecuencia		
Rion Tech	AKF392	195,66 €
Honeywell*	MA15	462,46 €
Sensing	MMF KS 96 Axial	420,00 €
Bruel&Kjaer	4534-B-001	684,00 €
Fabricante	Descripción	Precio web
Accesorios para Acelerómetros alta frecuencia		
Bruel&Kjaer	Imanes 10-32 UNF, UA0642 (paquete de 5 unidades)	485,00 €
Bruel&Kjaer	Conjunto de 10 espárragos 10-32 UNF con tope intermedio	166,00 €

Fabricante (distribuidor)	Modelo	Precio web
Martillo de impacto		
Bruel&Kjaer	8206	1.820,00 €
Bruel&Kjaer	8208	3.506,00 €
Fabricante (distribuidor)	Modelo	Precio web
Software		
Bruel&Kjaer	-	>1200,00 €
Fabricante (distribuidor)	Modelo	Precio web
Vibrómetro láser de escaneo		
PSV (Grupo Álava)	500	116.680,00 €

4. Métodos basados en deformaciones: Galgas extensométricas

4.1 Descripción general

Una galga extensométrica es un sensor que permite medir deformaciones en un elemento gracias efecto piezorresistivo.

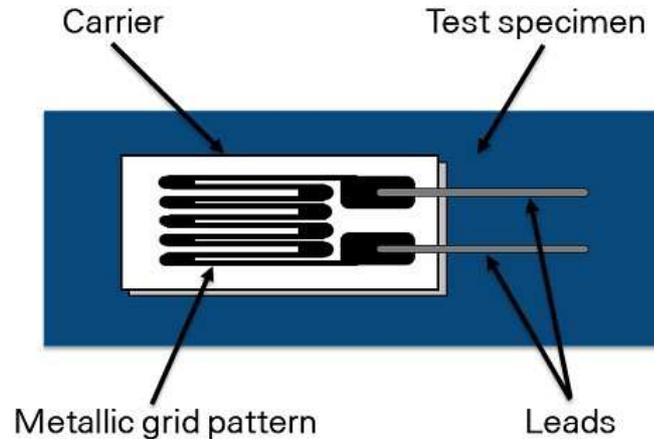


Figura 18 Galga extensométrica

Generalmente una galga consta de una lámina adhesiva que permite su colocación en el elemento y además actúa como aislante para impedir que cierre el circuito con el elemento a medir

4.2 Funcionamiento

Como se mencionó anteriormente las galgas se basan en el efecto piezorresistivo, dicho efecto relaciona el cambio de resistencia con la deformación:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Ecuación 46

La resistividad se mantiene constante porque depende del material y según la ley de Poisson al aumentarla longitud L , disminuye la sección S con lo que la resistencia aumenta.

Un parámetro importante a tener en cuenta es el factor de galga o *gage factor* (GF).

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$$

Ecuación 47

Como las variaciones de resistencia que se producen son muy pequeñas serían muy difíciles de detectar, por ello, se utiliza la arquitectura del puente de Wheatstone (ver Figura 20) a modo de amplificador.

$$V_0 = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] * V_{EX}$$

Ecuación 48

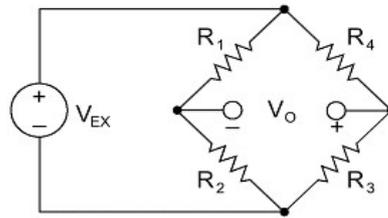


Figura 19 Puente de Wheatstone

Según el tipo de esfuerzo que queramos medir o la precisión que necesitemos habrá que conectarlas en cuarto de puente, medio puente o puente completo

Cuarto de puente: permite medir la deformación para tensiones normales y para esfuerzos a flexión

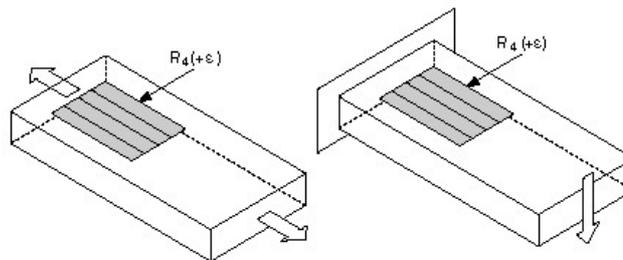


Figura 20 Colocación de galgas en cuarto de puente

Como la temperatura puede afectar a la medida de la galga, se puede situar otra galga en perpendicular aislada del esfuerzo mecánico para que solo mida la deformación por el cambio de temperatura. Entonces por diferencia entre ambas medidas se puede obtener la deformación real debida a los esfuerzos.

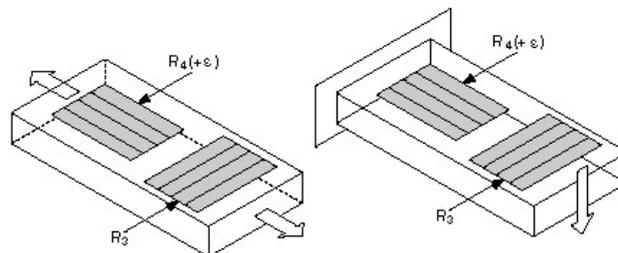


Figura 21 Colocación de galgas en cuarto de puente con compensación de temperatura

Conexión en medio puente: Permite medir las deformaciones axiales y transversales situando una galga en la dirección del esfuerzo (mediría deformaciones longitudinales) y otra en perpendicular (mediría las deformaciones transversales).

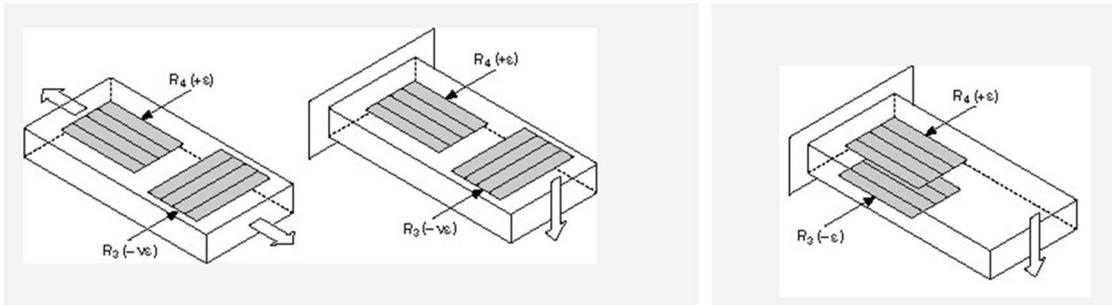


Figura 22 Conexión en medio puente

Conexión puente completo: Permite medir las deformaciones amplificando el doble la tensión de salida respecto al cuarto de puente. Se usan 4 galgas y es la conexión que más precisión da. Además, como se verá más adelante permite compensar los efectos de la temperatura.

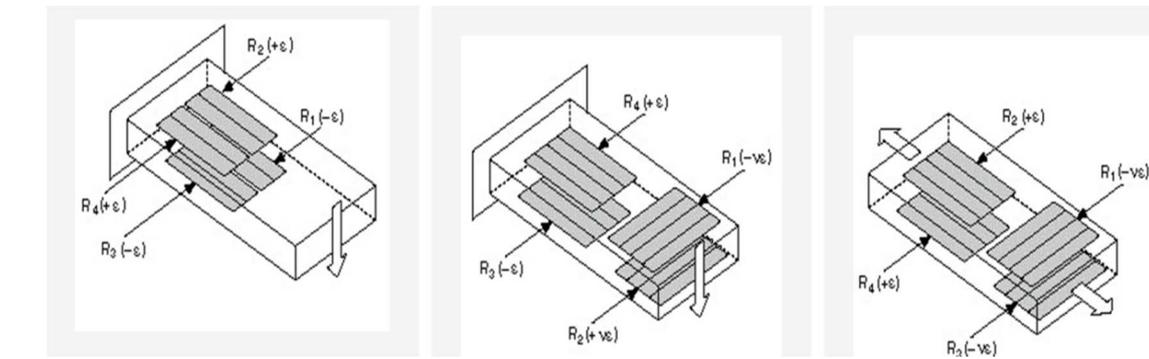


Figura 23 Colocación de galgas en puente completo

4.2.1 Clasificación

Según su material de fabricación pueden ser:

Metálicas: Pueden estar fabricadas de materiales diversos como Constantán (Cu55Ni45), nicromo ($\text{Ni}_{80}\text{Cr}_{20}$), isoelastic ($\text{Fe}_{56}\text{Ni}_{36}\text{Cr}_8$) y PT479 (Platino-Tungsteno)

Sus ventajas e inconvenientes se resumen a continuación en la tabla:

Ventajas	Desventajas
No se ven afectadas por golpes y vibraciones	Influencia de la temperatura
Buena exactitud	Necesario compensar el efecto de la T_a
Buena repetitibilidad	Requiere fuente de tensión externa
Amplio rango de medida	Requiere tratamiento de la señal
Buena estabilidad	-
Posibilidad de compensar los efectos de la temperatura	-

Tabla 6 Ventajas y desventajas de las galgas metálicas

Semiconductoras: Fabricadas de silicio (normalmente) o germanio (raramente por coste).

Presentan un factor de galga alto en comparación con las metálicas con lo que es más fácil detectar con ellas las pequeñas variaciones de resistencia que se dan.

Actualmente su presencia en el mercado es anecdótica.

Sus ventajas y desventajas se resumen en la tabla:

Ventajas	Desventajas
GF superior al de las galgas metálicas	Influencia de la temperatura
Mayor vida útil	Coste (Ge)
Poca histéresis	

Tabla 7 Ventajas y desventajas de las galgas semiconductoras

4.3 Aplicaciones

Las aplicaciones de las galgas extensométricas son casi innumerables, pero su aplicación más directa es en aquellas situaciones en las que se requiere la medida de tensiones y deformaciones en estructuras tales como Aviones, Trenes, Puentes, Grúas, Hormigón, Ejes, etc. Generalmente en este tipo de estructuras, el montaje y la conexión son bastante complicados, por lo que se hace recomendable el recurrir a especialistas en este tipo de mediciones con galgas

Según la aplicación de la medición, destacamos las siguientes:

- **Construcción:** para comprobar el asentamiento del hormigón al tiempo de ser construido, también se utilizan las galgas durante la fase de construcción de puentes o en el laboratorio si se trata de algún puente experimental (a escala real o reducida). También se usan para complementar datos del análisis modal.



Figura 24 Ensayo en laboratorio de viga polimérica para puente

- **Aviación:** Fijando galgas extensométricas a los componentes estructurales que soportan la carga para medir las tensiones y deformaciones en puntos críticos como puedan ser el tren de aterrizaje o las alas.



Figura 25 Representación de la situación de galgas en un avión

Las galgas están conectadas en puente de Wheatstone y sus áreas de aplicación incluyen unidades de acondicionamiento de señal a bordo, fuentes de alimentación de excitación y la telemetría necesaria para leer las mediciones en el sitio.

- Industria: Ensayos tanto destructivos como no destructivos de maquinaria industrial, motores, chasis de vehículos, probetas de nuevos materiales (ensayos de tracción, torsión...)

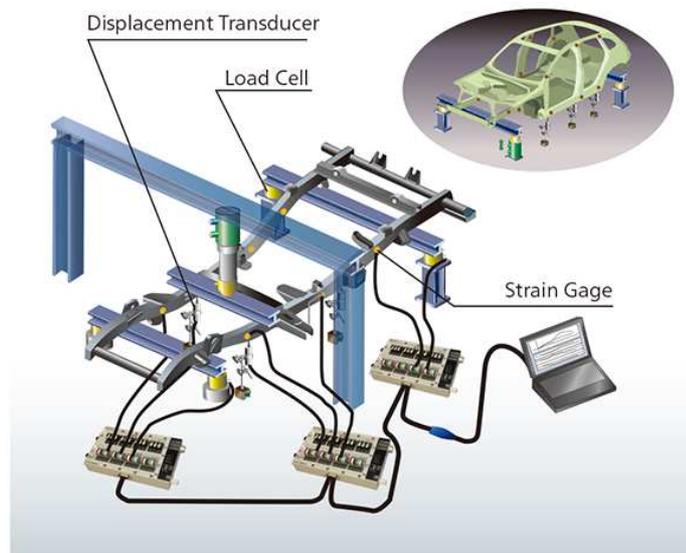


Figura 26 Ensayo sobre chasis de vehículo

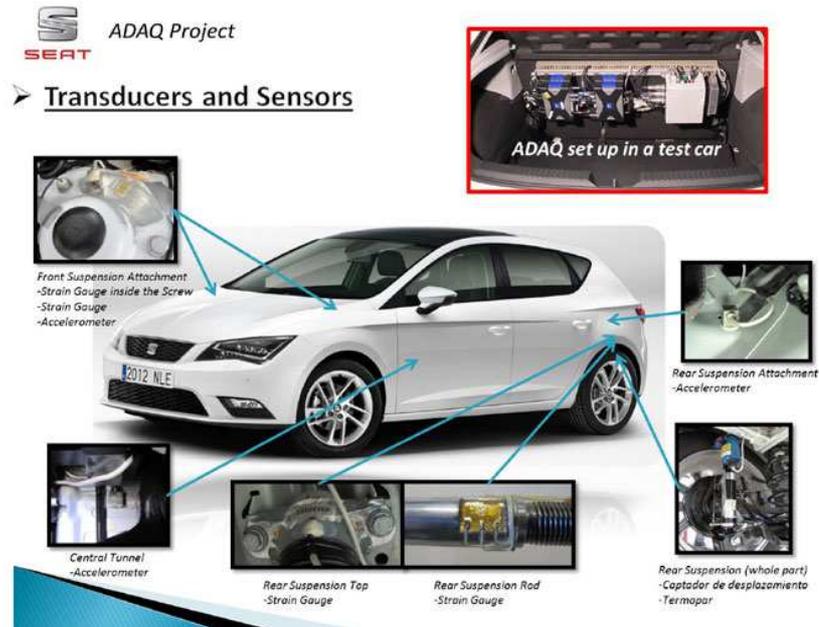


Figura 27 Uso de galgas en ensayo no destructivo



Figura 28 Crash test

- Robótica: Medición del esfuerzo de agarre de un robot.
- Vibraciones en máquinas, como se comentó en el capítulo 2 complementan la información que nos da el análisis modal.
- Medición de pesos: Se utilizan combinaciones de galgas y resistencias variables con la temperatura para construir células de carga. Las células de carga extensométricas convierten la carga que actúa sobre ellas en señales eléctricas. Los propios medidores están unidos a una viga o elemento estructural que se deforma cuando se le aplica un peso. En la mayoría de los casos, se utilizan cuatro medidores de deformación para obtener la máxima

sensibilidad y compensación de temperatura. Dos de los medidores están por lo general en tensión, y dos en compresión, y se conectan con ajustes de compensación. Cuando se aplica un peso, la tensión cambia la resistencia eléctrica de los medidores en proporción a la carga.

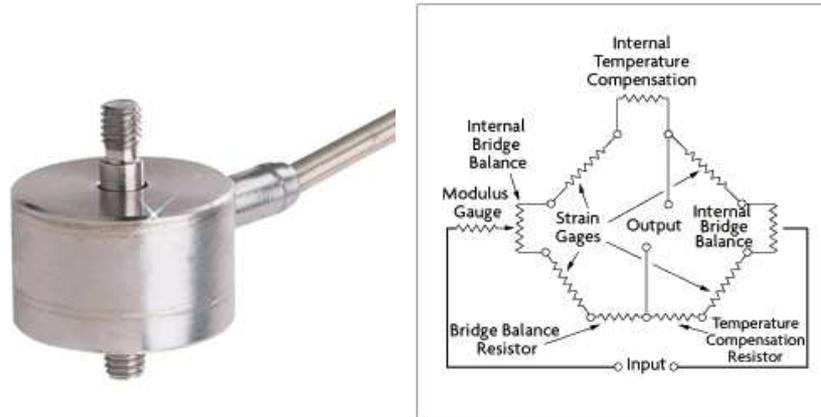


Figura 29 Célula de carga

4.4 Consideraciones de uso

- Limpiar y pulir la superficie sobre la que se pondrá la galga
- Situar la galga en la misma dirección del esfuerzo
- Correcta elección y aplicación del adhesivo ya que una mala aplicación llevará consigo una mala transmisión de esfuerzos
- Uso de masillas u otros materiales para prevenir corrosión u otros daños
- No sobrepasar el límite elástico de la galga

4.5 Control del ruido en las mediciones con galgas

Como se comentó anteriormente, las galgas eléctricas son sensibles a los campos electromagnéticos, aunque existiendo opciones como la fibra óptica pueda parecer que es complicarse la vida, lo cierto es que hoy en día no es posible su uso indiscriminado por su alto precio.

Por ruido se entiende toda componente de tensión o intensidad indeseada que se superpone con la componente de señal que se procesa o que interfiere con el proceso de medida.

El ruido de un sistema se puede clasificar en uno de los dos siguientes grupos:

- Ruido interno o inherente: que corresponden al que se genera en los dispositivos electrónicos como consecuencia de su naturaleza física (ruido

térmico, ruido por cuantización de las cargas, ruido de semiconductor, etc.). El ruido inherente es de naturaleza aleatoria.

- Ruido externo o interferencias: que corresponde al que se genera en un punto del sistema como consecuencia de acoplamiento eléctrico o magnético con otro punto del propio sistema, o con otros sistemas naturales (tormentas, etc.) o contruidos por el hombre (motores, equipos, etc.). El ruido de interferencia puede ser periódico, intermitente, o aleatorio. Normalmente se reduce, minimizando el acoplamiento eléctrico o electromagnético, bien a través de blindajes, o bien, con la reorientación adecuada de los diferentes componentes y conexiones.

El ruido se puede abordar desde dos puntos de vista,

- Mediante métodos que tratan de reducir el ruido en sus fuentes y en su propagación, como son las técnicas de cableado, blindaje, conexión a tierra o diseño de dispositivos de bajo ruido. Estas técnicas son las óptimas ya que no degradan las prestaciones del sistema, aunque su aplicación no siempre es eficaz o posible.
- Mediante métodos de filtrado y promediado de la señal, para amortiguar el nivel de ruido frente a la señal que se procesa. Estas técnicas suelen ser de aplicación más general y efectiva, pero suelen reducir las prestaciones (por ejemplo, anchura de banda) del sistema.

En primer lugar, se identificarán las fuentes causantes del ruido en las mediciones con galgas:

- Líneas de corriente alterna
- Motores
- Transformadores
- Relés
- Generadores
- Equipos de soldadura de arco voltaico
- Equipos vibratorios
- Lámparas de descarga, como los tubos fluorescentes o de neón,
- Equipos de radio
- Tormentas eléctricas

Esto nos lleva a clasificar las interferencias producidas en las galgas en dos tipos: las causadas por campos electrostáticos y los magnéticos.

4.5.1 Reducción del ruido electrostático

Los campos electrostáticos se deben a la presencia de una diferencia de potencial, haya o no intensidad. Y se producen por el llamado acoplamiento capacitivo. Es el que se produce entre conductores próximos que están sometidos a potenciales que varían en el tiempo y que por ello dan lugar a campos eléctricos variables que afectan a aquellos otros que se encuentran en su entorno.

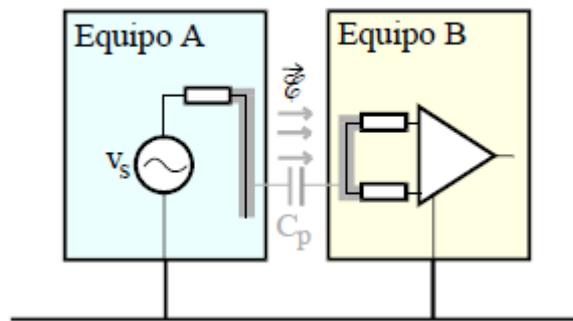


Figura 30 Acoplamiento capacitivo entre dos equipos eléctricos

Las interferencias de tipo eléctrico se modelan desde el punto de vista de un circuito como las interferencias que se producen entre dos sistemas como consecuencia de las capacidades parásitas que existen entre los conductores que pertenecen a cada uno de ellos.

Entre dos conductores próximos existe una capacidad parásita que es proporcional al área de los conductores e inversamente proporcional a la distancia entre ellos:

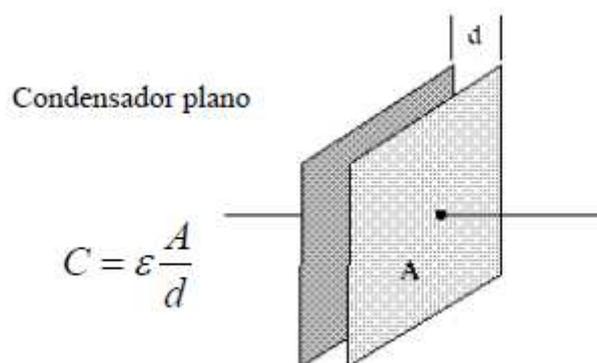


Figura 31 Representación de un condensador

De manera cualitativa se puede demostrar cual es la tensión inducida de un circuito 1 a un circuito 2 debida al acoplamiento capacitivo.

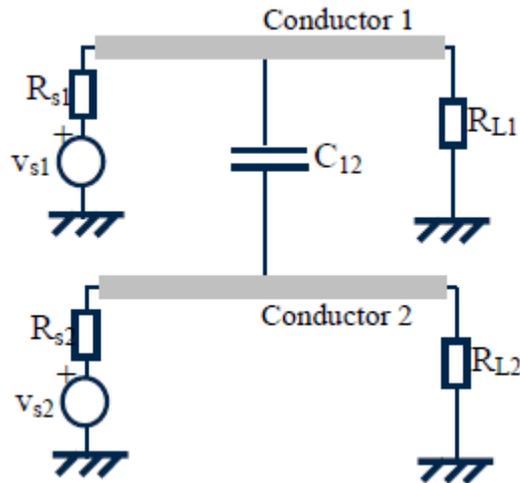


Figura 32 Acoplamiento entre circuitos

$$V_{RL2} = V_{RL1} \frac{(R_{L2} \parallel R_{s2})}{(R_{L2} \parallel R_{s2}) + (j\omega C_{12})^{-1}} \quad \text{Ecuación 49}$$

en el caso de que $R_{L2} \parallel R_{s2} \ll 1/\omega C$,

$$V_{RL2} = j\omega(R_{L2} \parallel R_{s2})C_{12}V_{RL1} \quad \text{Ecuación 50}$$

La manera más simple y efectiva es recubrir el conductor con un recubrimiento o blindaje que actúe a modo de jaula de Faraday. Es de vital importancia la conexión de la jaula a tierra en algún punto para evitar el acoplamiento capacitivo del conductor y la propia jaula.

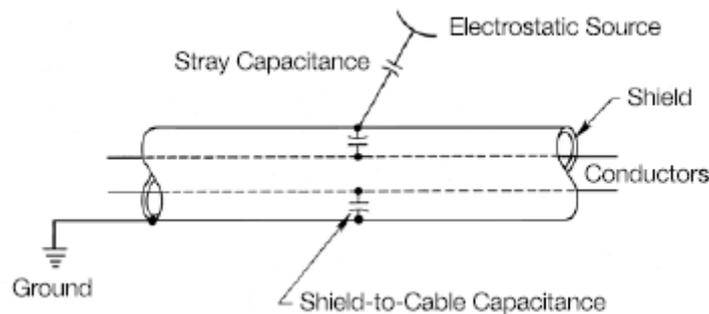


Figura 33 Jaula de Faraday para eliminar ruido electrostático

Esto es válido para conductores no muy largos y sometidos a ruidos de menos de 20kHz.

Otra solución sería disminuir la frecuencia de la fuente, aunque generalmente no es posible.

También se puede mitigar el problema reduciendo la impedancia del circuito afectado. Ya sea por disminución de la resistencia de carga R_{L2} o de la resistencia de

Para frecuencias mayores es necesario conectar a tierra en varios puntos de la jaula, ya que si no se hace puede empezar la corriente a atravesar el recubrimiento y agravar el problema del ruido. Por tanto, se conectará siempre a tierra al principio y final de la jaula y, dependiendo de su longitud, en puntos intermedios.

4.5.2 Reducción del ruido debido a campos magnéticos

La interferencia magnética se produce cuando el campo magnético generado por el circuito fuente, atraviesa un bucle cerrado del circuito afectado. Esta interferencia depende del flujo de campo que atraviesa el bucle del segundo circuito, y esto es función del ángulo entre el campo y el plano del bucle y del área de este.

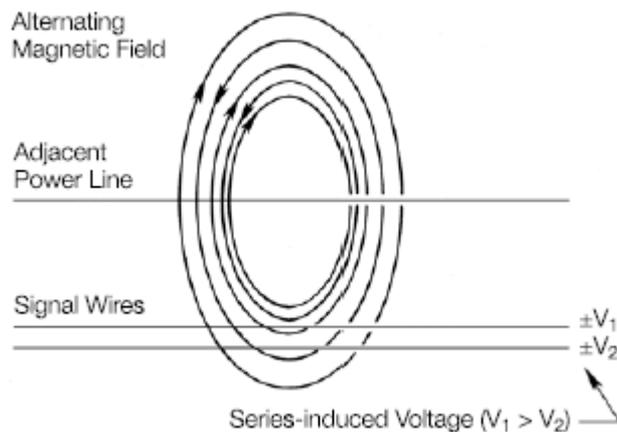


Figura 34 Campos magnéticos causantes del ruido

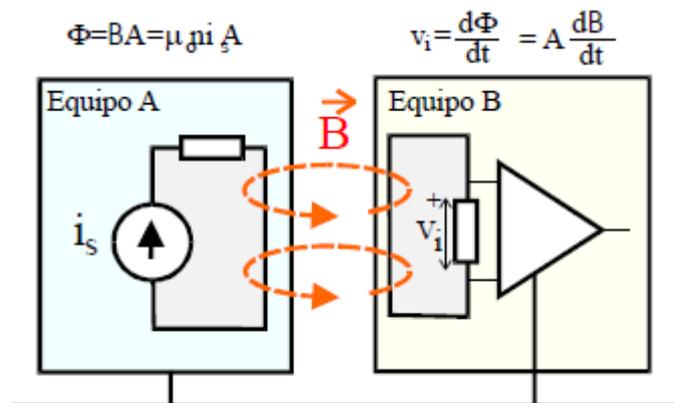


Figura 35 Inducción entre dos circuitos

La inducción entre ambos circuitos es la siguiente:

$$L_1 = k_1 \mu A_1 \quad L_2 = k_2 \mu A_2 \quad M = k_{12} \sqrt{L_1 L_2}$$

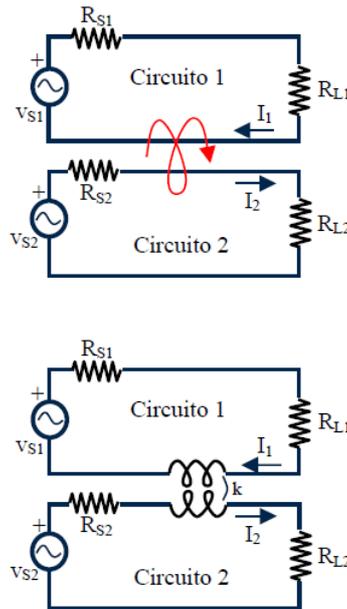


Figura 36 Acoplamiento magnético entre circuitos

Con los valores de la inducción se puede obtener la tensión inducida por el circuito 1 en el circuito 2:

$$V_2 = V_{s2} + j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1$$

Ecuación 52

El ruido magnético no es posible eliminarlo, más que separando el conductor de la fuente del campo magnético, pero si es posible compensarlo logrando que el ruido que llega a cada entrada del amplificador sea igual y contrario.

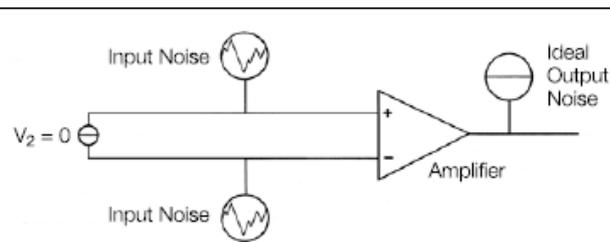


Figura 37 Compensación de ruido

Para lograrlo que se hace es un trenzado de los conductores. Además de esto hay que minimizar el área de la galga y la distancia que hay desde el conductor hasta la propia galga. En definitiva, mantener la mínima longitud de conductor expuesto a la influencia del campo magnético y los trenzados siempre simétricos.

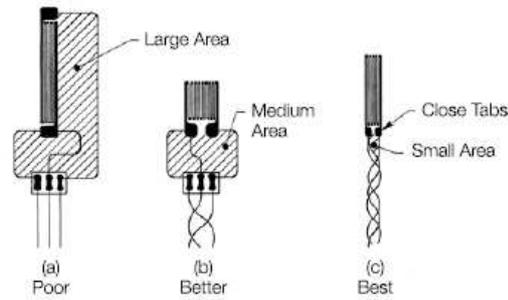


Figure 5. Gage selection and wiring technique.

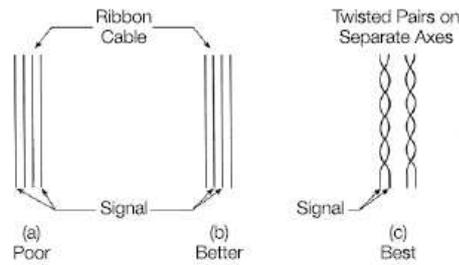


Figure 6. Cable comparison.

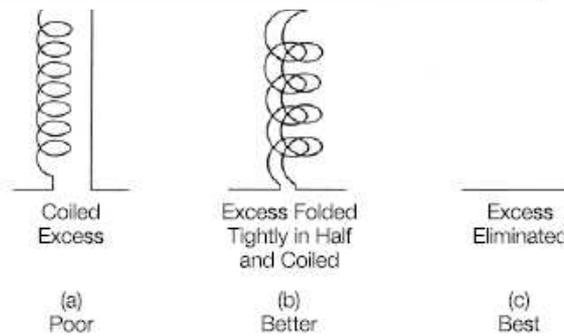


Figure 7. Handling excess cable.

Figura 38 Trenzado de cable para compensación de ruido debido a campos magnéticos

La utilización de un cable coaxial también elimina el acoplamiento magnético, no por el apantallamiento que supone, sino por la simetría de los conductores evita la presencia de bucles.

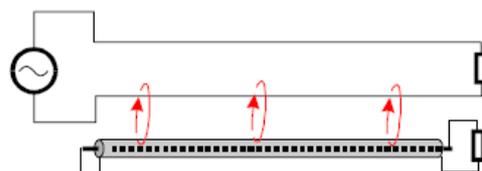


Figura 39 Cable coaxial

Algunos fabricantes ofrecen configuraciones de galgas que mitigan o cancelan el ruido debido a campos electromagnéticos.

Summary



The gage element is made of a special alloy which provides less magneto-resistant effect; also, the shape is designed to eliminate induction. Thus, the KFNB series foil strain gages can accurately measure strain under AC magnetic environments.

[Click here for the \[Strain Gages with Pre-attached Lead Cables\]](#)

Figura 40 Galgas para compensación de ruido

4.6 Instrumentación y accesorios

En este punto hay variaciones en función de donde se quiera medir, ya que no será lo mismo tomar datos en una obra o una estructura en el exterior o en cambio medir en un laboratorio.

En cualquier caso, será necesario, además de las propias galgas, una fuente de alimentación que sirva tanto para excitar el puente de Wheatstone como para alimentar al resto de instrumentos, un acondicionador de señal que amplifique y elimine el ruido de la medida y un equipo de toma de datos, bien en tiempo real vía Ethernet o cada cierto tiempo vía USB.

Además, será necesario un software que nos permita leer y procesar los datos.

Por último y debido a que estos aparatos de medida con el uso se descalibran o pierden precisión será necesario utilizar calibradores.

4.7 Análisis comercial

El mercado de las galgas es bastante extenso ya que cada fabricante trabaja con distintos tipos de galga según su resistencia y tamaño. Se compararán galgas con el mismo tamaño y resistencia para hacerse una idea general de como de caro o barato es un fabricante o distribuidor. Se compararán también distintos formatos y materiales como son las bandas extensométricas lineales y rosetas, o materiales conductores y semiconductores.

Se consultaron desde las tiendas de los fabricantes, pasando por los distribuidores de equipos de instrumentación hasta las grandes plataformas de compra tipo Amazon o AliExpress.

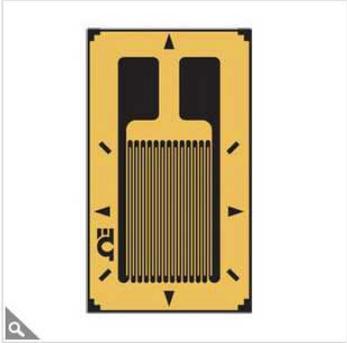
4.7.1 Galgas uniaxiales

4.7.1.1 Webs de fabricantes

El fabricante Omega ofrece en su página web toda la información de sus productos sin necesidad de contactar con ellos.

Venden en lotes de 10 unidades y por ejemplo para las galgas de 6mm y 120Ω cuestan 83€ y las de 5mm y 350Ω serían 74€ (ver Figura 41).

Serie SGD



Número de pieza	Descripción	RoHS	Cant.
Encapsulado con goma para conductores coincidentes Acero (PRECIO POR PAQUETE DE 10)			
SGD-1.5/120-LY11 €65.00	1,5 mm rejilla, 120 ohmios	✓	0
SGD-2/350-LY11 €65.00	2 mm rejilla, 350 ohmios	✓	0
SGD-2D/350-LY11 €65.00	2 mm rejilla, 350 ohms, patrón grande	✓	0
SGD-3/120-LY11 €65.00	3 mm rejilla, 120 ohmios	✓	0
SGD-3S/120-LY11 €65.00	3 mm de malla, 120 ohmios, Diseño S	✓	0
Envío Rápido			
SGD-3/350-LY11 €65.00	3 mm rejilla, 350 ohmios	✓	0
SGD-4/120-LY11 €67.00	4 mm rejilla, 120 ohmios	✓	0
SGD-5/350-LY11	5 mm rejilla, 350 ohmios	✓	0

SGD-5/350-LY11 €74.00	5 mm rejilla, 350 ohmios	✓	0
--------------------------	--------------------------	---	---

Figura 41 Galgas del fabricante Omega y sus precios

El fabricante y distribuidor de sus propios productos, así como de otros fabricantes, RS Pro ofrece las galgas de 6mm y 350Ω a 9,62€/ud comprándolas individualmente y con un descuento de 60 cent/ud comprando lotes de más de 10 uds.

HBM es otro de los grandes fabricantes y distribuidores de galgas y otros equipos de medición y toma de datos. En su tienda online venden las galgas en lo que ellos llaman PAKs (10 uds) cuyos precios, para el tamaño y resistencia de galga que se está comparando es de 85,12€ por cada PAK de 6/120 y 88,06 para el de 6/350 (ver Figura 42).

Referencia	Cantidad	Unidad	Longitud	Anchura	Alcance	Peso	Precio Unitario	Precio Total	Acciones	Estado
1-LY11-6/120 Banda Ext. 6/120 LY11	120	6	2,7	6	6		89,60 EUR	85,12 EUR	1 PAK	En stock
1-LY11-6/120A Banda Ext. 6/120A LY11	120	6	2,7	13	6		95,80 EUR	91,01 EUR	1 PAK	En stock
1-LY11-6/350 Banda Ext. 6/350 LY11	350	6	2,8	13	6		92,70 EUR	88,06 EUR	1 PAK	En stock

Figura 42 Galgas de HBM

4.7.1.2 Grandes plataformas de compra

La irrupción de plataformas como eBay, Aliexpress, etc durante los últimos años ha ampliado mucho las posibilidades de conseguir de manera rápida y económica instrumentación de medida.

4.7.1.2.1 Amazon

En primer lugar, se miró Amazon, es la plataforma que menos variedad ofrece en este campo. En la Figura 43 se puede ver una muestra de las galgas de 120Ω que se ofrecen en la plataforma



High Precision Resistance Strain Gauge

Comidox BF120-3AA 120Ω 120ohm - Calibrador de tensión de lámina de alta precisión para la pila de carga del sensor de presión de Comidox

★★★★★ 2 calificaciones

Precio: US\$ 5.99 + US\$ 6.11 envío

Devoluciones de 30 días en la mayoría de los casos

- Alta precisión, buena estabilidad y fácil de usar, apto para sensores de 0,02 niveles. (El error de salida está en el rango de más o menos 0,02 a escala completa).
- Sustrato: fenólico modificado; alambre de rejilla: constantán (aleación de cobre que contiene 40% níquel, 1,5% manganesa), estructura totalmente cerrada, autocompensación de temperatura simultánea y autocompensación de arrugas.
- El medidor de tensión de resistencia se puede utilizar como componente sensible y directamente para medir la tensión de la parte probada;
- También se puede utilizar como un elemento de conversión, y el sensor está construido por un elemento elástico para la medición indirecta de cualquier otra cantidad física que pueda convertirse en tensión del elemento elástico.

Figura 43 Galgas de 120 Ω en Amazon

Dentro de los productos ofertados encontramos galgas de 350Ω en lotes de 5 uds. a 92€ con las siguientes prestaciones:



Haz clic en la imagen para obtener una vista ampliada

BF350-3AA BF350 - Calibre de tensión de precisión para sensor de presión/celda de carga BF-350 con cables, 100 unidades

de Paialu
 ★★★★★ 1 calificación

Precio: US\$ 88.53 + US\$2.99 de envío

Item is returnable in 30 days and restocking fee may apply

- El artículo es de buena calidad. Peso de referencia del paquete: 0.0 lbs.
- Comprobaremos el producto antes de enviarlo. Tiempo de entrega estimado: 6-24 días (seguro)----- Proporcionamos servicio de envío urgente: 2-7 días. (sin incluir el tiempo de preparación). Si el importe del pedido es superior a 120 USD, utilizaremos el servicio de envío urgente de forma gratuita.
- Somos un distribuidor profesional de componentes electrónicos. También vendemos otros tipos de productos. Basta con buscar el número de modelo en nuestra tienda.
- Hacemos todo lo posible para proporcionar a los clientes un servicio satisfactorio. Cualquier pregunta, por favor no dude en ponerse en contacto conmigo.

US\$ 88.53

+ US\$2.99 de envío

Este artículo se envía a Spain. Obtenlo antes de viernes, el 3 de abril - lunes, el 13 de abril Elige esa fecha al finalizar la compra. Debido a un aumento en la demanda, hemos reducido temporalmente la selección de productos disponibles para entrega en tu región. Estamos trabajando en mejorar la disponibilidad de la selección lo antes posible.

Disponible.

Cantidad: 1

US\$ 88.53 + US\$2.99 de envío

 Agregar al Carrito

 Comprar ahora

Información de producto

Detalles técnicos

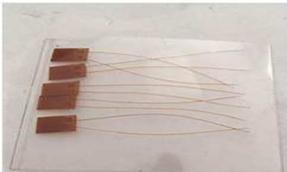
Marca	Desconocido
Modelo	DYHP-UK10-160819-2279
Número de modelo del producto	DYHP-UK10-160819-2279
Número de producto	DYHP-UK10-160819-2279

Descripción del producto

Este producto se compone de modificado fenólico sustratos, hecho de lámina de cobre, sellado y puede darse cuenta de compensación de temperatura y Creep propio self-compensating simultáneamente alta precisión, buena estabilidad, fácil de usar, apto para 0,02 sensor de nivel de resistencia: 350 +/-0.1 Ω ξ coeficiente de sensibilidad: 2.0 - 2.20 precisión nominal: 2,11 +/-1% tensión límite: 2,0% el tamaño: 7,4 mm * 4,4 mm monolítico sensible puerta Tamaño: 3.2 * 1.6 mm Rango de temperatura de funcionamiento: -30 ~ + 80 ^\circ C el paquete incluye: 5 x Resistencia de alta precisión calibrador de tensión

Figura 44 Galgas de 350 en Amazon

Existen dentro de Amazon, opciones más económicas, pero en su descripción lo único que incluyen es el color de la galga, con lo que se supondrá que sus prestaciones serán más bien malas.

Pasa el ratón por encima de la imagen para ampliarla

5 medidores de tensión de resistencia de presión de precisión, 350 ohmios BF350-3AA 7.3mm * 4.2mm rojo de MachinYeser

Precio: 5,99 €
 Precio final del producto

Promoción disponible. 1 promoción

- Fácil instalación, montaje sencillo.
- Resistente al desgaste, mano de obra fina, se puede utilizar durante mucho tiempo, fácil de usar.
-
-
-

Especificaciones para este producto

Código UNSPSC	27111800
---------------	----------

Figura 45 Muestra de galgas en Amazon

4.7.1.2.2 eBay

En segundo lugar, se miró eBay, aquí hay bastante variedad de productos, teniendo los accesorios para las galgas bastante presencia. En general hay bastante presencia de productos chinos.

Se pueden encontrar lotes de 5 galgas de 120Ω por aproximadamente 2,70€



Figura 46 Muestra de galgas en eBay

Se pueden encontrar lotes de 20 galgas de 350Ω por 6,60€ y como el anterior caso, el vendedor no proporciona mucha información sobre el producto



Figura 47 Muestra de galgas de 350 en eBay

También en eBay se puede encontrar la conexión de cuatro galgas de 1000 en puente completo por 3,48€.

1000 Ohm Full-bridge Strain Gauge for Analog Sensor

Estado: **Nuevo**
Cantidad: Más de 10 disponibles
14 vendidos

3,48 EUR

¡Cómpralo ya!

Añadir a la cesta

Hacer oferta

Plazo de devolución: 30 día(s) Envío gratuito

Garantía al cliente de eBay

- Servicio de Atención al cliente por teléfono, chat, email.
- Reembolso si no recibes lo que habías pedido y pagas con PayPal o una tarjeta de crédito procesada con PayPal.
- Gestión simplificada de tus devoluciones.

Ver términos y condiciones. Tus derechos como consumidor no se ven afectados.

Información del vendedor
2.67745 (1472 ⭐)
99,4% Votos positivos

Guardar este vendedor
Ver otros artículos

Figura 48 Puente completo de galgas

En este caso el vendedor sí que proporciona una pequeña ficha técnica del producto, como se muestra en la *Tabla 8 Especificaciones de las galgas*.

Specification:

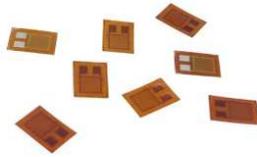
	A	B	C	D
1	Size	Basal size	mm	9.6 * 8.2mm
2		Wire grid size	mm	6.5 * 6.5mm
3	The basal material			Phenolic-epoxy
4	Sensitive to grid material			Imported Evans
5	Sensitive coefficient		mV/V	2.1 ± 1%
6	Lead materials (enameled wire)			Insulation enameled wire
7	Lead length		mm	30 ± 2
8	Resistance	The nominal value of tolerance	Ω	1000 ± 3Ω
9		The average deviation	Ω	< 0.5Ω
10	The use of temperature			常温 (-30℃~+60℃)
11	Sensitivity coefficient and dispersion			2.0 ± 1%
12	Heat output	The coefficient of heat output	um/m/℃	< 2
13		Scores of average heat output	± um/m	< 30
14	Greenhouse insulation resistance		MΩ	10000
15	Greenhouse strain limit		um/m	20000
16	Mechanical lag		um/m	1.2

Tabla 8 Especificaciones de las galgas

4.7.1.2.3 AliExpress

Se buscó también por la plataforma AliExpress, que tiene abundante material de fabricación china a precios bajos. Se encuentran galgas del mismo modelo que la anterior plataforma con resistencias de 120 y 350Ω.

Hay galgas de 120Ω (ver *Figura 49*):



20 piezas BF350-3AA BF350 medidor de tensión resistivo de precisión/medidor de tensión/para el sensor de presión/celda de carga

★★★★★ 5.0 > 3 Valoraciones 7 vendidos

€ 4,18 / lote (20 unidades)

€ 4,54 -8%

€ 2.72 Cupón de nuevo usuario [Conseguir cupones](#)

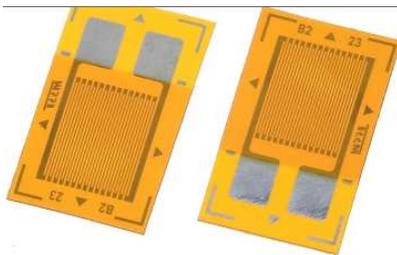
Cantidad:

1 1501 lots disponibles

Envío: € 1,56
a Spain por AliExpress Saver Shipping
Fecha estimada de entrega el 14/04

Figura 49 Galgas RoarKit en AliExpress

Se pueden encontrar galgas de 350Ω en lotes de 10 uds. desde 1,98€.



10 unids/lote BF350-3AA medidor de tensión resistivo de precisión BF350/medidor de tensión/sensor de presión/celda de carga para Arduino

★★★★★

★★★★★

4.9-

36 Valoraciones 180 vendidos

€ 1,98 / lote (10 unidades)

Figura 50 Muestra de galgas de 350 en AliExpress

Punto a favor de estos productos es que si se incluye una descripción técnica en la web (ver Figura 51).

Descripción del producto

Tipo: BF350-3AA

Resistencia: 349,8 ±0.1 Ω

Factor de sensibilidad (indicador): 2,0-2,20

Clase de exactitud: 0,02

Límite de tensión: 2.0% (2000 microtensión)

Tamaño monolítico: 7,1mm * 4,5mm

Materiales

Material conductor: Constantan, aleación de cobre-níquel 55% cobre/45% níquel (resistencia constante sobre la temperatura)

Soporte del sustrato: lámina de resina fenólica modificada

Adhesivos

La superficie se debe pulir, eliminar los óxidos o los residuos antes de aplicar el adhesivo.

Adhesivos a largo plazo: pegamento epoxi adhesivo de curado en caliente (H-610 o equivalente)

Adhesivos a corto plazo: Pegamentos cianoacrilicos

Figura 51 Ficha técnica de las galgas de 350

Las galgas de 120 que se encuentran se venden en lotes de 5,10 o 100 unidades, siendo el coste unitario de entre 0,4 y 1€ aproximadamente.



100 piezas * BF120-3AA 120-3AA medidor de tensión resistivo de precisión para la célula de carga del sensor de presión 120ohm

4.3  (3 votos) Tienda: XNQ Electric Company Store

€42,19

€45,36 

US \$3.00

Nuevo cupón de usuario en pedidos superiores a US \$4.00

Ver detalles & comprar



Protección al consumidor

Garantía de devolución del dinero
 Reembolso en 15 días

Revisado por qxxxx (IQ)    



10 piezas x BF120-3AA BF120 medidor de tensión resistivo de precisión/medidor de tensión/para el sensor de presión/celda de carga

0.0  (0 votos) Tienda: XNQ Electric Company Store

€10,49

€11,28 

US \$3.00

Nuevo cupón de usuario en pedidos superiores a US \$4.00

Ver detalles & comprar



Protección al consumidor

Garantía de devolución del dinero
 Reembolso en 15 días

Figura 52 Muestra de galgas de 120 en AliExpress

4.7.1.2.4 Alibaba

En Alibaba abunda el mismo modelo de galga anterior con resistencias de 120 y 350, siendo su rango de precios similar al de AliExpress.

 **Примечание:** Всегда узнавайте у поставщика, повлияет ли коронавирус (COVID-19) на выполнение вашего заказа. ✕





Увеличить изображение

Готов к отправке
В наличии
Быстрая отправка

Резистивный линейный манометр BF120-3aa

100-499 шт.	500-999 шт.	>=1000 шт.
0,50 \$	0,45 \$	0,40 \$

MARCH More

Скидки 50% на стоимость доставки Скидки на первые 2 заказа (до 20 USD на каждый заказ)

СКИДКА 10% Любой одиночный заказ на сумму свыше \$100.00 до... Получить купон

Количество: шт.

Торговая гарантия Защитите свои заказы на Alibaba.com.

Оплата:     

Логистика Alibaba.com · Решения для инспекций

Figura 53 Muestra de galgas de 120 en AliBaba

En esta plataforma no solo hay galgas metálicas, sino también galgas semiconductoras fabricadas en silicio. Su precio es considerablemente más elevado que el de las galgas eléctricas. En la Tabla 9 se puede ver la ficha técnica de estas galgas.

Home > All Industries > Electronics Components, Accessories & Telecommunications > Active Components > Sensors [Subscribe to Trade Alert](#)

XJC-910 Optical Strain Gauge Flexible Sensor

FOB Reference Price: [Get Latest Price](#)

>=5 Pieces
\$130.00

MARCH
 Featured Product in March Expo 2020



View larger image

Lead Time:	Quantity(Pieces)	1 - 5	>5
	Est. Time(days)	5	Negotiable

Customization: Customized logo (Min. Order: 100 Pieces)
 Graphic customization (Min. Order: 100 Pieces)

Samples: \$200.00 /Piece | 1 Piece (Min. Order) [Buy Samples](#)

Figura 54 Galga semiconductora

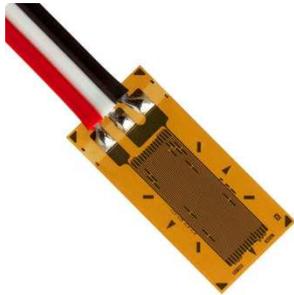
Technology specification	
Capacity	500μm/m
Accuracy	0.1%F.S.
Material	Stainless steel
Rated output	1.5-2.0mV/V
Recommended excitation	5-10VDC
Maximum excitation	15V
Natural frequency	≥1KHz
Hysteresis	0.1%F.S.
Repeatability	0.1%F.S.
Compensated temp range	-10~40°C
Operating temp range	-20~60°C
Insulation	≥5000MΩ/50VDC
Input impedance	1000±10Ω
Output impedance	1000±10Ω
Creep (30min)	0.1%F.S.
Zero balance	±2%F.S.
Temp effect on output	0.2%F.S./10°C
Temp effect on zero	0.5%F.S./10°C
Safe load limit	150%
Ultimate load limit	200%
Cable size	Φ3*2
Life	Full scale more than 1 million times
Cable connection	Ex +:Red; Ex -:Black; Sig +:Green; Sig -:White

Tabla 9 Especificaciones de las galgas semiconductoras

4.7.1.3 Distribuidores de equipos electrónicos:

Existen webs especializadas en la comercialización de sensores y otros equipos electrónicos industriales, algunas tienen sus precios en abierto y otros es necesario contactar con ellos.

El primer distribuidor que se encuentra es Digi-Key, ofrece galgas de 6mm y 350Ω en packs de 10 uds (ver Figura 55). Además el fabricante incluye la ficha técnica de su producto como se muestra en la Tabla 10)



Todos los precios están en EUR.

ESCALA DE PRECIOS	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	146,61000	146,61 €
5	130,32000	651,60 €
10	122,17500	1.221,75 €
25	118,10240	2.952,56 €
50	114,03000	5.701,50 €

Comentarios

MMF003204



STRAIN GAUGE 350OHM LINEAR
1=5PC

Micro-Measurements (Division of Vishay Precision Group)

77,87000 € [Detalles](#)

MMF403994



STRAIN GAUGE 120 OHM LINEAR
10PC

Micro-Measurements (Division of Vishay Precision Group)

139,28000 € [Detalles](#)

Figura 55 Galgas en el distribuidor Digi Key

ESCRIBIR	DESCRIPCIÓN	SELECCIONAR TODOS
Categorías	Sensores y transductores Medidores de esfuerzo	<input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/>
Fabricante	Micro-Measurements (Division of Vishay Precision Group)	<input type="checkbox"/>
Serie	C4A	<input type="checkbox"/>
Estado de la pieza	Activo	<input type="checkbox"/>
Tipo de patrón	Lineales	<input type="checkbox"/>
Alcance de tensión	±3%	<input type="checkbox"/>
Resistencia	350 Ohms	<input type="checkbox"/>
Tolerancia de resistencia	±0.3%	<input type="checkbox"/>
Largo - Activo	0.235" (5.97mm)	<input type="checkbox"/>
Longitud - Patrón general	0.301" (7.64mm)	<input type="checkbox"/>
Largo total	0.37" (9.4mm)	<input type="checkbox"/>
Ancho - Activo	0.100" (2.54mm)	<input type="checkbox"/>
Ancho - Patrón general	0.100" (2.54mm)	<input type="checkbox"/>
Ancho - General	0.18" (4.6mm)	<input type="checkbox"/>
Temperatura de operación	-60 ~ 180°F (-51 ~ 80°C)	<input type="checkbox"/>

Tabla 10 Especificaciones galgas Micro Measurements

Para concluir este apartado se pueden clasificar las galgas en dos tipos:

Para uso profesional: en este grupo entrarían las galgas fabricadas por los fabricantes especializados como Omega, HBM o Vishay que, pese a su mayor precio, vienen con sus prestaciones certificadas y nos pueden proporcionar unas medidas bastante precisas.

Para uso amateur o educativo: en este grupo entrarían principalmente las que encontramos en grandes plataformas de compra que son de fabricación china, sin ningún tipo de ficha ni certificación, pero a un precio muy bajo que permitirían a los centros educativos tener un buen número de sensores para que sus alumnos puedan practicar su montaje.

4.7.2 Galgas en roseta

Las galgas en roseta se usan para medir estados de tensión plana en los que no se conocen las direcciones principales de tensión, además son producto bastante común de encontrar en los catálogos de los fabricantes.

Es necesario comprender a grandes rasgos como se mide con estas galgas.

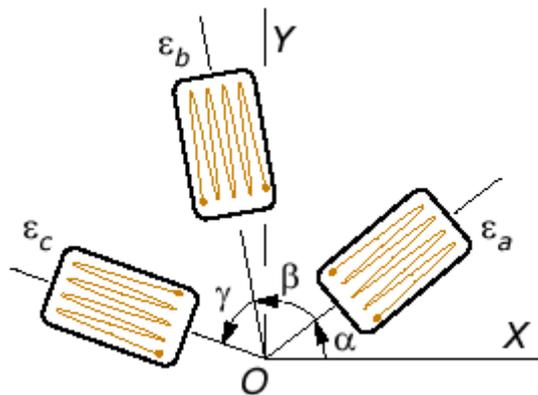


Figura 56 Galgas en roseta

La medida de la galga vendrá en unos ejes que no serán los principales, por lo que será necesario referenciarlas a dichos ejes principales.

El cambio de referencia se hace mediante la Ecuación 53 de forma genérica.

$$\varepsilon_{x'} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta + \varepsilon_{xy} \sin 2\theta \quad \text{Ecuación 53}$$

Siendo x' el eje de la galga y θ el ángulo entre el eje principal de la pieza y el de la galga.

Particularizando para los datos de la Figura 56:

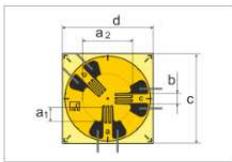
$$\begin{cases} \varepsilon_a = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\alpha + \varepsilon_{xy} \sin 2\alpha \\ \varepsilon_b = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2(\alpha + \beta) + \varepsilon_{xy} \sin 2(\alpha + \beta) \\ \varepsilon_c = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2(\alpha + \beta + \gamma) + \varepsilon_{xy} \sin 2(\alpha + \beta + \gamma) \end{cases}$$

Se consultó a los mismos fabricantes que a las galgas individuales para obtener precios y así poder comparar. La configuración elegida fue 0/45/90° por ser la que ofrecen todos los fabricantes.

4.7.2.1 Galgas de 120

Las galgas de 120Ω vuelve a ser dominio de los fabricantes chinos que venden en las plataformas de compra, aunque HBM (ver Figura 57) sí que ofrece esta configuración de galgas.

Datos del producto



1-RY11-10/120
Banda Ext. 10/120 RY11

Precio de catálogo 203,00-EUR
Precio especial online: 192,85 EUR

Unidades: 1 PAK

En stock

[Añadir a la cesta](#)

Cantidad mínima de pedido

[Presupuesto gratuito](#)

Aquí puede crear su propia oferta de HBM. [Obtenga más información](#)

[Volver a Serie - RY11](#)

Descuentos por volumen (no en los precios de los propios clientes):

5 PAKS	187,06 EUR/PAK
10 PAKS	183,21 EUR/PAK
25 PAKS	178,39 EUR/PAK
50 PAKS	173,56 EUR/PAK
100 PAKS	163,92 EUR/PAK

Figura 57 Roseta de 120Ω de HBM

En Alibaba (ver Figura 58) también se encuentra esta configuración de galga rondando el precio unitario de cada sensor los 2 ó 3€.




Figura 58 Galgas en roseta en Alibaba

4.7.2.2 Rosetas de 350

Esta es la configuración más popular en todos los fabricantes de algas como Omega, MM o HBM.

En la web de Digi key España (ver Tabla 11) se ofrecen rosetas de Micro Measurements en packs de 5 uds, ofreciendo descuento por elegir varios packs.



MMF336118

[Datasheet](#)

Digi-Key Part Number	1033-1044-ND
Manufacturer	Micro-Measurements (Division of Vishay Precision Group)
Manufacturer Part Number	MMF336118
Description	C2K-06-G1350-350/SP70 STACKED RO
Detailed Description	Stacked Rosette Strain Gauge $\pm 1.5\%$ 0.039" (1.00mm) per section 0.045" (1.14mm) per section

Figura 59 Roseta de Micro Measurements distribuida por DigiKey España

PRICE BREAK	UNIT PRICE	EXTENDED PRICE
1	75,16000	75,16 €
5	71,40000	357,00 €
10	65,76300	657,63 €
25	58,24720	1.456,18 €
50	56,36820	2.818,41 €
100	54,48920	5.448,92 €

UNIT PRICE	
75,16000 €	90,94360 €
Excludes VAT	Includes VAT

Tabla 11 Precios galgas roseta de MM

En segundo lugar, se miró en la tienda de HBM la misma configuración de roseta siendo su precio 303,05€ lo que ellos denominan PAK (5 uds), ofreciendo también descuento por volumen de compra.

Precio de catálogo **349,00 EUR**

Precio especial online: **303,05 EUR** ⓘ

Unidades: PAK

■ En stock

Añadir a la cesta

Cantidad mínima de pedido

Presupuesto gratuito

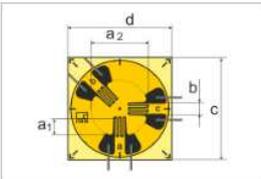
Aquí puede crear su propia oferta de HBM... [Obtenga más información](#)

[Volver a Serie C](#)

Descuentos por volumen (no en los precios de los propios clientes):

5 PAKS	293,96 EUR/PAK
10 PAKS	287,90 EUR/PAK
25 PAKS	280,32 EUR/PAK
50 PAKS	272,74 EUR/PAK
100 PAKS	257,59 EUR/PAK

Datos del producto



1-RC11-6/350

Banda Ext. 6/350 RC11

Banda extensométrica de la serie C (temperatura extrema [-269°C a +250°C])

Geometría: Roseta Y (angular)

Material rejilla: Aleación especial CrNi

Lámina portadora: polimida

3 rejillas, desplazadas 0°/45°/90°

Rejilla de medición recubierta

Hilos de conexión

Resp. de temp.: acero ferr. (10,8 ppm/K)

Resistencia nominal: 350 ohmios

Longitud de la rejilla de medición: 6 mm

Cantidad por paquete: 5 unidades

Cantidad mínima: 3 paquetes

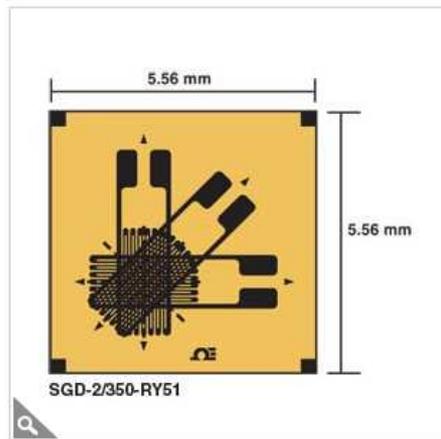
Punto de apoyo para soldar correcto: LS 5

Figura 60 Roseta fabricada y distribuida por HBM

Por último, el fabricante Omega (Figura 61) ofrece packs de 10 uds a 188€.

Galga extensiométrica de precisión Roseta rectangular superpuesta 0/45/90°

SGD Triaxial



Galga extensiométrica de precisión Roseta rectangular

€188,00 SGD-2/350-RY51

REALIZAR PEDIDO 



- Precios para paquetes de 5 unidades
- Muy flexibles, mecánicamente robustas
- Rango de temperatura grande
- Se fijan con adhesivos fríos o calientes

[Extensómetros, accesorios y instrumentación - Ver productos relacionados](#)

Figura 61 Roseta suministrada por Omega

Para concluir este apartado, se resumirán los precios en todas las galgas en la y se tomarán valores medios de pecios para tener unas nociones sobre su coste.

Fabricante (distribuidor)	Modelo	Precio web	Uds	precio/ud
120Ω				
Omega	6mm/120Ω	83,00 €	10	8,30 €
RS Pro	5mm/120Ω	9,62 €	1	9,62 €
HBM	6mm/120Ω	85,12 €	10	8,51 €
Micro measurments (Digi Key)	6mm/120Ω	139,28 €	10	13,93 €
BF120 3AA (Amazon)	6mm/120Ω	5,35 €	5	1,07 €
BF120 3AA (Aliexpress)	6mm/120Ω	42,19 €	100	0,42 €
BF120 3AA (AliExpress)	6mm/120Ω	10,49 €	10	1,05 €
BF120 3AA (Amazon)	6mm/120Ω			
350Ω				

Omega	6mm/350Ω	74,00 €	10	7,40 €
HBM	6mm/350Ω	88,06 €	10	8,81 €
Micro measurments (Digi Key)	6mm/350Ω	146,61 €	10	14,66 €
BF350 3AA (Amazon)	6mm/350Ω	5,99 €	5	1,20 €
BF350 3AA (eBay)	6mm/350Ω	7,20 €	20	0,36 €
BF350 3AA (eBay)	6mm/350Ω	2,70 €	5	0,54 €
BF350 3AA (AliExpress)	6mm/350Ω	1,98 €	10	0,20 €
BF350 3AA (AliExpress)	6mm/350Ω	4,18 €	20	0,21 €
Roseta 120Ω 0/45/90				
BX120 1CG (Aliexpress)	6mm/120Ω	22,33 €	10	2,23 €
BX120 1CG (Aliexpress)	6mm/120Ω	17,59 €	5	3,52 €
BX120 1CG (Aliexpress)	6mm/120Ω	6,46 €	1	6,46 €
BX120 1CG (Aliexpress)	6mm/120Ω	2,79 €	1	2,79 €
Roseta 350Ω 0/45/90				
Omega	0-45-90º/350Ω	188,00 €	5	37,60 €
HBM	0-45-90º/350Ω	303,05 €	5	60,61 €
Micro measurements (Digi Key)	0-45-90º/350Ω	90,94 €	5	18,19 €
Semiconductoras				
XJC	910 Optical	130,00 €	1	130,00 €
Compensación de ruido				
Kyowa	KFN5 C9	200,00 €	5	40,00 €

Tabla 12: Resumen de precios de todas las galgas

Para obtener el precio medio (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se ha realizado por un lado con el coste de las galgas de Omega, HBM, RS y MM y por otro con el coste de las galgas BF350, por ser muy bajo y variable su precio, falseando así el cálculo.

Precio medio galgas eléctricas 120Ω	10,09 €	Precio medio galgas eléctricas 350Ω (€)	10,29 €	Precio medio galgas roseta 350Ω (€)	38,80 €
Precio medio galgas eléctricas 120Ω low cost (€)	0,85 €	Precio medio galgas eléctricas 350Ω low cost (€)	0,57 €		

4.7.3 Instrumentación y accesorios necesarios para medir deformaciones

4.7.3.1 Fuentes de alimentación

Proporcionan la energía necesaria al circuito y el resto de los accesorios para funcionar.

Las fabrican y distribuyen las principales empresas de productos electrónicos: Omega, HBM, Vishay, Schneider Electric, Siemens...

Fuentes de alimentación		
Marca y modelo	Precio (€)	Descuento lote
Omega FAR1	129.00 €	No
Siemens UTP3315 (laboratorio)	89.95 €	-
LEG NGS2	110.15 €	Sí
Red Lion Controls MPAXS000	355.89 €	Sí

Tabla 13 Precio de las fuentes de alimentación

4.7.3.2 Acondicionador de señal

La misión de este equipo es la de amplificar la señal y eliminar el ruido eléctrico asociado al propio funcionamiento del circuito.

En este punto la búsqueda es muy amplia ya que hay mucha variedad, pero no todos los equipos sirven.

Por suerte para estos equipos electrónicos existe Octoparts, un motor de búsqueda que compara para un mismo producto los precios entre distintos distribuidores y te permite buscar por palabras clave un equipo.

Connectors › Terminal Blocks



Phoenix Contact
5604058
Terminal Block Interface Modules MCR-SGA-4/6-DC

Allied Electronics & Automation

[Datasheet](#) [+ Add to BOM](#) €613.65

Seller	SKU	Stock	1	10	100	1,000	10,000	Updated
★ Airline Hydraulics	PHOENIX 5604058	214 Visit site	EUR* 613.90	613.90	613.90	613.90	613.90	>1wk
★ Onlinecomponents.com	5604058	2 Visit site	EUR* 620.12	604.81	604.81	604.81	604.81	10m
★ Mouser	651-5604058	2 Visit site	EUR* 613.90	564.79	537.19	537.16	537.16	10m
★ Verical	5604058	5 Visit site	EUR 606.83	606.83	606.83	606.83	606.83	10m
★ Arrow Electronics	5604058	5 Visit site	EUR 606.83	606.83	606.83	606.83	606.83	10m
★ Digi-Key	277-4864-ND	0 ..	EUR 613.99	564.87	564.87	564.87	564.87	10m
★ Livingston & Haven	753007197	Yes Visit site	EUR* 672.27	672.27	672.27	672.27	672.27	>1wk
★ Master Electronics	5604058	2 Visit site	EUR* 652.76	636.64	636.64	636.64	636.64	1d
★ Electro Sonic	5604058	2 Visit site	EUR* 672.34	655.74	655.74	655.74	655.74	1d
★ TTI	5604058	0 ..	EUR* 651.48	613.90	613.90	613.90	613.90	2d
★ Sager Electronics	5604058	0 ..	EUR* 687.71	687.71	687.71	687.71	687.71	2d
★ Allied Electronics & A...	70170899	6 Visit site	EUR* 631.59	613.39	613.39	613.39	613.39	23h
★ Newark	16X9323	0 ..						10m

Figura 62 Acondicionador y amplificador de señal Phoenix Contact



Newark

Honeywell
060-6881-02
Transducer Amplifier 28 VDC Bridge-based sensor

[Datasheet](#) [+ Add to BOM](#) €397.01

[Manufacturer Page](#)
[Request Sample](#)
[CAD Options](#)

Jump to: [Price & Stock](#) [CAD Models](#) [Tech Specs](#) [Documents](#) [Descriptions](#) [Images](#)

Price & Stock Distributor links are sponsored ⓘ

Honeywell 060-6881-02 pricing and available inventory.

Authorized Distributors [See all price breaks »](#)

Seller	SKU	Stock	1	10	100	1,000	10,000	Updated
★ Digi-Key	480-6100-ND	1 Visit site	EUR 424.78	402.81	402.81	402.81	402.81	2h
★ RS Components	8213771	2 Visit site	EUR 555.53	555.53	555.53	555.53	555.53	14h
★ Mouser	785-060-6881-02	5 Visit site	EUR* 441.55	387.82	366.49	366.49	366.49	2h
★ Allied Electronics & A...	70048521	18 Visit site	EUR* 499.76	452.91	408.25	408.25	408.25	1d
★ Newark	29M9219	0 ..	EUR* 465.87	428.54	420.85	420.85	420.85	2d

Figura 63 Acondicionador y amplificador de señal Honeywell

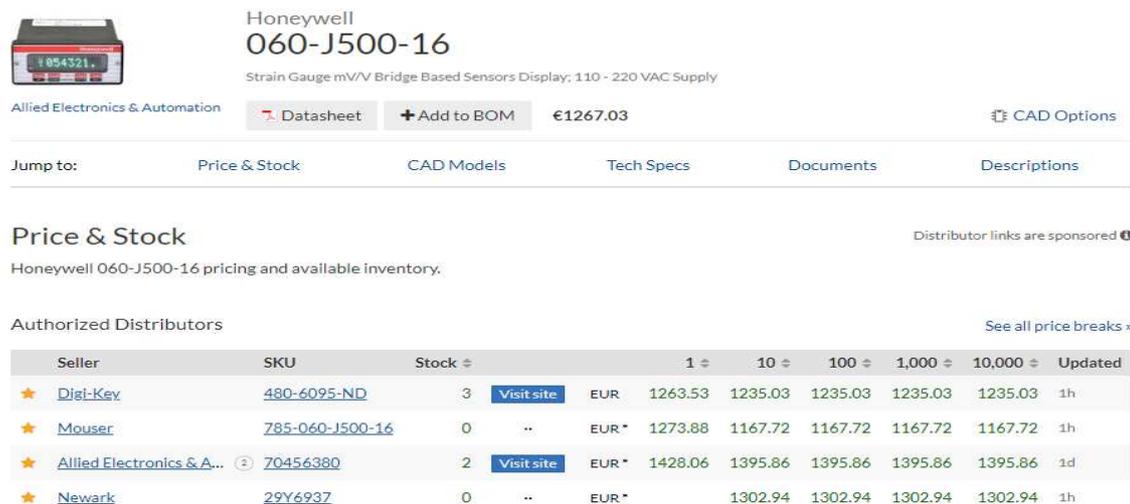
Estos equipos sirven para configurar el usuario su propio circuito, normalmente los grandes fabricantes duelen incluir todo en un mismo aparato configurado por módulos.

Acondicionador de señal	
Marca y modelo	Precio (€)
Omega OM-CP-Bridge 120-X	129,00 €
Phoenix Contact 5604058 (Octopart)	606,83-687,71
Honeywell 060-6881-02 (Octopart)	424.78-555.53

Tabla 14 Precios de acondicionadores de señal

4.7.3.3 Display

No todos los sistemas de adquisición de datos cuentan con una pantalla para leer los datos, si fuera necesario se pueden añadir, aunque el precio no es precisamente bajo.



Honeywell
060-J500-16
 Strain Gauge mV/V Bridge Based Sensors Display; 110 - 220 VAC Supply

Allied Electronics & Automation [Datasheet](#) [+ Add to BOM](#) €1267.03 [CAD Options](#)

Jump to: [Price & Stock](#) [CAD Models](#) [Tech Specs](#) [Documents](#) [Descriptions](#)

Price & Stock Distributor links are sponsored
 Honeywell 060-J500-16 pricing and available inventory.

Authorized Distributors [See all price breaks](#)

Seller	SKU	Stock		1	10	100	1,000	10,000	Updated
Digi-Key	480-6095-ND	3	Visit site	EUR 1263.53	1235.03	1235.03	1235.03	1235.03	1h
Mouser	785-060-J500-16	0	..	EUR* 1273.88	1167.72	1167.72	1167.72	1167.72	1h
Allied Electronics & A...	70456380	2	Visit site	EUR* 1428.06	1395.86	1395.86	1395.86	1395.86	1d
Newark	29Y6937	0	..	EUR*	1302.94	1302.94	1302.94	1302.94	1h

Figura 64 Display

4.7.3.4 Adquisición de datos

Las señales eléctricas es necesario almacenarlas para su simultánea o posterior lectura y procesado. Aquí se pueden encontrar desde módulos de adquisición hasta equipos en los que no sólo se recogen datos, sino que también incluyen el acondicionamiento de señal o incluso el software.

HBM (ver Figura 65) ofrece equipos muy completos de adquisición de datos con varios canales (8 ó 16) que incluyen dentro del módulo todos los amplificadores y filtros de señal necesarios e incluso la fuente de alimentación.

	Nombre	Precio	Unidades	
	1-MX840-PAKAP QuantumX paquete: MX840B + catmanAP	9.365,00 EUR 8.896,75 EUR	1 UN 	<input checked="" type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX840-PAKEASY QuantumX paquete: MX840B + catmanEASY	7.676,00 EUR 7.292,20 EUR	1 UN 	<input checked="" type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX440-PAKAP QuantumX paquete: MX440B + catmanAP	6.867,00 EUR 6.523,65 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX440-PAKEASY QuantumX paquete: MX440B + catmanEASY	5.034,00 EUR 4.779,45 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX410-PAKAP QuantumX paquete: MX410B + catmanAP	8.688,00 EUR 8.253,60 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Fecha de entrega más de 4 semanas	
	1-MX410-PAKEASY QuantumX paquete: MX410B + catmanEASY	6.959,00 EUR 6.611,05 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Fecha de entrega más de 4 semanas	
	1-MX430-PAKAP QuantumX paquete: MX430B + catmanAP	9.336,00 EUR 8.869,20 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX430-PAKEASY QuantumX paquete: MX430B + catmanEASY	7.645,00 EUR 7.262,75 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX238-PAKAP QuantumX paquete: MX238B + catmanAP	12.144,00 EUR 11.508,30 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX1615-PAKAP QuantumX paquete: MX1615B + catmanAP	9.806,00 EUR 9.315,70 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX1615-PAKEASY QuantumX paquete: MX1615B + catmanEASY	8.749,00 EUR 8.283,05 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX1616-PAKAP PAQUETE QUANTUMX CON catmanAP	9.806,00 EUR 9.315,70 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX1616-PAKEASY PAQUETE QUANTUMX CON EASY	8.749,00 EUR 8.283,05 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX809-PAKAP QuantumX paquete: MX809B + catmanAP	6.797,00 EUR 6.457,15 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	
	1-MX809-PAKEASY QuantumX paquete: MX809B + catmanEASY	4.967,00 EUR 4.709,15 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>
			 Entrega en 4 semanas	

	Nombre	Precio	Unidades
	1-MX840B QuantumX amplificador univ. (8)	6.566,00-EUR 6.237,70 EUR	1 UN   En stock
	1-MX440B QuantumX amplificador univ. (4)	3.739,00-EUR 3.552,05 EUR	1 UN   En stock
	1-MX410B QuantumX universal dinam. (4)	5.881,00-EUR 5.586,95 EUR	1 UN   En stock
	1-MX430B QuantumX amplificador para puentes SG(4)	6.644,00-EUR 6.311,80 EUR	1 UN   En stock
	1-MX238B QuantumX amplificador de precisión (2)	9.388,00-EUR 8.918,60 EUR	1 UN   En stock
	1-MX460B QuantumX digital dinam. (4)	3.641,00-EUR 3.458,95 EUR	1 UN   En stock

Figura 65 Sistemas de adquisición de datos de HBM

National Instruments ofrece en su catálogo (ver Figura 66) sistemas de adquisición de datos similares a los de HBM que también incluyen la amplificación y acondicionamiento de la señal.

Modelo	Precio	Núcleo del Procesador	SO del Controlador	Cantidad de Ranuras	Rango de Temperatura de Funcionamiento	Capacidad de Memoria de Disco Duro
		Seleccionar	Seleccionar	Seleccionar	Seleccionar	Seleccionar
cDAQ-9132	€ 2.843,00	Dual Core Intel Atom de 1.33 GHz	Windows Embedded Standard 7	4	-20 °C a 55 °C	16 GB
cDAQ-9132	€ 3.317,00	Dual Core Intel Atom de 1.33 GHz	LabVIEW Real-Time (NI Linux Real-Time)	4	-20 °C a 55 °C	16 GB
cDAQ-9133	€ 3.317,00	Dual Core Intel Atom de 1.33 GHz	Windows Embedded Standard 7	8	-20 °C a 55 °C	16 GB
cDAQ-9133	€ 3.790,00	Dual Core Intel Atom de 1.33 GHz	LabVIEW Real-Time (NI Linux Real-Time)	8	-20 °C a 55 °C	16 GB
cDAQ-9134	€ 4.264,00	Dual Core Intel Atom de 1.33 GHz	Windows Embedded Standard 7	4	-40 °C a 70 °C	32 GB
cDAQ-9134	€ 4.738,00	Dual Core Intel Atom de 1.33 GHz	LabVIEW Real-Time (NI Linux Real-Time)	4	-40 °C a 70 °C	32 GB
cDAQ-9135	€ 4.738,00	Dual Core Intel Atom de 1.33 GHz	Windows Embedded Standard 7	8	-40 °C a 70 °C	32 GB
cDAQ-9135	€ 5.212,00	Dual Core Intel Atom de 1.33 GHz	LabVIEW Real-Time (NI Linux Real-Time)	8	-40 °C a 70 °C	32 GB
cDAQ-9136	€ 4.264,00	Quad Core Intel Atom de 1.91 GHz	Windows Embedded Standard 7	4	-20 °C a 55 °C	32 GB
cDAQ-9136	€ 4.738,00	Quad Core Intel Atom de 1.91 GHz	LabVIEW Real-Time (NI Linux Real-Time)	4	-20 °C a 55 °C	32 GB
cDAQ-9137	€ 4.738,00	Quad Core Intel Atom de 1.91 GHz	Windows Embedded Standard 7	8	-20 °C a 55 °C	32 GB
cDAQ-9137	€ 5.212,00	Quad Core Intel Atom de 1.91 GHz	LabVIEW Real-Time (NI Linux Real-Time)	8	-20 °C a 55 °C	32 GB

Figura 66 Sistemas de adquisición de datos de National Instruments

Data logger	
Marca y modelo	Precio (€)
Omega OM-CP-Bridge 120-X(+ carcasa protectora)	565,00 €
Windmill softw. 851-SG(incluye software y alimentación para las galgas)	933,00 €
National Instruments 4ch,16GB,1.33GHz	2.843,00 €
National Instruments 8ch,32GB,1.91GHz	5.212,00 €
HBM MX840B (4ch)	6.237,70 €
HBM MX840B (8ch)	3.552,05 €

Tabla 15 Resumen de precios de módulos de adquisición de datos

4.7.3.5 *Software*

Los softwares permiten al usuario leer de forma cómoda las lecturas de las galgas visualizándolas en forma de gráficas, tablas, etc. Y trabajar con ellas en otros formatos (Excel, Matlab, ASCII...).

Este campo sí que es dominio de los grandes fabricantes de los equipos ya que suelen tener los medios y el know how de estos programas.

El coste de estos programas varía en función de lo complejos y elaborados que sean estos, siendo de unos pocos cientos de euros, hasta los casi 4500€ del software National Instruments.

Software	
Marca y modelo	Precio (€)
Windmill softw. 851-SG (incluye data logger y alimentación para las galgas)	933,00 €
HBM Software Catman Easy	1.511,45 €
HBM Software Catman Completo	3.875,00 €

National Instruments DIAdem básico	1.411,00 €
National Instruments DIAdem avanzado	2.987,00 €

4.8 Conclusiones

Las galgas extensométricas son el método clásico para medir deformaciones en estructuras por lo que su tecnología ya ha sido popularizada para todos los bolsillos. Si bien los sensores son económicos, sigue habiendo una considerable diferencia entre las galgas de fabricantes reconocidos y aquellas de bajo coste y aquellos que son para un propósito específico.

Se observa una diferencia de precio importante entre las galgas de fabricantes como Omega o HBM con las que se ofrecen en las plataformas de compra. Inicialmente había prevista una prueba de éstas galgas pero el confinamiento lo impidió. Tras haber consultado se ve que estos fabricantes orientales, por lo general, no tienen hoja de características que indiquen las desviaciones en las medidas ni cuentan con ninguna certificación de calidad tipo ISO. De esto se deducirá que los controles de calidad no serán tan exhaustivos y la variabilidad a la hora de medir de un lote de galgas a otro, inadmisibles a nivel profesional.

La instrumentación necesaria tampoco tiene un coste excesivo para las empresas ya que desde unos 500€ se pueden obtener sistemas de adquisición de datos, aunque para disponer de un número alto de canales y capacidad de almacenamiento hay que hacer desembolso.

Por último, hay que destacar la polivalencia de estos sensores que pueden ser utilizados en casi cualquier campo y las alternativas solo se buscarían en caso de un ambiente con campos electromagnéticos y para montajes en los que la ligereza sea fundamental ya que cablear e instalar toda la instrumentación añade un peso considerable a determinadas estructuras.

5. Métodos basados en deformaciones: Sensores de fibra óptica

5.1 Funcionamiento

Están basados en la tecnología de la fibra óptica tan usada en las telecomunicaciones. Se basa en la refracción de haces de luz descrita por la ley de Snell que relaciona el cambio de velocidad de la luz al pasar de un medio a otro

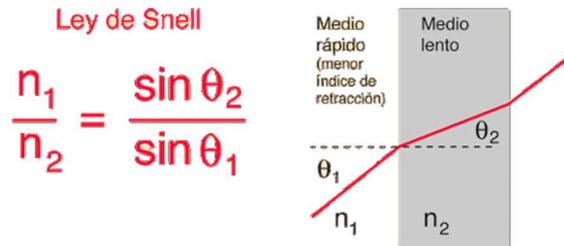


Figura 67 Ley de Snell

Los parámetros que aparecen en la Figura 67 son n_1 y n_2 , los índices de fracción de cada medio. Por otro lado, θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia de la luz sobre la superficie de separación de cada medio.

Los cables de fibra óptica constan de un núcleo por el que se dirige el haz de luz y un revestimiento con un índice de refracción menor que el del mencionado núcleo que impide la refracción, de modo que se produce una reflexión total de la luz.

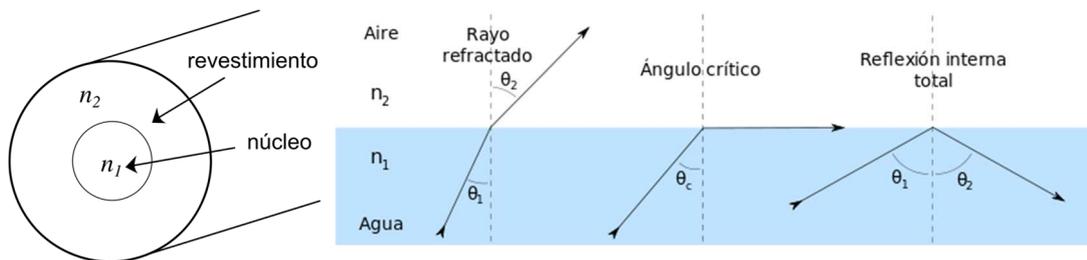


Figura 68 Partes de un cable de fibra óptica y su relación con la ley de Snell

Una vez visto el principio de funcionamiento de la fibra óptica, diferenciarán los tipos de conductores que existen, atendiendo a como transmiten la luz en su interior

- Multimodo escalonado: es el tipo de cable más sencillo que existe, la luz puede viajar por múltiples modos, es decir, hay mucha dispersión, cada rayo de luz sigue una trayectoria diferente. El Índice de refracción es constante en toda la sección del núcleo. Su velocidad de transmisión de datos es baja.
- Multimodo gradual: Se logra reducir la dispersión teniendo un índice de refracción variable en la sección del núcleo, es decir, el núcleo será de capas de distintos materiales para que los rayos de luz viajen en forma de seno. Con este tipo de cable se logra una Mayor velocidad de transmisión de datos (> 4GHz).
- Monomodo: Tipo de conducto cuyo Núcleo es muy pequeño para impedir la dispersión en muchos modos, lo que permitirá una velocidad de transmisión de datos mucho mayor (Límite de 100000 GHz)

Este último será el tipo de cable utilizado en los sensores de fibra óptica que se desarrollarán a continuación.

5.1.1 Uso como sensor de deformación

Los sensores de fibra óptica se basan en el uso de cables monomodo, con unas dimensiones específicas:

Elemento	Diámetro (μm)
Núcleo	6-10
Revestimiento	125
Cubierta protectora	250

Tabla 16 Dimensiones de un cable de fibra óptica

Para crear un sensor de deformación, durante su fabricación se inscribe en la fibra lo que se denomina una rejilla o red de Bragg en fibra (en inglés, Fiber Bragg Grating o FBG). Esta rejilla es, básicamente, un patrón físico de interferencia que refleja la luz de una forma distinta a como lo hace el resto de la fibra. Para entenderlo mejor, la fibra se puede visualizar como una extensión cilíndrica de material transparente, con una serie de anillos delgados, que serían las redes de Bragg. Cuando la luz láser incide sobre este patrón, ciertas longitudes de onda se reflejan, mientras que el resto se transmiten.

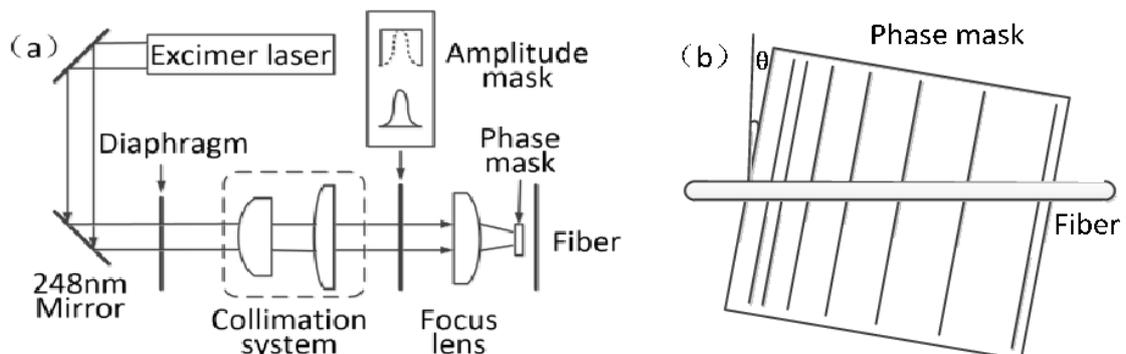


Figura 69 Fotografado de las redes de Bragg

Las interferencias físicas —los “círculos”— están colocados a intervalos específicos. Cuando la fibra se estira o se comprime —y, por tanto, se ve sometida a deformaciones positivas o negativas—, estos intervalos cambian. Cuando la fibra se estira, su longitud aumenta, con lo que el espaciado entre los anillos se alarga, y viceversa.

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda$$

Ecuación 54

En la Ecuación 54 intervienen la longitud de onda reflejada por la red de Bragg (λ), el índice de refracción (n_{ef}) y la distancia entre cada círculo que forma la red de Bragg (Λ).

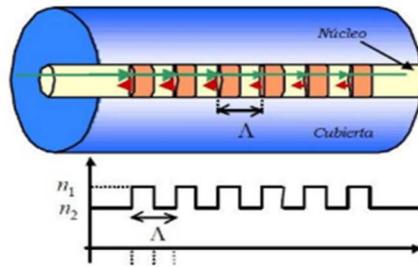


Figura 70 Redes de Bragg e influencia del periodo

Con ello, la luz reflejada no solo tarda un poco más o un poco menos en viajar cuando la red de Bragg inscrita en la fibra se deforma. Lo más interesante es que se producen cambios en la longitud de onda que se refleja. En términos científicos, la red de Bragg tiene un índice de refracción dado. El índice de refracción de un material describe cuánta luz se desvía —o refracta— cuando atraviesa el material. Cuando se altera la forma de la red de Bragg a causa de una deformación, su índice de refracción también varía.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(1 + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial \varepsilon}\right) \Delta\varepsilon = (1 + p_e)\Delta\varepsilon \quad \text{Ecuación 55}$$

$$\leftrightarrow \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k\Delta\varepsilon$$

λ	Longitud de onda	Se refiere al pico de longitud de onda que mide un sensor de fibra con rejilla de Bragg. Normalmente se expresa en nanómetros (nm).
λ_0	Longitud de onda de referencia	Es el pico de longitud de onda de un sensor de fibra con rejilla de Bragg en unas condiciones de referencia (deformación cero, a una temperatura de referencia, etc.). Normalmente se expresa en nanómetros (nm).
$\Delta\lambda$	Variación de longitud de onda	La variación en la longitud de onda, también llamada "desplazamiento" o "cambio", es la diferencia entre la longitud de onda (medida) y la longitud de onda de referencia (valor de referencia): $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$. Normalmente se expresa en nanómetros (nm).
k	Factor k	El factor k (también llamado "factor de galga") de una galga extensométrica óptica es la constante de proporcionalidad entre la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda/\lambda_0$) y la variación de la deformación $\Delta\varepsilon$. Se mide como: $\Delta\lambda/\lambda_0 = k \cdot \Delta\varepsilon$. Es un número adimensional y depende del encapsulado del sensor y de la fibra óptica característica empleada. En el caso de los sensores de deformación ópticos de HBM, el factor k se indica en las hojas de características y de calibración que se entregan con cada sensor individual.
ε	Deformación	La deformación es un valor adimensional que representa el cambio relativo en la longitud de un material con respecto a su longitud inicial. En general es un valor muy pequeño, por lo cual se expresa en $\mu\text{m}/\text{m}$, ppm o 10^{-6} .
S	Sensibilidad	La sensibilidad de un sensor de fibra con rejilla de Bragg es la proporción directa entre la deformación medida y el cambio en longitud de onda de Bragg: $\Delta\varepsilon/\Delta\lambda = S$. Normalmente se expresa como un valor de microdeformación por nanómetro [$(\mu\text{m}/\text{m})/(\text{nm})$] y es diferente para cada sensor, puesto que depende de su longitud de onda de base inicial, que es: $S = 1/(k \cdot \lambda_0)$.

Tabla 17 Parámetros de la ecuación 55

5.2 Instrumentación: interrogador óptico

Un interrogador óptico (también se les llama unidades de media o sistemas de adquisición de datos) es un instrumento optoelectrónico capaz de leer sensores de fibra con rejilla de Bragg (FBG) en aplicaciones de monitorización estáticas y dinámicas.

Los interrogadores más simples usan dispositivos linealmente dependientes de la longitud de onda (acopladores o filtros). El cambio de potencia detectado controla el cambio de longitud de onda de Bragg. Esta estructura es bastante simple y se ha

comercializado, pero no es adecuada para sensores multiplexados. Además, los sensores multiplexados no son recomendados para análisis modal.

Los sistemas de interrogación más comunes se basan en el escaneo de la longitud de onda, iluminando los FBG con "luz blanca" y recogiendo la señal reflectante a través de un Fabry-Perot ¹sintonizable; otros sistemas se basan en iluminar los FBG con un láser sintonizable. En ambos casos, una resolución de 1 microstrain es posible actualmente, con un rango dinámico de hasta 100 Hz, que es suficiente para monitorear la mayoría de los problemas estáticos y vibratoriales en las estructuras. Para fenómenos de alta frecuencia, tales como impactos y análisis transitorio existen interrogadores que trabajan con frecuencias del rango de kHz.

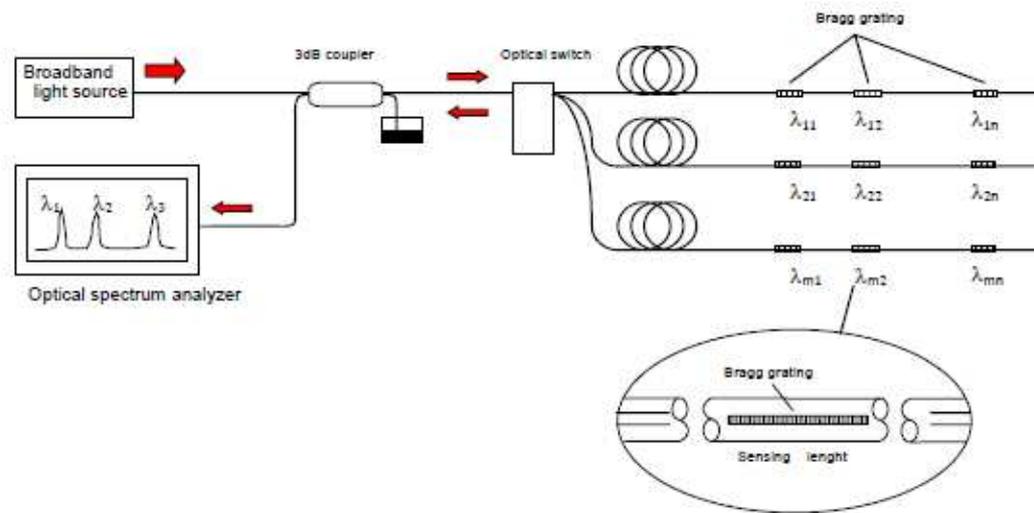


Figura 71 Esquema de funcionamiento de un sist. FBG para monitorización estructural.

Un mismo interrogador puede obtener lecturas de una amplia red de sensores de varios tipos (deformación, temperatura, desplazamiento, aceleración, inclinación, etc.) conectados a través de distintas líneas de fibra. Todos los datos se pueden adquirir simultáneamente y con frecuencias de muestreo diferentes.

Durante la adquisición de datos, el interrogador mide la longitud de onda asociada a la luz reflejada por los sensores ópticos y la convierte a unidades técnicas.

Los interrogadores emiten un espectro con longitudes de onda de entre 1500 y 1600 nm, ya que las redes de Bragg de los sensores suelen reflejar en ese espectro, es decir, emiten un espectro no visible al ojo humano. Son longitudes de onda que pertenecen al rango infrarrojo como se indica en la Tabla 18.

¹ En óptica, un interferómetro de Fabry-Pérot, o Etalon está, normalmente, constituido por una placa con dos superficies reflectantes, o dos espejos paralelos altamente reflectantes. Se usan con bastante frecuencia en telecomunicaciones, láseres y espectroscopia de control y medida de longitudes de onda.

Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
Rayos gamma	$< 10 \times 10^{-12} \text{m}$	$> 30,0 \times 10^{18} \text{Hz}$	$> 20 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
Rayos X	$< 10 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 30,0 \times 10^{15} \text{Hz}$	$> 20 \cdot 10^{-18} \text{ J}$
Ultravioleta extremo	$< 200 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 1,5 \times 10^{15} \text{Hz}$	$> 993 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Ultravioleta cercano	$< 380 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 7,89 \times 10^{14} \text{Hz}$	$> 523 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Espectro Visible	$< 780 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 384 \times 10^{12} \text{Hz}$	$> 255 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo cercano	$< 2,5 \times 10^{-6} \text{m}$	$> 120 \times 10^{12} \text{Hz}$	$> 79 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo medio	$< 50 \times 10^{-6} \text{m}$	$> 6,00 \times 10^{12} \text{Hz}$	$> 4 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo lejano/submilimétrico	$< 1 \times 10^{-3} \text{m}$	$> 300 \times 10^9 \text{Hz}$	$> 200 \cdot 10^{-24} \text{ J}$
Microondas	$< 10^{-2} \text{m}$	$> 3 \times 10^8 \text{Hz}^{\text{n. 1}}$	$> 2 \cdot 10^{-24} \text{ J}$
Ultra Alta Frecuencia-Radio	$< 1 \text{ m}$	$> 300 \times 10^6 \text{Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-26} \text{ J}$
Muy Alta Frecuencia-Radio	$< 10 \text{ m}$	$> 30 \times 10^6 \text{Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-28} \text{ J}$
Onda Corta - Radio	$< 180 \text{ m}$	$> 1,7 \times 10^6 \text{Hz}$	$> 11,22 \cdot 10^{-28} \text{ J}$
Onda Media - Radio	$< 650 \text{ m}$	$> 650 \times 10^3 \text{Hz}$	$> 42,9 \cdot 10^{-29} \text{ J}$
Onda Larga - Radio	$< 10 \times 10^3 \text{m}$	$> 30 \times 10^3 \text{Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-30} \text{ J}$
Muy Baja Frecuencia - Radio	$> 10 \times 10^3 \text{m}$	$< 30 \times 10^3 \text{Hz}$	$< 19,8 \cdot 10^{-30} \text{ J}$

Tabla 18 Longitudes de onda del espectro electromagnético

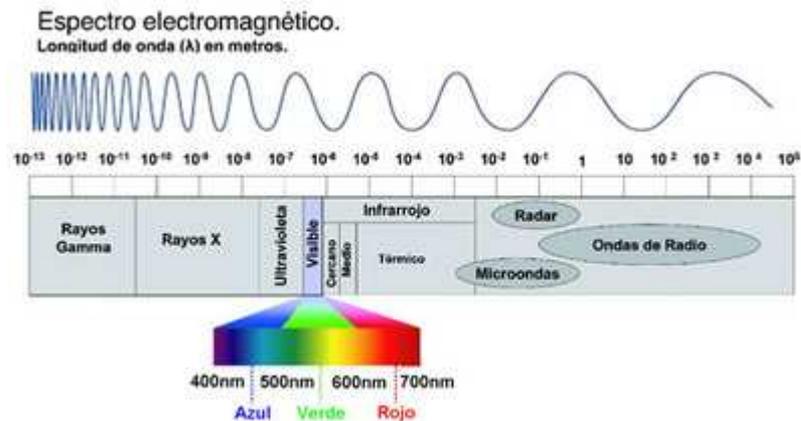


Figura 72 Espectro electromagnético

5.3 Aplicaciones

Los campos de aplicación son, en esencia, los mismos que las galgas extensométricas. Se usa en situaciones muy concretas en las que, si el presupuesto lo permite, priman la ligereza, inmunidad electromagnética o la integración del sensor dentro de la propia estructura.

En construcciones de hormigón que serán monitorizadas permanentemente se podría integrar el sensor en la propia estructura.

5.3.1 Ingeniería civil

En el caso de las aplicaciones en grandes estructuras civiles, la tecnología de FBGs simplifica enormemente la instalación del sistema de monitorización, ya que el cableado necesario es muy inferior al necesario para medir con galgas eléctricas y permite cubrir grandes distancias.

En construcciones de hormigón que serán monitorizadas permanentemente se podría integrar el sensor en la propia estructura. En estructura metálica

5.3.2 Grandes máquinas eléctricas

La inmensa mayoría de la producción eléctrica mundial se origina mediante grandes turbinas generadoras. Los grandes generadores están desarrollan potencias de entre los 500 MW y los 1,5 GW, y se diseñan para operar de forma ininterrumpida. El mantenimiento de estas grandes máquinas implica su desconexión de la red para inspección programada, o, lo que es peor, su apagado inmediato en caso de fallo operativo. Estas desconexiones suponen unas pérdidas económicas significativas para las empresas productoras de energía.

La monitorización continua de estas grandes máquinas de generación eléctrica, ya sean grandes generadores o transformadores de potencia, permite por una parte minimizar las paradas de mantenimiento de estas máquinas, y por otra aumentar la seguridad operativa, lo que a su vez se traduce en una reducción de los costes asociados a estos sistemas.

Las condiciones ambientales inherentes a este tipo de aplicaciones implican elevados campos electromagnéticos e incluso entornos explosivos por el uso de sistemas refrigerados con hidrógeno o por ambientes de inmersión en aceite. En estos entornos de medida la tecnología de fibra óptica garantiza por una parte la seguridad de una tecnología pasiva eléctricamente, y por otra proporciona señales limpias debidas a la inmunidad a campos electromagnéticos externos de la fibra.



Figura 73 Instalación de sensores de fibra en un generador de potencia

En estas grandes máquinas, los sistemas de monitorización suelen usarse para la medida de vibración, temperatura y deformación en el interior de transformadores y generadores. Estos sistemas incluyen no sólo los sensores y los interrogadores, sino que la solución completa debe incluir asimismo los pasamuros para las fibras, y cables de fibra específicamente diseñados para su operación en el interior de este tipo de estructuras.

5.3.3 Aerogeneradores

El tiempo de inactividad de los aerogeneradores supone un elevado coste en las explotaciones. Es por tanto de crucial importancia la identificación de aquellos componentes en los que las tensiones mecánicas pudiesen producir fallos a lo largo de la vida útil de la máquina. La tecnología de medida permite la detección de estos puntos en una fase temprana y, minimizando con ello los tiempos de parada.

Los generadores eólicos en la actualidad son más grandes y altos que en el pasado, especialmente en las aplicaciones “offshore”. Las demandas en la medida para las máquinas en el futuro son más exigentes en cuanto a la necesidad de equipos de medida en general, y específicamente para las soluciones offshore. Primero porque las condiciones son mucho más exigentes, y segundo porque las turbinas se encuentran en lugares más inaccesibles. Por tanto, se requiere una mayor fiabilidad de cada uno de los

componentes y de todo el sistema, al mismo tiempo se deben medir tensiones, fuerzas y pares mucho más elevados.

En estos entornos donde la accesibilidad a los sistemas de medida y los datos puede ser limitada, es necesario implementar soluciones que extraigan la información relevante de todo el conjunto de medidas, para ello las soluciones de software profesional nCode permiten realizar análisis de fatiga durante el diseño y operación de las instalaciones eólicas, de modo que todos los componentes estén óptimamente dimensionados, y cualquier envejecimiento prematuro en cualquier parte de la estructura, sea detectado y subsanado con la suficiente antelación para evitar el fallo catastrófico.

Dichos sistemas deberán proporcionar: perfecta sincronización entre los diferentes canales de medida, adquisición y procesado de datos automática con acceso remoto y generación de alarmas. Dadas las condiciones tan exigentes, es importante la elección de los equipos basándose en la robustez y fiabilidad de estas.

Una aplicación especialmente interesante en el entorno de los aerogeneradores es la monitorización dinámica de la deformación en las palas. Un ejemplo sería HBM ha desarrollado el sistema WindMETER, que incorpora 3 canales ópticos (uno por pala) con un máximo de 8 sensores (4 de deformación y 4 de temperatura) en cada canal, y que proporciona medidas simultáneas de todos estos sensores a 100 muestras/s. La unidad de interrogación se coloca en el rotor, y los sensores pueden ser bien embebidos en la pala durante su fabricación o bien pegados en su superficie tras la instalación del aerogenerador.

Las ventajas de la tecnología de FBG en este entorno son la capacidad de multiplexación, la pasividad eléctrica y la inmunidad a descargas eléctricas tales como las producidas por rayos, y la alta resistencia a la fatiga de los sensores FBG de deformación.

5.3.4 Industria aeroespacial

Otro de los grandes mercados para la instrumentación en continua es el de la industria aeronáutica y aeroespacial.

En la actualidad aproximadamente el 50 % del A350 XWB de Airbus y del Boeing B787 Dreamliner están fabricados con nuevos materiales compuestos, lo que aumenta la necesidad de integrar sistemas de monitorización continua que proporcionen información del estado de las estructuras realizadas con estos nuevos materiales. Ambas compañías están involucradas en diversas iniciativas y proyectos tecnológicos para el desarrollo de sistemas de medida basados en fibra óptica que estén certificados para vuelo y que permitan el embebimiento de sensores de deformación dentro de las propias estructuras de material compuesto.

En el caso de la industria aeroespacial, el mayor requisito de monitorización corresponde no tanto a medidas estructurales, sino a medidas de mapeo térmico. Como ejemplo, la plataforma EUROSTARS 6000 de satélites de telecomunicación de Airbus integra más de 200 sensores de temperatura, requiriendo mazos de cableado que suponen por una parte mucho tiempo de diseño, instalación y test y, por otra, añaden masa a la estructura total.

En estas aplicaciones los sensores FBG proporcionan una alternativa con tamaño y masa muy reducidos, así como inmunidad electromagnética y de radiofrecuencia, lo que evita interferencias con otros sistemas de a bordo.

Además, permiten embeber el sensor en el fuselaje o las alas.

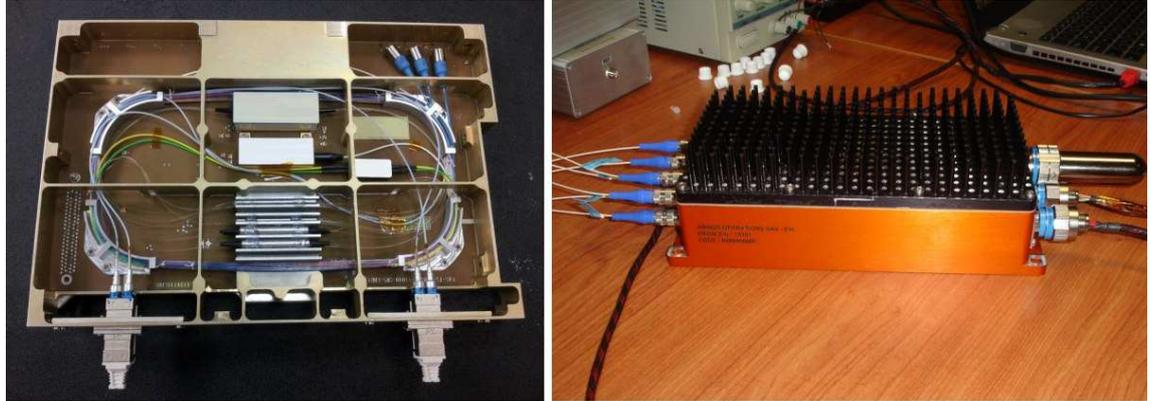


Figura 74 Unidad FBG para aeronáutica y módulo para integración en la RTU2015 de Airbus DS (aplicaciones espaciales)

Algunas compañías, están desarrollando prototipos de equipos para uso en vuelo con capacidad para ser montado en diversas partes de la estructura del avión (MiniBRAGG) y de otro equipo que será comercializado como una tarjeta integrable de un equipo modular desarrollado por Airbus DS para aplicaciones espaciales.

5.3.5 Sector ferroviario.

Los raíles, están sometidos a grandes tensiones de forma permanente, debidas al propio tráfico ferroviario, variaciones térmicas diarias que pueden afectar a largo plazo produciendo diferentes tipos de daños. Mediante la monitorización continua de la red ferroviaria es posible extraer la información de dichas perturbaciones, permitiendo estimar los intervalos de servicio y las actuaciones sobre la vía. Fundamentalmente las magnitudes a medir son: fuerzas, tensiones mecánicas y aceleraciones, a partir de éstas se determinan los desplazamientos laterales y longitudinales de la vía y el desplazamiento lateral de las traviesas.

De toda esta información se extrae la medición de cargas sobre la vía durante el paso de los vehículos, valores de carga por eje. El incremento de medidas de seguridad mediante la detección y monitorización continua de factores de riesgo para descarrilamientos y sobrecargas: fuerzas $Y - Q$, estado de carga, fuerza centrífuga, características de rodadura. En su conjunto todos estos sistemas y mediciones inciden directamente en términos económicos optimizando los intervalos de servicio y la vida útil de la infraestructura.



Figura 75 Sensores de deformación y temperatura instalados en los raíles.

Para la medida en los entornos descritos son necesarias tecnologías robustas y fiables que permitan el funcionamiento en largos periodos de tiempo de forma desatendida y sometidas a entornos hostiles en cuanto a condiciones climáticas y entorno electromagnético. En este sentido, la tecnología de medición óptica basada en los sensores FBG abre innumerables posibilidades y permite obtener resultados de medición correctos y significativos, incluso en mediciones en catenarias y elementos de alta tensión.

5.3.6 Aplicaciones en Petróleo y Gas.

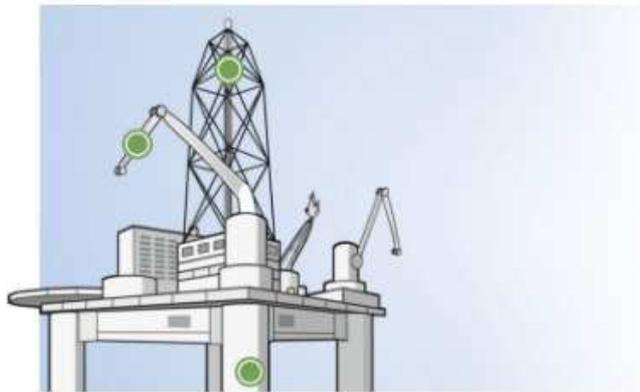


Figura 76 Puntos críticos de una plataforma petrolífera

El petróleo y el gas son materias primas extraídas en lugares diversos para lo que se utilizan diferentes infraestructuras de extracción y transporte. Como producto valioso es especialmente importante que su procesamiento y distribución se realice de forma segura, eficiente e ininterrumpida. Las soluciones y sistemas de medición actuales permiten comprobar de manera óptima el nivel de fatiga y carga de las infraestructuras, los sistemas de transporte y las tuberías. Medición eficiente en aplicaciones *offshore*, con tecnología para monitorizar tubos de subida, tuberías, grúas, estructuras de cimentación, oleoductos, etc.

Uno de los ejemplos más ilustrativos en este tipo de infraestructuras es la monitorización de tuberías, ya sean oleoductos, gaseoductos, o cualquier elemento de importancia que sea distribuido.

Las bandas extensométricas son particularmente óptimas para la medida de cargas mecánicas en estructuras, así como en medidas geotécnicas. Ambas aplicaciones se

relacionan directamente con la monitorización de conducciones en la industria del petróleo y el gas, de las que además es posible extraer los parámetros de operación de la infraestructura, como la presión de transporte y permite prevenir accidentes en zonas donde sean susceptibles de haber deslizamientos.

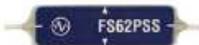
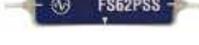
Cuando se monitoriza la integridad de estas estructuras, el sistema de medida deberá ser plenamente confiable, ya que todos los procesos son de vital importancia y están sometidos a regulaciones. Es en estas circunstancias donde la medida óptica permite de forma óptima cumplir los requerimientos.

5.4 Análisis comercial

5.4.1 Sensores FBG

El primer fabricante que se miró fue HBM, está especializado en este tipo de sensores, además de tener productos preconfigurados tiene la opción de que el cliente pueda crear su propia cadena de sensores, con lo que las posibilidades y precios son amplios. Existen sensores en cadena e individuales.

Los sensores individuales tienen forma de parche y vienen preparados para distintas configuraciones según su fijación o su protección. Pueden ser para su fijación con adhesivo o soldados o bien recubiertos de material compuesto o metálico para su incrustación en hormigón y materiales compuestos. Se usan para medir en puntos concretos de la estructura.

	1-FS62PSS-1510 Banda extens. ópt. con patch FC 1510	227,00-EUR 215,65 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>	 En stock
	1-FS62PSS-1520 Banda extens. óptica con patch FC 1520	227,00-EUR 215,65 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>	 En stock
	1-FS62PSS-1530 Banda extens. ópt. con patch FC 1530	227,00-EUR 215,65 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>	 En stock
	1-FS62PSS-1540 Banda extens. óptica con patch FC 1540	227,00-EUR 215,65 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>	 En stock
	1-FS62PSS-1550 Banda extens. óptica con patch FC 1550	227,00-EUR 215,65 EUR	1 UN 	<input type="checkbox"/>	 En stock

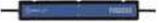
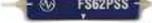
	1-FS62CSS-ARM/1510 Banda extens. óptica composite FC 1510	224,00 EUR 209,95 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  Entrega en 4 semanas
	1-FS62CSS-ARM/1520 Banda extens. óptica composite FC 1520	224,00 EUR 209,95 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  Entrega en 4 semanas
	1-FS62CSS-ARM/1530 Banda extens. óptica composite FC 1530	224,00 EUR 209,95 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  En stock
	1-FS62WSS-ARM/1510 Banda extens. óptica soldable FC 1510	237,00 EUR 225,15 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  Entrega en 4 semanas
	1-FS62WSS-ARM/1520 Banda extens. óptica soldable FC 1520	237,00 EUR 225,15 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  Entrega en 4 semanas
	1-FS62WSS-ARM/1530 Banda extens. óptica soldable FC 1530	237,00 EUR 225,15 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  Entrega en 4 semanas
	K-FS62PSS Banda extens. óptica con patch config. Configurador de producto - Por favor Iniciar Sesión	Por favor, configure producto	 Fecha de entrega: a consultar
	K-FS62CSS Banda extens. óptica composite config. Configurador de producto - Por favor Iniciar Sesión	Por favor, configure producto	 Fecha de entrega: a consultar
	K-FS62WSS Banda extens. óptica soldable config. Configurador de producto - Por favor Iniciar Sesión	Por favor, configure producto	 Fecha de entrega: a consultar
	K-FS62RSS Extensómetro robusto config. Configurador de producto - Por favor Iniciar Sesión	Por favor, configure producto	 Fecha de entrega: a consultar

Figura 77 Sensores FBG individuales de HBM

Cadenas de sensores (Figura 78): este tipo de sensores permiten una monitorización continua de toda la longitud en la que están puestos.

Productos para Técnica de Medida Óptica :: Sensores Ópticos

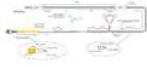
	Nombre	Precio	Unidades
	K-OP Configuración de sensores ópticos Longitud fibra antes 1a banda: 0,0 Long. fibra tras última banda: 0,0 Configurador de producto - Por favor Iniciar Sesión	Por favor, configure producto	 Fecha de entrega más de 4 semanas
	K-OP-A Config. sensores reforzados en cadena Configurador de producto - Por favor Iniciar Sesión	Por favor, configure producto	 Fecha de entrega más de 4 semanas
	1-OPTIMET-OMF Fibra vidrio Ormozer, medición deform.	1.267,00 EUR 1.203,65 EUR	<input type="text" value="1"/> UN   En stock
	1-OPTIMET-PKF Fibra vidrio recubierta, medición deform.	1.702,00 EUR 1.702,40 EUR	<input type="text" value="1"/> UN   Fecha de entrega más de 4 semanas
	1-OPTIMET-PKF-4 Fibra óptica forrada plástica, 4 FBG	670,00 EUR 636,50 EUR	<input type="text" value="1"/> UN   Entrega en 4 semanas
	1-OPTIMET-PKF-2 Fibra vidrio recubr. plás. 2 rejillas	364,00 EUR 342,95 EUR	<input type="text" value="1"/> UN   Entrega en 4 semanas

Figura 78 Cadena de sensores FBG

Se observa en la Figura 78 una diferencia de precios notable, la explicación es que los tres últimos, pese a tener las mismas características de funcionamiento difieren en el número de redes de Bragg que tienen grabadas: 13 para la optimet PKF, 4 para la optimet PKF-4 y 2 para la optimet PKF-2. Tienen un rango de temperatura de uso de entre -40 y 140°C y un radio de curvatura mínimo de 10mm.

El sensor optimet OMF está indicado para temperaturas extremas de entre -268,9 y 200°C.

También se encuentran sensores “autocompensados” (ver Figura 79), es decir que de las redes de Bragg que lleva grabadas una (optimet PKF OTC1) o dos (optimet PKF OTC2) se pueden utilizar para medir temperatura y el resto para medir la deformación.

	1-OPTIMET-PKF-OTC1 Cadena PKF con 1 elem. compens. de temp.	2.224,00 EUR 2.112,80 EUR	<input type="text" value="1"/> UN   Entrega en 4 semanas
	1-OPTIMET-PKF-OTC2 Cadena PKF con 2 elem. compens. de temp.	2.382,00 EUR 2.262,90 EUR	<input type="text" value="1"/> UN   Entrega en 4 semanas

Datos del producto



1-OPTIMET-PKF-OTC1
 Cadena PKF con 1 elem. compens. de temp.

Precio de catálogo **2.224,00 EUR**
 Precio especial online: **2.112,80 EUR**

Unidades: UN

 Entrega en 4 semanas

 **Añadir a la cesta**

 Presupuesto gratuito

Aquí puede crear su propia oferta de HBM... [Obtenga más información](#)

[Volver a Línea de Productos OP](#)

Descripción del producto	Información técnica	+	Accesorios y opciones	+
---------------------------------	---------------------	---	-----------------------	---

OptiMet-PKF-OTC1

- 13 fibras de Bragg, distancia entre rejilla 60 cm, fibra con revestimiento PEEK
- : 12 fibras de Bragg para mediciones de deformación
- : 1 fibra de Bragg con elemento para compensación térmica (en una posición seleccionable)
- Con 1,5 m de cable para interior, cable flexible 3 mm de diámetro con enchufe macho FC/APC
- Con las siguientes longitudes de onda: 1520, 1525, 1530, 1535, 1540, 1545, 1550, 1555, 1560, 1565, 1570, 1575, 1580 nm

Figura 79 Sensores con compensación de temperatura

Los sensores ópticos son un producto más específico que las galgas eléctricas tradicionales, con lo que suelen ser más difíciles de encontrar por internet, además su fabricación es más compleja ya que se necesitan equipos de fotograbado máscaras de fase con ranuras de micras para grabar las redes de Bragg.

Se pueden encontrar galgas del fabricante coreano FBG Korea (ver Figura 80) con un precio muy variable de entre 100 y 2000\$ (92-1848€ a día 24 de febrero), esta variabilidad se debe a que estos sensores son personalizables.

Home > All Industries > Electronics Components, Accessories & Telecommunications > Active Components > Sensors [Subscribe to Trade Alert](#)

FBG accurately mountable strain gauge sensor price wholesale

FOB Reference Price: [Get Latest Price](#)

\$100.00 - \$2,000.00 / Piece | 1 Piece/Pieces (Min. Order)

Shipping: Support Sea freight

Payments: This supplier also supports T/T, PayPal payments.



Product Details

Company Profile

Overview

Quick Details

Place of Origin:	Gwangju, South Korea	Brand Name:	FBG KOREA
Model Number:	FBG-ST-310	Output:	Other
Theory:	Optical sensor	Usage:	Other
Gauge length(mm):	100 ~	FWHM, -3dB point(...)	≤ 0.3
Resolution(% F.S.):	0.05	Accuracy(% F.S.):	± 0.25
Reflectivity(%):	≥ 70	Wavelength(nm):	1,511 ~ 1,590
Operating temperat...	-20 ~ 80		

Supply Ability

Supply Ability: 100 Piece/Pieces per Month

Packaging & Delivery

Packaging Details: Safety and securely packed in cardboard boxes with partitions
Port: Incheon International Airport

Figura 80 Sensores FBG Korea

En la Tabla 19 se muestra la ficha técnica que el fabricante pone en su sitio web.

Product Name	FBG MOUNTABLE STRAIN SENSOR
Model Number	FBG-ST-310
Brand Name	FBG KOREA
Place of Origin	Gwangju, South Korea
Measurement range (με)	± 2,000
Gauge length(mm)	100 ~
FWHM, -3dB point(nm)	≤ 0.3
Resolution(% F.S.)	0.05
Accuracy(% F.S.)	± 0.25
Reflectivity(%)	≥ 70
Sensitivity(με)	≥1,000pm@120g tension
Wavelength(nm)	1,511 ~ 1,590
Operating temperature(°C)	-20 ~ 80

Tabla 19 Especificaciones del sensor de FBG Korea

5.4.2 Instrumentación y accesorios

Investigando en internet, el primer fabricante que se encuentra es HBM, ofrece variedad de interrogadores, tanto dinámicos como estáticos, fijos o portátiles y con posibilidad de integración en RAK, con todo, los precios varían entre 15 y 20k€

	Nombre	Precio	Unidades
	K-FS22 Interrogador óptico industr. Configurador de producto - Por favor Iniciar Sesión	Por favor, configure producto	 Fecha de entrega más de 4 semanas <input type="checkbox"/>
	1-FS22DI-ST/4CH FS22DI BraggMETER ST 40C FC/APC	15.811,00 EUR 15.020,45 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  En stock
	1-FS22DI-ST/8CH FS22DI BraggMETER ST 80C FC/APC	18.001,00 EUR 17.955,95 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  En stock
	1-FS22SI-ST/4CH FS22SI BraggMETER ST 40C FC/APC	15.811,00 EUR 15.020,45 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  En stock
	1-FS22SI-ST/8CH FS22SI BraggMETER ST 80C FC/APC	18.001,00 EUR 17.955,95 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  En stock
	1-FS42PI-4FC FS42PI BraggMETER Portable 40C FC/APC	20.095,00 EUR 19.080,75 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  En stock
	1-FS42PI-4SC FS42PI BraggMETER Portable 40C SC/APC	20.095,00 EUR 19.080,75 EUR	<input type="text" value="1"/> UN  <input type="checkbox"/>  En stock

Figura 81 Interrogador de HBM

El fabricante *Luna technologies* tiene en su catálogo interrogadores aptos para usar con sensores FBG, en este caso la búsqueda fue algo más compleja ya que en su sitio web no ofrece información de precios, por lo que tras buscar en varias webs de distribución se encontró un modelo por unos 6100€.

También los fabricantes orientales tienen su sitio en el mercado, ofreciendo sus productos en la plataforma Alibaba.

Muchos de los que se ofertan no tienen aplicación para la medición de deformaciones ya que las galgas trabajan con un ancho de 1500 a 1600 nm y los interrogadores vistos funcionan sobre los 800 u 850 nm.

La compañía china INST C+L (ver Figura 82) ofrece por unos 920-1848€, uno que sí podría tener aplicación en el campo de la medición de deformaciones ya que su ancho de banda de medición si coincide con el de las galgas.

El fabricante si aporta ficha técnica (ver Tabla 20) del producto con datos como la temperatura de servicio o el espectro de onda que es capaz de medir. También afirma

ser poseedor de numerosas certificaciones de calidad como la ISO 9001. Por el contrario, no incluye información sobre el número de canales de su producto.

Home > All Industries > Electronics Components, Accessories & Telecommunications > Telecommunications > Fiber Optic Equipment [Subscribe to Trade Alert](#)

INST C+L band ASE SLED Fiber Optical Laser Light Source for fiber Bragg grating(FBG) Sensor Interrogating System

FOB Reference Price: [Get Latest Price](#)



\$1,000.00 - \$2,000.00 / Piece | 1 Piece/Pieces (Min. Order)

Shipping: Support Sea freight

 **Trade Assurance** protects your Alibaba.com orders

Payments:      

Alibaba.com Logistics  Inspection Solutions

 View larger image



Quick Details

Place of Origin:	Guangdong, China	Brand Name:	INST
Model Number:	ASE	gain:	Excellent gain flatness,low ripple
credibility:	High reliability	Broad band output ... up to 80nm	
Control:	Light-dependent control in it	polarization:	Low DOP
Output optical Pow...	up to 20dBm	Spectrum width:	40
Excellent thermal a...	-40°C~60°C	Relative humidity:	90
Name:	C+L band Optical fiber communication apparatus		

Figura 82 Interrogador INST C+L

Parameter	unit	Min.	Typical	Max.
Wavelength range	nm	1528		1563
Output power range	dBm	-40dBm		+10dBm
Saturated output power	dBm			25
Gain flatness	dB	-	1	1.5
Polarization dependent gain(PDG)	dB			0.5
Polarization mode dispersion (PMD)	ps			0.5
Input isolation	dB	45.0		
Output isolation	dB	45.0		
Operating Temperature	°C	-20		+65
Operating humidity	%			90
Noise Figure	dB	<5.5		
Storage Temperature	°C	-40		+85
Power supply voltage		DC+5V GND		
Pigtail connector		FC/APC		
In & out optical fiber		SMF28		

Tabla 20 Especificaciones del Interrogador INST C+L

Se buscó por eBay si había algún interrogador, los únicos que aparecen son usados partiendo de casi 6000€ hasta poco más de 8000€.

	<p>Sistema de interrogación FiberPro IS7000 Fbg, 2 Canales Usado</p> <p>8.284,19 EUR De Corea del Sur</p> <p>¡Cómpralo ya! +414,67 EUR envío</p>
	<p>Sistema de interrogación de gases IS7000 Fbg Usado</p> <p>5.989,68 EUR De Corea del Sur</p> <p>¡Cómpralo ya! +460,74 EUR envío</p>

Figura 83 Interrogadores en eBay

También se contactó vía email con algunos fabricantes de interrogadores. En primer lugar, el distribuidor de BaySpec en España proporcionó un presupuesto (ver Figura 84) para sus interrogadores.

Pos	Producto / Descripción	Cantidad	Precio por unidad
1.	<p>SYS-FBG-E-1510-1590-FA-04</p> <ul style="list-style-type: none"> • Turn-key 4-channel FBG interrogation system • Spectral Range: 1510-1590nm • CW Wide-band Light Source: included, manually adjustable optical output power for signal intensity optimizing. • Optical Circulator: included • 1x4 Optical Switch for 4-channel operation: included • Response Frequency: up to 5 kHz overall response speed • Power Supply: 100-240 V AC, 50-60 Hz • Communication Interface: Ethernet • Optical Fiber: Single-mode fiber • Optical Connector: FC/APC • Software: Windows OS PC based BaySpec Sense 20/20 software for spectrum data acquisition and peak wavelength detection/calculation included <p>Proveedor: BaySpec, Inc.</p> <p>Plazo de entrega estimado: 5-6 weeks aro.</p>	1 pc.	29.650 €

Figura 84 Especificaciones del interrogador BaySpec

El siguiente proveedor fue el fabricante checo Safibra, este proporcionó un presupuesto (ver Tabla 21) para interrogadores de 4, 8 y 16 canales con los accesorios necesarios para poder usar dichos interrogadores.

No.	Part Number / Description	End User Prices w/o VAT	Qty.	Total price w/o VAT
Monitoring system unit				
1	FBGuard-1550-FAST-04-FA-X9 Four channel - FBGuard unit designed for static and dynamic measurements, reading rate 500 samples/s/channel, FC/APC connectors	18 800,00 €	1	18 800,00 €
2	FBGuard-1550-FAST-08-FA-X9 Eight channel - FBGuard unit designed for static and dynamic measurements, reading rate 250 samples/s/channel, FC/APC connectors	20 900,00 €	0	0,00 €
3	FBGuard-1550-FAST-16-FA-X9 Sixteen channel - FBGuard unit designed for static and dynamic measurements, reading rate 125 samples/s/channel, FC/APC connectors	33 300,00 €	0	0,00 €
4	SU-FAST mode option Enables the super fast measurement on one channel, 11000 samples/s	906,00 €	0	0,00 €
Data Processing unit				
5	ProcessGuard Rack PC PeriGuard/FBguard Processor without data processing software SigProc license (sold separately)	1 540,00 €	1	1 540,00 €
Data Processing SW				
6	Fundamental Basic modules required for work with configuration, allowing to process data from the previous system with FFT in a stream. Allows basic GUI and test modules for the configurations as well as the datalogger and fundamental output module (level 1, 18 modules included)	included	1	included
7	Fundamental + Extensive work in the frequency domain as well as intermediate signal processing and thresholding. Enables sending the stream output into additional software. Includes bonus GUI items. (level 2, 39 modules included)	499,00 €	0	0,00 €
8	Advanced Advanced and special modules for more difficult configuration schemes. All the alarm handling modules and GUI color outputs for observing the status of the signal and alarms. Output to basic database systems such as PostGRE, SQL (level 3, 58 modules included)	1 683,00 €	0	included
9	Expert Higher mathematical modules such as the dynamic threshold. GUI 3D Graph and google maps integration or alarm into an image. Real-time output to InluxDB (level 4, 66 modules included)	2 048,00 €	0	0,00 €
10	Exclusive Higher mathematical modules such as the dynamic threshold. GUI 3D Graph and google maps integration or alarm into an image. Real-time output to InluxDB (level 5, 71 modules included)	2 996,00 €	1	2 996,00 €
11	Shipping costs Shipping and packing costs	140,00 €	1	140,00 €
SUBTOTAL		23 476,00 €		
Academic discount - 8%		-1 878,08 €		
TOTAL		21 597,92 €		

Tabla 21 Presupuesto interrogador Safibra

Para finalizar este apartado se resumirán los precios de los distintos interrogadores observando la relación €/canal.

Fabricante (distribuidor)	Modelo	Precio web	Canales	Precio/canal
Interrogadores				
HBM	HBM KFS22	Según configuración	4	
HBM	HBM FS22DI ST 4CH	15.020,45 €	4	3.755,11 €
HBM	HBM FS22DI ST 8CH	17.955,95 €	8	2.244,49 €
HBM	HBM FS22SI ST 4CH	15.020,45 €	4	3.755,11 €
HBM	HBM FS22SI ST 8CH	17.955,95 €	8	2.244,49 €
HBM	HBM FS42PI 4FC	19.080,75 €	4	4.770,19 €
HBM	HBM FS42PI 4SC	19.080,75 €	4	4.770,19 €
INST CL (alibaba)	INST CL (alibaba)	920,00 €	1	920,00 €
		1.848,00 €	1	1.848,00 €
Luna technology	ODISI 6100 multichannel	6.100,00 €	1	6.100,00 €
FiberPro	IS7000 (usado)	5.989,68 €	2	2.994,84 €
		8.284,18 €	2	4.142,09 €
Safibra	FBGuard-1550-FAST-04-FA-X9	18.800,00 €	4	4.700,00 €
	FBGuard-1550-FAST-08-FA-X10	20.900,00 €	8	2.612,50 €
	FBGuard-1550-FAST-016-FA-X11	30.300,00 €	16	1.893,75 €
Bayspec	Wave Capture	29.650,00 €	4	7.412,50 €

Se puede observar cómo al aumentar el número de canales disminuye su coste unitario por decirlo de algún modo.

5.5 Conclusiones

La tecnología FBG para la medición de deformaciones tiene hoy en día un prometedor futuro gracias a la ligereza de sus montajes (un cable de fibra óptica tiene una masa específica de 12 kg/km, unas 10 veces menos que un cable eléctrico) y a su inmunidad electromagnética que permite su instalación en ambientes en los que las galgas pueden sufrir interferencias en sus lecturas.

Por el contrario, su elevado precio hace que, actualmente, su uso se vea relegado a aplicaciones muy concretas en las que la ligereza y la precisión de medida sean imperativas, como puedan ser el desarrollo de aeronaves no tripuladas o determinadas máquinas eléctricas.

Estos sensores son muy sensibles a la temperatura y requieren compensación, algunos modelos vienen con sensor de temperatura integrado para hacer compensación matemática lo que encarece su coste aún más.

6. Sensor ICP de deformaciones

El sensor de deformaciones ICP funciona según el efecto piezoeléctrico, esto significa que, una vez instalado en la estructura, éste se deformará solidariamente y dará una tensión proporcional a la deformación. Como esta tensión es muy pequeña los sensores ICP llevan electrónica integrada, es decir, dentro del propio sensor está la amplificación de la señal.

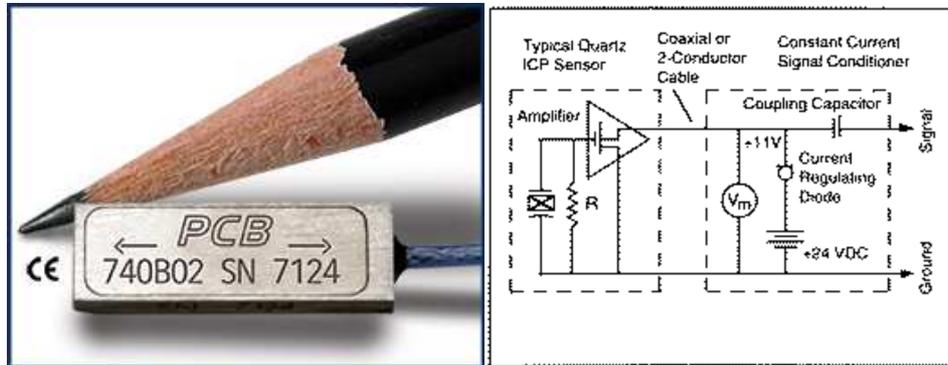


Figura 85 Sensor ICP y su esquema interno

Este sensor al compartir tecnología con los acelerómetros se puede utilizar conjuntamente sin tener que cambiar los sistemas de adquisición de datos, con lo que permite realizar el análisis modal y de deformaciones al mismo tiempo sin necesidad de duplicar cableado para la instalación de galgas. Además, estos sensores no son tan sensibles al ruido como puedan ser las galgas.

Por el contrario, estos sensores requieren de una superficie limpia y pulida para ser adheridos por lo que suele ser necesario mecanizar dicha superficie para no comprometer la fiabilidad de las medidas.

Por último, en la parte comercial, el único fabricante que ofrece este tipo de sensor es PCB Piezotronics. En su web tiene el sensor por 520\$ (unos 440€) a los que habría que sumar impuestos (21% de IVA actualmente) y envío a España.

7. Comparativa de presupuestos

Para tener una idea aproximada de cuánto cuesta hacer una medida con acelerómetros, galgas o FBG se elaborarán tres tablas en las que con los precios de sensores, accesorios y costes de instalación.

Galgas		FBG		Acelerómetros			
Equipo	Precio	Equipo	Precio	Equipo (baja frecuencia)	Precio	Equipo (baja frecuencia)	Precio
HBM 6/350	88,06 €	HBM OMF	1.203,65 €	B&K 8340	1.301,00 €	B&K 8340	684,00 €
Cableado HBM	158,00 €	Conector	19,57 €	Accesorios	641,00 €	Accesorios	651,00 €
National Instruments 4ch	2.843,00 €	Int. FB Guard 4ch	18.800,00 €	cableado	100,00 €	cableado	100,00 €
Software Catman	1.511,45 €	Software Catman	1.511,45 €	Software	1.200,00 €	Software	1.200,00 €
PC	900,00 €	PC	900,00 €	PC	900,00 €	PC	900,00 €
Maleta herram. aplicaciones BE DAK2	845,50 €	Adhesivo	45,00 €	Módulo adq datos B&K	5.381,00 €	Módulo adq datos B&K	5.381,00 €
Mano de obra	300,00 €	Mano de obra	350,00 €	Mano de obra	200,00 €	Mano de obra	200,00 €
Total	6.646,01 €	Testeador de fibra	611,00 €	Total	9.723,00 €	Total	9.116,00 €
		Total	23.440,67 €				

8. Conclusiones generales

La monitorización estructural busca conocer, cuantificar y ubicar los posibles daños de una estructura para poder predecir su vida útil restante. El primer paso es la elección de los sensores para medir variables como aceleraciones, velocidades, desplazamientos o deformaciones. La medición de estas variables es el inicio del camino y es necesario obtener los parámetros modales (frecuencias naturales y modos de vibración) y aplicar métodos que comparen el estado inicial 0 con sucesivos estados 1,2,3... que nos indican como se ha ido dañando la estructura.

A priori, puede parecer que medir deformaciones sería lo mejor ya que al ser una medida directa elimina errores debidos a operaciones intermedias. Con los sensores de deformación se pueden tomar las medidas para realizar el análisis modal y también facilitan la cuantificación del daño al hacer un análisis a fatiga ya que permiten medir deformaciones directamente.

En la práctica, el montaje de galgas extensométricas no es sencillo, ya que hay que seguir unos pasos de preparación de la superficie que de no hacerse correctamente darán una medida errónea.

Las medidas con FBG además de costosas requieren personal especializado para su instalación.

El asunto del multiplexado en los sensores FBG da lugar a confusiones. Los fabricantes y artículos relacionados con esta tecnología resaltan la capacidad de multiplexado de estos sensores. Esto quiere decir que en un solo canal se pueden conectar varios sensores en serie, tal como se muestra en la Figura 86.

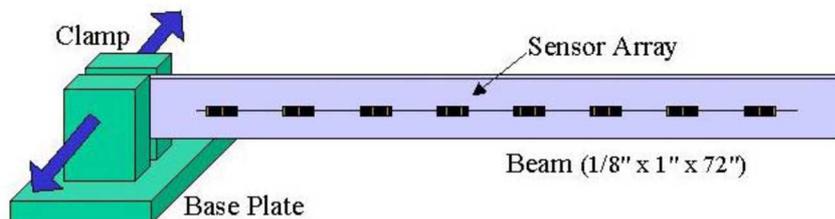


Figura 86 Sensores FBG conectados en serie en una viga en voladizo.

Lo que no es válido para realizar análisis modal son los sistemas de adquisición de datos con multiplexado (válido para todas las tecnologías descritas), es decir, que leen un canal a continuación de otro (con diferencia de ms) pero que dan lugar a errores en la obtención de los modos.

A esto hay que añadir su sensibilidad a la temperatura de ambos tipos de sensores que requieren compensación de temperatura.

Las medidas para análisis modal es habitual hacerlas con acelerómetros, ya que, su fiabilidad de montaje está por encima de las galgas ya que no requieren más que un imán y tornillos para su fijación. De esto se deduce que otra fortaleza de los acelerómetros es su movilidad, se pueden poner en distintas partes de la estructura sin el engorro de tener que despegar con el peligro de dañar el sensor.

En general, para monitorización estructural lo ideal con la tecnología actual es la combinación de sensores de aceleración y deformación que permite crear una red mucho

más completa que permite tener controlados más puntos (mallado más fino) y compararlos con los modelos teóricos y simulaciones.

Se resumen las principales ventajas e inconvenientes para que el lector pueda hacerse una idea de que solución es mejor según la situación

	Ventajas	Desventajas
Acelerómetros	Costes	Necesidad de usar modelos complejos con los datos que proporcionan
	Facilidad de instalación	
	Electrónica integrada (simplifica la instalación)	No son los mejores para análisis a fatiga, requieren cálculos complejos posteriores que quitan precisión
	Longitudes de cableado largas	
Galgas	Al medir deformaciones, buenas para el análisis a fatiga	Instalación compleja
	Válidas para el análisis modal	Sensibles al ruido y temperatura
		Cableado pesado
FBG	Inmunidad al ruido	Costes muy altos, debido a ello queda relegado a aplicaciones muy concretas
	Ligereza	
	Posibilidad de embeber el sensor, especialmente en materiales compuestos	

9. Bibliografía

- [1] H. Wenzel, *Health Monitoring of Bridges*, Viena: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [2] A. Brandt y R. Brincker, «Integrating time signals in frequency domain – Comparison,» Elsevier, Dinamarca, 2014.
- [3] M. Aenlle López, F. Pelayo, R. Brincker y A. Skafte, «Modal Analysis Based Stress Estimation for Structural Elements,» Society for experimental mechanics, Gijón, Arhaus, Lingby, 2015.
- [4] D. Balageas, *Structural Health Monitoring*, Londres: ISTE Ltd., 2006.
- [5] C. Farrar y K. Worden, *Structural Health Monitoring*.
- [6] X. Kong, C. Chun-Sheng y J. Hu, «The State-of-the-Art on Framework of Vibration-Based Structural Damage Identification for Decision Making,» Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, 2017.
- [7] M. Pastor, M. Binda y T. Harcarik, «Modal Assurance Criterion,» Technical University of Košice, Faculty of Mechanical Engineering, Košice, Slovak Republic, 2012.
- [8] H. Wenzel, «From Structural Health Monitoring to Risk based Infrastructure Management,» de *4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure*, Zucich, 2009.
- [9] K. U. Leuven, «Proceedings of ISMA2006,» de *International Conference on Noise and Vibration Engineering Vol.1*, Leuven, Bélgica, 2006.
- [10] C. Ventura, «Structural Health Monitoring of Civil Engineering Structures,» de *2nd European Conferece of the PHM society*, antes, Francia, 2014.
- [11] R. Castro Triguero, «Introducción al Análisis Modal,» de *Jornada sobre Comportamiento Estructural y Monitorización de Estructuras*, Málaga, España, 2016.
- [12] Univ de Sevilla, «Sensor medidor de Aceleración.,» de *Diseño integrado*, Sevilla, Univ. de Sevilla, pp. 39-54.
- [13] Ministerio de Fomento, EHE 08, Madrid, 2008.

- [14] Ministerio de Fomento, Guía para el proyecto sísmico de puentes de carretera, madrid, 2018.
- [15] IGT, «Reconocimiento geofísico, 1ª Fase. Autovía A-8, PK 361+100,» Oviedo, 2020.
- [16] Ministerio de Fomento, Norma sismorresistente de puentes, Madrid: Ministerio de Fomento, 2007.
- [17] J. Blanco Suárez, «Rehabilitación del puente sobre el río Sella en las Rozas (Cangas de Onís),» Ministerio de Fomento, Oviedo, 2020.
- [18] F. Ruiz Gorrindo y A. Llorens Garcia, «ESTRUCTURAS INTELIGENTES PARA OPTIMIZAR EL MANTENIMIENTO de edificios,» Barcelona.
- [19] R. Sargeant, «Foundation monitoring –resistive versus fiber-optical strain gauge systems.Technology and costs compared,» HBM test and measurement.
- [20] HBM, «Optimizing Structures with Continuous Monitoring Systems,» HBM white papers.
- [21] N. Instruments, «Application note 078: Strain Gauge Measurement – A Tutorial,» National instruments publications.
- [22] Vishay precision group, «technical note 501: Noise control in strain gages,» Vishay precision group publications, 2013.
- [23] Vishay Preision Group, «Technical note 502: Optimizing Strain Gage Excitation Levels,» Vishay Preision Group publications, 2010.
- [24] V. P. Group, «Technical note 505: Strain Gage Selection:Criteria, Procedures, Recommendations,» Vishay Precision Group publications, 2018.
- [25] J. Maul y T. Kipp, «Sensing of Surface Strain with Flexible Fiber Bragg Strain Gages,» HBM publications, Darmstadt, Alemania, 2011.
- [26] F. Navarro-Henríquez, «Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes,» Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, 2014.
- [27] Z. Zhou, T. Graver, L. Hsu y J. Ou, de *Techniques of advanced FBG senors: fabrication, demodulation,encapsulation and the structural health monitoing of bridges*, Pacific Science Review, 2003, pp. vol.5 pags 116-121.

- [28] Schroeder, Ecke, Aplitz, Lembke y Lenschow, de *A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade*, IOP Publishing Ltd., 2006, pp. 1167-1172.
- [29] M. Kreuzer, «Strain Measurement with FBG,» HBM publications, Darmstadt, Alemania.
- [30] C. Barbosa, «Optical Fiber Sensors vs. Conventional Electrical Strain Gauges for Infrastructure Monitoring Applications,» HBM publications.
- [31] «Artemis,» [En línea]. Available: http://www.svibs.com/resources/ARTEMIS_Modal_Help/webframe.html#Operational%20Modal%20Analysis.html. [Último acceso: 25 marzo 2020].
- [32] Zemic, «Zemic Europa,» [En línea]. Available: <https://www.zemiceurope.com/es/categories/galgas-extensiométricas/galgas-extensiométricas-estándares.html>. [Último acceso: 21 abril 2020].
- [33] HBM Ibérica, «HBM,» [En línea]. Available: <https://www.hbm.com/es/6394/galgas-extensométricas-para-aplicaciones-especiales/>.
- [34] HBM, «HBM Ibérica,» [En línea]. Available: <https://www.hbm.com/es/6482/descargable-sensores-de-fibra-optica-vs-galgas-extensométricas-eléctricas-convencionales/>. [Último acceso: 28 febrero 2020].
- [35] efunda engineering fundamentals, [En línea]. Available: https://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/strain_gage_rosette.cfm. [Último acceso: 11 marzo 2020].
- [36] A. Miravete, *Los nuevos materiales en la construcción*, Zaragoza: Editorial Reverté, 1994.
- [37] M. M. Oeljeklaus, *Inverse Problems in Engineering*, Vol. 8, 2000.
- [38] C. S. Baldwin, B. Balachandran y S. Buckley, «Modal analysis of vibrating structure using a Fiber Bragg Grating system».
- [39] «Windmill Technologies,» [En línea]. Available: <https://www.windmill.co.uk/multiplexing.html>. [Último acceso: 17 julio 2020].