



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA:

Fundamentos de medida y análisis de la oferta comercial

Ander Vallinas González

David Benito Pertusa

Pamplona, Junio 2011

ÍNDICE

Índice

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN	2
OBJETO DEL PROYECTO	3
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	4

BLOQUE I: Características y principios físicos de funcionamiento

1. Características de los sensores de fibra óptica	
1.1. Entornos en los que son útiles los sensores de fibra óptica.....	12
1.2. Ventajas e inconvenientes de los sensores de fibra óptica	13
1.3. Formas de clasificar los sensores de fibra óptica	15
1.3.1. Formas de clasificar los sensores de fibra óptica dentro de la aplicación	
2. Principios físicos de funcionamiento	
2.1. Fiber Bragg Grating (FBG).....	23
2.2. Sensores FBG distribuidos	26
2.3. Scattering de Raman.....	27
2.4. Scattering de Rayleigh	29
2.5. Scattering de Brillouin	30
2.6. Interferometría Fabry-Perot.....	32
2.7. Interferometría de baja coherencia.....	34
2.8. Interferometría en el caso del hidrófono	35
2.9. Fluorescencia óptica.....	35
2.10. Efecto Faraday.....	37
2.11. Efecto Sagnac	38
2.12. Arseniuro de galio (GaAs)	39
2.13. Termometría infrarroja.....	40
2.14. Transmisión.....	40
2.15. Reflexión	41

BLOQUE II: Estudio del mercado del los sensores de fibra óptica, clasificándolos según su aplicación

1. Introducción.....	43
2. Sensores de Temperatura.....	44
2.1. Introducción	44
SENSORES PARA MEDIDAS PUNTUALES	
2.2. Fiber Bragg Grating (FBG).....	44
2.2.1. Tabla comparativa de sensores	
2.2.2. Instrumentación	
2.2.3. Empresas fabricantes	
2.3. Fluorescencia óptica.....	47
2.3.1. Tabla comparativa de sensores	
2.3.2. Instrumentación	
2.4. Arseniuro de galio (GaAs)	48
2.4.1. Tabla comparativa de acondicionadores de señal	
2.4.2. Tabla comparativa de sondas	
2.5. Interferometría Fabry-Perot.....	51
2.5.1. Tabla comparativa de sensores	
2.5.2. Instrumentación	
SENSORES PARA MEDIDAS DISTRIBUIDAS	
2.6. Fiber Bragg Grating (FBG).....	52
2.6.1. Características del sensor DSS 4300	
2.7. Scattering de Brillouin	52
2.7.1. Tabla comparativa de sensores	
2.7.2. Instrumentación	
2.7.3. Empresas fabricantes	
2.8. Scattering de Rayleigh	54
2.8.1. Características del sensor OBR 4600	
2.8.2. Empresas fabricantes	
2.9. Scattering de Raman.....	55
2.9.1. Tabla comparativa de sensores	
2.9.2. Instrumentación	
2.9.3. Empresas fabricantes	
2.10. Lista de empresas y bibliografía	57

2.10.1. Lista de empresas	
2.10.2. Bibliografía	
3. Sensores de strain	61
SENSORES PARA MEDIDAS PUNTUALES	
3.1. Fiber Bragg Grating (FBG)	61
3.1.1. Tabla comparativa de sensores	
3.1.2. Tabla comparativa de sensores basados en strain	
3.1.3. Instrumentación	
3.1.4. Empresas fabricantes	
3.2. Interferometría Fabry-Perot.....	67
3.2.1. Tabla comparativa de sensores	
3.2.2. Instrumentación	
SENSORES PARA MEDIDAS DISTRIBUIDAS	
3.3. Fiber Bragg Grating (FBG)	68
3.3.1. Características del sensor DSS 4300	
3.4. Scattering de Brillouin	68
3.4.1. Tabla comparativa de sensores	
3.4.2. Instrumentación	
3.4.3. Empresas fabricantes	
3.5. Scattering de Rayleigh	70
3.5.1. Características del sensor OBR 4600	
3.5.2. Empresas fabricantes	
3.6. Interferometría de baja coherencia.....	71
3.6.1. Tabla comparativa de sensores	
3.6.2. Instrumentación	
3.7. Lista de empresas y bibliografía.....	72
3.7.1. Lista de empresas	
3.7.2. Bibliografía	
4. Acelerómetros	75
4.1. Fiber Bragg Grating (FBG)	75
4.1.1. Tabla comparativa de sensores	
4.1.2. Instrumentación	
4.2. Lista de empresas y bibliografía.....	76
4.2.1. Lista de empresas	
4.2.2. Bibliografía	

5. Sensores de corriente.....	78
5.1. Efecto Faraday.....	78
5.1.1. Tabla comparativa de sensores	
5.1.2. Instrumentación	
5.2. Lista de empresas y bibliografía.....	79
5.2.1. Lista de empresas	
5.2.2. Bibliografía	
6. Sensores químicos	80
6.1. Fluorescencia óptica.....	80
6.1.1. Tabla comparativa de sensores	
6.1.2. Instrumentación	
6.2. Lista de empresas y bibliografía.....	81
6.2.1. Lista de empresas	
6.2.2. Bibliografía	
7. Giroscopios.....	83
7.1. Efecto Sagnac	83
7.1.1. Tabla comparativa de sensores	
7.1.2. Girocompases	
7.2. Lista de empresas y bibliografía.....	86
7.2.1. Lista de empresas	
7.2.2. Bibliografía	
8. Sensores de presión	88
8.1. Fiber Bragg Grating (FBG).....	88
8.1.1. Tabla comparativa de sensores	
8.1.2. Instrumentación	
8.1.3. Empresas fabricantes	
8.2. Interferometría Fabry-Perot.....	90
8.2.1. Tabla comparativa de sensores	
8.2.2. Instrumentación	
8.3. Lista de empresas y bibliografía.....	91
8.3.1. Lista de empresas	
8.3.2. Bibliografía	
9. Sensores de desplazamiento	93
9.1. Fiber Bragg Grating (FBG).....	93
9.1.1. Tabla comparativa de sensores	

9.1.2. Instrumentación	
9.1.3. Empresas fabricantes	
9.2. Interferometría Fabry-Perot.....	95
9.2.1. Tabla comparativa de sensores	
9.2.2. Instrumentación	
9.3. Lista de empresas y bibliografía.....	95
9.3.1. Lista de empresas	
9.3.2. Bibliografía	
10. Sensores de índice de refracción.....	98
10.1. Interferometría Fabry-Perot	98
10.1.1. Características del sensor FRI	
10.1.2. Instrumentación	
10.2. Lista de empresas y bibliografía	98
10.2.1. Empresa fabricante	
10.2.2. Bibliografía	
11. Sensores de forma - Shape sensing	100
11.1. Fiber Bragg Grating (distribuido)	100
11.2. Lista de empresas y bibliografía	100
11.2.1. Empresa fabricante	
11.2.2. Bibliografía	
12. Hidrófonos	102
12.1. Interferometría	102
12.2. Lista de empresas y bibliografía	103
12.2.1. Empresa fabricante	
12.2.2. Bibliografía	
13. Otros sensores	103
13.1. Sensores infrarrojos de temperatura.....	103
13.2. Sensores de detección, posición o desplazamiento (Non-contact)	103
13.3. Micrófono óptico	104
13.4. Lista de empresas y bibliografía	104
13.4.1. Empresa fabricante	
13.4.2. Bibliografía	
13.4.3.	

BLOQUE III: Conclusiones, recursos utilizados y bibliografía

1. Conclusiones	108
2. Recursos	110
2.1. Recursos para la búsqueda de sensores comerciales	110
2.2. Directorio de empresas	111
2.2.1. Empresas que fabrican sensores a medida	
2.2.2. Empresas fabricantes	
2.2.3. Empresas que ofrecen algunas soluciones muy específicas	
2.2.4. Algunos distribuidores	
2.3. Bibliografía.....	113
2.3.1. Recursos de texto destacados	
2.3.2. Recursos web	

INTRODUCCIÓN

Introducción, objetivos y descripción

INTRODUCCIÓN

Los sensores de fibra óptica representan una fracción del mercado, que cada vez va adquiriendo más importancia dentro del mercado de los sensores. Sin embargo estos sensores de fibra óptica comerciales no son más que una pequeña porción de todos los que sería posible fabricar y comercializar. Es por ello que muchas veces, al realizar una búsqueda general sobre “sensores de fibra óptica” en un buscador convencional, como por ejemplo Google, se obtienen bastantes resultados de artículos técnicos sobre sensores de fibra óptica que todavía no existen en el mercado actual.

El principal motivo de esta ausencia es que el mercado está cubierto por otro tipo de sensores: eléctricos, inductivos, capacitivos, etc. que brindan soluciones a diversos problemas, desde antes de que las diferentes tecnologías de fibra óptica estuvieran suficientemente desarrolladas como para ser explotadas. Por ello, es muy difícil desarrollar con sensores de fibra óptica todo un marco comercial, de producción en cadena y productos a precios competitivos, introducirlo en el mercado y salir bien parado. Es una misión demasiado arriesgada competir donde otras tecnologías ya están optimizadas al máximo para dar productos a un precio final muy competitivo. Es por consiguiente, entorno a aplicaciones donde los sensores de fibra óptica demuestran cualidades superiores y en nichos de aplicación que no eran cubiertos por ninguna otra tecnología, donde las soluciones comerciales de sensores de fibra óptica han sido desarrolladas. Estas ventajas serán más adelante comentadas en esta memoria.

También es importante mencionar la dificultad de encontrar una gran variedad de sensores de fibra óptica, de una manera rápida y sencilla. Lo que hace difícil poder determinar si esta tecnología es adecuada para una aplicación concreta y hacer una comparativa entre diferentes sensores, tanto de fibra óptica como de otras tecnologías. Esto puede observarse fácilmente realizando una búsqueda simple en internet, por ejemplo “sensores de temperatura” y comparando cuantas entradas de sensores de fibra óptica aparecen frente a otras tecnologías. Teniendo en cuenta que internet, a día de hoy, es la herramienta predilecta para todo, supone una desventaja para los sensores de fibra óptica.

Este problema puede ser debido, en gran medida, a que, como antes se ha mencionado, existen otras tecnologías con mayor desarrollo y un mayor número de empresas en el mercado, pero no es la única causa.

El hecho de que la mayoría de las soluciones de sensores de fibra óptica que se encuentran en una búsqueda en internet correspondan con sensores extrínsecos, de posición, generalmente para ser utilizados en cintas transportadoras, basados en un LED y un fotodetector, donde la fibra óptica solo se encarga de conducir la luz, le resta importancia a las verdaderas capacidades de la fibra óptica como sensor frente a otras tecnologías ante un posible usuario que no conoce este mercado.

Así mismo es importante mencionar que muchas veces para encontrar un tipo de sensor de fibra óptica es necesario conocer el nombre de la tecnología, no solo la aplicación e incluso algunas empresas importantes son difíciles de encontrar con eso. Estas empresas se encuentran a través de referencias en libros, revistas u otros recursos especializados en el tema, pero es muy complicado llegar a ellas a través de internet.

Todos estos problemas hacen que la tecnología de sensores de fibra óptica solo sea accesible a usuarios que conocen que existe y muchas veces la limita a las empresas más importantes o con mejor publicidad. Bien es cierto que dicha tecnología se destaca por ofrecer soluciones a aplicaciones concretas y cubrir nichos de aplicación, por lo que los clientes conocen de su existencia. Sin embargo es innegable, que un mayor darse a conocer de la tecnología, junto con la difusión de sus ventajas le proporcionaría un fuerte empujón a la fabricación y comercialización de sensores de fibra óptica, aumentando su variedad y mejorando significativamente su lugar en el mercado.

Por ello este proyecto pretende acercar y dar a conocer el estado del mercado de los sensores de fibra óptica a día de hoy, facilitando el acercamiento a cualquier posible cliente o persona interesada en el tema.

OBJETO DEL PROYECTO

Este proyecto consiste en un estudio del mercado de los sensores de fibra óptica a día de hoy. En él se analiza la oferta comercial y se explican los fundamentos tecnológicos de medida, realizando una función de consultoría.

Este proyecto tiene varios objetivos:

- Dar a conocer el estado del mercado de los sensores de fibra óptica a día de hoy.
- Hacer dos clasificaciones de los sensores que existen en el mercado. Una por aplicación orientada a un posible cliente y otra más académica por tecnología.

- Ofrecer una explicación sencilla del modo de funcionamiento de cada tecnología.
- Permitir y facilitar la comparación entre diferentes sensores y entre diferentes fabricantes.
- Dar a conocer las ventajas de los sensores de fibra óptica y destacar los entornos donde sobresalen frente a otras tecnologías.
- Dar a conocer las empresas fabricantes de sensores de fibra óptica más importantes.
- Facilitar a un cliente la labor de encontrar el sensor de fibra óptica que mejor se adapte a sus necesidades ofreciéndole comparativas entre sensores.
- Mostrar el estado real del mercado de sensores de fibra óptica a día de hoy, destacando sus principales características.
- Agilizar y simplificar cualquier acercamiento al mercado de los sensores de fibra óptica.
- Ofrecer un entorno sencillo de manejar y visualmente agradable, muy bien ordenado y clasificado donde se muestran los resultados.

Adicionalmente también se logra otro objetivo, que es el de acercar el campo de los sensores de fibra óptica al público en general y mostrarle el estado del mercado, de una manera sencilla. Esto posibilita que alguien que no sabe nada de sensores de fibra óptica se familiarice con ellos o pueda encontrar entre ellos una solución que le resuelva una necesidad concreta.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Los resultados del proyecto se han plasmado en una aplicación que pretende ser clara, ordenada, fácil de manejar y visualmente agradable.



Lenguaje de programación:

La aplicación ha sido programada en HTML y CSS. La elección de estos lenguajes ha sido debido a su versatilidad, ya que la aplicación puede colgarse en internet, si es lo que se decide, pero también puede abrirse desde cualquier ordenador, sin necesidad de un servidor local, que si sería necesario con otros lenguajes.

Otra de las ventajas fundamentales de estos lenguajes, es que son sencillos y los más utilizados en cuanto a desarrollo web. Por lo que la aplicación puede ser actualizada fácilmente tanto para uso particular como para ser colgada en internet.

Es obligatorio mencionar que aunque la aplicación funciona sin conexión a internet, se pierde mucha versatilidad en su uso, ya que los links a las páginas web de los fabricantes dejan de estar accesibles.

La aplicación

La aplicación consiste en un menú interactivo, que funciona con cualquier navegador, aun sin conexión a internet. Dicha aplicación esta optimizada para una resolución de 1280 x 800 para ser usada con el navegador Google Chrome.

Descripción de la aplicación

Aunque más adelante se explican y desarrollan los contenidos de la aplicación, en este apartado se va a hacer una descripción general desde otro ángulo.

Al abrir la aplicación se puede ver el siguiente menú:



Es el menú general, que coincide en contenidos con la barra de navegación creada en azul.

Desplegando este menú podemos encontrar:

- ***Características de los sensores de fibra óptica:***
 - *Donde son útiles:* Aquí se explica en que entornos y aplicaciones destacan los sensores de fibra óptica como solución comercial.
 - *Ventajas e inconvenientes:* Aquí se detallan las ventajas e inconvenientes que presentan los sensores de fibra óptica frente a otras tecnologías.
 - *Formas de clasificarlos:* En este apartado se explican las diferentes maneras en las que se pueden clasificar los sensores de fibra óptica.
- ***Clasificación de los sensores por aplicación:*** En este apartado se puede ver una clasificación de los sensores de fibra óptica según su aplicación. Este es el apartado fundamental de la aplicación y el que será desarrollado en la memoria más adelante.
- ***Clasificación de los sensores por tecnología:*** En este apartado se puede ver una clasificación de los sensores de fibra óptica según su tecnología. Este es el apartado de que destaca en segundo lugar por su importancia.
- ***Recursos***
 - *Recursos para la búsqueda de sensores:* Recursos que han facilitado la localización de una gran cantidad de sensores y empresas.
 - *Directorio de empresas:* Listado de empresas que han sido estudiadas para la realización de este proyecto.
 - *Bibliografía:* Bibliografía destacada y recursos web que han proporcionado la información teórica.

En cada aplicación, dentro del menú “Clasificación de los sensores por aplicación”, los sensores están ordenados por tecnología, puesto que cada tecnología crea sensores con diferentes características.

De la misma manera que en cada tecnología, dentro del menú “Clasificación de los sensores por tecnología”, los sensores se encuentran clasificados por aplicación, puesto que no tendría sentido compararlos de otra manera.



Como puede observarse en la imagen y es extensible a todos los submenús, dentro de cada familia de sensores se puede acceder a:

- **Principios físicos de la tecnología:** Donde se pretende explicar de una manera sencilla y simplificada los principios físicos que dan lugar a la tecnología de esos sensores.
- **Sensores:** Dentro de este apartado hay una tabla que permite comparar los sensores de determinado tipo.
- **Empresas fabricantes:** Hay ciertas empresas que fabrican cierto tipo de sensores a medida, según las necesidades del cliente, pero sin embargo no tienen modelos en el mercado. En esta sección se pueden consultar dichas empresas.

Puede observarse en la siguiente imagen un ejemplo de tabla comparativa de sensores, en la que están reflejadas las magnitudes fundamentales de dichos sensores, lo que permite compararlos. La tabla también incluye links a la empresa fabricante de cada sensor, un link a la instrumentación y links a los diferentes sensores.

Acelerómetros FBG



Inicio Características Clasificación por aplicación Clasificación por tecnología Recursos

Link al sensor

	Rango	Resolución	Sensibilidad	Rango Frec	Frec resonancia	Observaciones	Fabricante
os7100	-	-	16 pm/g	DC a 300 Hz	700 Hz	Máx shok: 100g	Microm Optics
FS6500	±10 g	12.5 µg/√Hz	75 pm/g	0 a 50 Hz	430 Hz	Sens transversal: < 2 %	FiberSensing
GS6500	±40 g	1 x 10 ₋₅ g	-	-	-	-	FiberSensing
Smart Accel 40g	±40 g	-	4 a 10 pm/g	0 a 1 kHz	> 1.3 kHz	-	SMART FIBRES
CATFISH-1000	±3 g	-	4 a 10 pm/g	0 a 1 kHz	> 1.3 kHz	-	NEWPORT sensors
Acceleration FBG	±1 g a ±50 g	≤ 1 % FS	-	0 Hz a 40 Hz o 0 Hz a 1000H	-	Diferentes rangos	Welltech instrument
BPS-700	±2 g	0.01 % FS	-	0 Hz a 40 Hz	-	-	IEOS
OEFAS-100	1 g a 2 g	< 0.1 % FS	≤ 1 % F.S.	-	-	-	O/E LAND

Instrumentación adicional

Tabla de comparativas

Link a la empresa fabricante

Link a la instrumentación de todos los sensores de este tipo

En estas tablas comparativas se ha intentado mantener los signos y las unidades que da el fabricante.

Es interesante mencionar que tanto al pulsar el link de una empresa como el de la instrumentación adicional, estas se abren en una nueva pestaña del navegador (o en otra ventana si el navegador no tuviera pestañas), mientras que los sensores se abren en la misma pestaña.

La instrumentación hace referencia a los instrumentos adicionales que son necesarios para que los sensores cumplan su función: interrogadores, software, acondicionadores de señal, etc.

En este proyecto la instrumentación de cada familia ha sido ordenada en una lista separada por empresas. En esta lista aparece el nombre de la empresa fabricante, que es un link que te lleva a la empresa. Dentro de la empresa los diferentes instrumentos, con su link a las hojas de características de cada uno y algún dato adicional.

Instrumentación para sensores Raman

sensornet

- **Cables sensores**

SURESIGHT™ SENSING CABLE

SureSight™ LT: -40°C a 85°C

SureSight™ MT: -40°C a 150°C

SureSight™ HT: -40°C a 300°C

FIBREDIP™ SENSING CABLE

Soporta temperaturas superiores a 300°C

Otros cables

Interpretación y análisis de datos

El software y los algoritmos para interpretar los datos los provee la empresa FloQuest.

FOS&S

- **Cable sensor**

En la siguiente imagen se puede apreciar el formato, con el cual se muestran todos los sensores explicado. Esta es una explicación descriptiva de cómo está diseñada la aplicación y como se debe navegar por ella. En los siguientes bloques se explica el contenido de la aplicación.

Fiberoptic magnetif-field sensor FOMAS

Sensor de Corriente eléctrica

- Trabaja sin contacto basándose en el efecto Faraday
- Ideal para procesos dependientes del tiempo
- Compuesto por una fibra especial que elimina la birrefringencia optimizando la medida del efecto de Faraday

Características destacables del sensor



Imagen del

Propiedades del sensor. Más ampliado que la tabla

Fiberoptic magnetif-field sensor FOMAS	
Rango	Desde 10 kA hasta 1000 kA (modificable según las necesidades del cliente)
Precisión	±1 %
Observaciones	Adaptable según las necesidades del usuario

Link a las características

Características

Este sensor puede adquirirse en:

Link a la empresa fabricante y otras donde se puede

fiberware

Botón para volver a la tabla de comparativas



Como simples comentarios mencionar:

Para los casos en que el mismo sensor sirve para medir más de una variable, temperatura y strain por ejemplo, mencionar que el botón hacia atrás está creado con una orden en javascript, que funciona de forma similar al botón de atrás del navegador. Por lo tanto si se ha abierto el sensor en una pestaña nueva no funciona, pero este no es el modo de funcionamiento pensado para la aplicación.

Cuando el fabricante proporciona las datasheets en formato pdf el link de la aplicación se llama “Hojas de características”, mientras que si solo son accesibles a través de su web o están mejor explicadas en ella, el link en la aplicación se llama “Características”. Es importante señalarlo porque las “Características” no son accesibles en un ordenador sin conexión a internet.

De nuevo, los links a las empresas donde se pueden comprar estos sensores, las hojas de características y la instrumentación adicional (que en este caso concreto no aparece porque no tiene) se abren en una nueva pestaña.

BLOQUE I:

Características y principios físicos de funcionamiento

1. Características de los sensores de fibra óptica

1.1. Entornos en los que son útiles los sensores de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica pueden tener utilidad en una amplia variedad de entornos, pero es importante destacar que en algunos entornos se adaptan mejor y ofrecen ventajas sobre otras tecnologías. Estas son las áreas donde destacan:

- Medidas y monitorización en ambientes con fuerte radiación electromagnética: Transformadores, alternadores, motores eléctricos, hornos inductivos y de microondas, resonancias magnéticas, líneas de alta, media y baja tensión, etc.
- Áreas, lugares y componentes en los que la radiación nuclear puede ser perjudicial para la salud, como en centrales nucleares.
- En el sector aeroespacial y el de transporte, debido a su gran ancho de banda, peso ligero, inmunidad a los campos electromagnéticos y a que son elementos pasivos y dieléctricos (no contaminan electromagnéticamente). Son utilizados en satélites y en otras aplicaciones aeroespaciales, también en algunos modelos de aircraft, tanto para la red de comunicaciones como para los dispositivos sensores.
- En medicina y biotecnología para realizar mediciones directamente dentro del cuerpo, como presión, composición y pH de la sangre, temperatura, aplicaciones quirúrgicas, etc. Destaca su utilización en radioterapia gracias a su inmunidad electromagnética y a que son dispositivos pasivos y dieléctricos que no producen campos electromagnéticos.
- Aplicaciones que requieren mucha sensibilidad a las variaciones del objeto, como los acelerómetros, hidrófonos y giroscopios.
- Medidas distribuidas o cuasi-distribuidas de diferentes variables: temperatura, presión, strain, etc. Entre otras áreas donde es útil esta tecnología están las empresas petrolíferas; la ingeniería civil, geotérmica y de estructuras; la construcción, para el monitoreo de estructuras; para la monitorización en bobinas del alternador en las grandes máquinas de generación eléctrica; aeronáutica, etc.

Esta es la utilidad estrella de los sensores de fibra óptica, donde otras tecnologías no pueden competir eficientemente.

- En girocompases y sistemas de navegación, formados por giroscopios de fibra óptica, generalmente integrados con otros dispositivos MEMS o GPS, para la navegación y posicionamiento, tanto aéreo como náutico.

De todas estas áreas en la que más destaca la utilización de sensores de fibra óptica es en la industria petrolera y de gas natural. Desde la extracción, hasta el transporte del petróleo o el gas por oleoductos y gaseoductos. Esto es debido a que gracias a las tecnologías de fibra óptica, se puede monitorizar la temperatura, el strain y la presión de forma distribuida o cuasi-distribuida. Además los sensores de fibra óptica son pasivos y dieléctricos, lo que es ideal para un entorno potencialmente explosivo. Además existen recubrimientos que soportan atmosferas ricas en hidrógeno para fibras ópticas. Se puede decir, que en este campo los sensores de fibra óptica no tiene casi competidores salvo algún sistema sonar.

1.2. Ventajas e inconvenientes de los sensores de fibra óptica

Ventajas

- Están fabricados con materiales dieléctricos, por lo que son inmunes a las interferencias electromagnéticas, lo que los hace ideales en lugares en los que las interferencias electromagnéticas son el mayor inconveniente para otro tipo de sensores, por ejemplo durante una resonancia magnética.
- Son sensores pasivos y dieléctricos, lo que permite su utilización en atmósferas explosivas y en lugares sensibles a interferencias electromagnéticas, como por ejemplo en la industria aeroespacial.
- Inmunes en atmosferas químicas, pudiendo ser utilizados en ambientes hostiles, atmosferas corrosivas o ricas en hidrógeno, como es el caso de los gaseoductos y oleoductos.

- La biocompatibilidad, fiabilidad y la naturaleza no intrusiva de la fibra, junto con la posibilidad de crear sensores muy pequeños, los hacen ideales para aplicaciones médicas, tanto para medición directa dentro del cuerpo como para ser integrados en otros dispositivos médicos.
- Pueden soportar muy altas temperaturas, gracias al alto punto de fusión de la fibra y a recubrimientos especiales.
- Permite crear transductores ligeros, gracias al tamaño y naturaleza de las fibras ópticas. Esta propiedad se vuelve interesante cuando se integran las tecnologías de fibra óptica y optoelectrónica.
- La distancia entre el punto de medida y la unidad de tratamiento de señal puede ser grande, incluso kilómetros. Las excelentes propiedades de la fibra óptica como canal transmisor permiten que la unidad de procesamiento pueda estar lejos del punto de medida si este está en un ambiente hostil.
- La sensibilidad, el rango dinámico y la resolución son potencialmente superiores que en los sensores convencionales. Utilizando técnicas de interferometría se puede llegar a la máxima sensibilidad, factor fundamental a la hora de encontrar nichos de aplicación.
- Un gran número de sensores puede ser armoniosamente integrados en el dominio óptico, utilizando técnicas de multiplexación e interrogación, debido a las excelentes características transmisoras de la fibra óptica.
- La posibilidad de utilizar la fibra óptica misma como un transductor distribuido es una de las ventajas sobresalientes de los sensores de fibra óptica. Esto es posible mediante técnicas que permiten conocer el estado de una fibra óptica en toda su longitud y da lugar a cierta variedad de sensores distribuidos y cuasi-distribuidos. Esta es sin duda una característica que otras tecnologías no pueden igualar de forma eficiente.

Inconvenientes

- Algunos sensores de fibra óptica pueden ser demasiado sensibles a más de un estímulo, lo cual puede repercutir en errores de medida o a cierta dificultad para saber de qué tipo es el estímulo. Pongamos el caso, por ejemplo, de los sensores FBG y los Brillouin que son sensibles a la temperatura y al strain. Por suerte este problema se soluciona gracias a los algoritmos de análisis de datos y generalmente porque se puede integrar más de una fibra óptica sensora con diferentes recubrimientos y configuraciones, que permiten separar con exactitud las medidas, aumentar la precisión y eliminar errores.
- El precio de los sensores de fibra óptica es, en muchos casos, superior a otros fabricados con otras tecnologías. Esto es debido al costo de los componentes, que en la mayoría de los casos están fabricados a medida o en pequeñas series. Este inconveniente es típico en una tecnología que se está introduciendo en un mercado, pero ya cuenta con soluciones. A pesar de que este inconveniente cada vez tiene menos peso, explica perfectamente que no exista tanta variedad de sensores de fibra óptica en el mercado como sería tecnológicamente posible. También muestra como muchos de los sensores de fibra óptica del mercado ofrecen soluciones en ciertos entornos donde otras tecnologías flaquean, como la monitorización distribuida o la inmunidad a campos electromagnéticos, por mencionar alguna.

1.3. Formas de clasificar los sensores de fibra óptica

Puesto que gran parte del proyecto ha consistido en estudiar y clasificar los sensores de fibra óptica que existen en el mercado, es importante comentar las posibles clasificaciones de sensores de fibra óptica que existen.

Clasificación por aplicación

La clasificación se realiza según la aplicación que va a tener el sensor. Esta es una clasificación de mercado, útil para un usuario que necesite un sensor para una aplicación concreta. En ella se pueden distinguir los siguientes grupos de sensores:

Acelerómetros	Sensores de forma
Giroscopios	Sensores de inclinación
Hidrófonos	Sensores de índice de refracción
Sensores de carga	Sensores de presión
Sensores de corriente	Sensores de strain
Sensores de desplazamiento	Sensores de temperatura
Sensores de detección o posición	Sensores químicos

Clasificación por tecnología

La clasificación se realiza según el principio físico que permite crear sensores con esa tecnología. Esta es una clasificación académica. En ella se pueden distinguir los siguientes grupos de sensores:

Efecto de Faraday	Reflexión
Efecto Sagnac	Scattering de Brillouin
Fiber Bragg grating (FBG)	Scattering de Raman
Fluorescencia óptica	Scattering de Rayleigh
Gallium Arsenide (GaAs)	Termometría infrarroja
Interferometría	Transmisión-recepción
Microcurvaturas	

Clasificación según la naturaleza del transductor

Es la forma más habitual de clasificar los sensores de fibra óptica, en la que existen dos grupos:

Extrínsecos: Sensores en los que la fibra óptica no es el elemento sensor, si no que se encarga de transportar la luz desde la fuente al elemento sensor y de este al analizador. Es en el elemento sensor donde se produce la interacción con el medio, alterando las propiedades de la luz en función de la variable a medir. En estos sensores encontramos entre otros: Sensores basados en transmisión-recepción, reflexión, fluorescencia, termometría infrarroja, etc.

Intrínsecos: Sensores en los que la propia fibra óptica es el elemento sensor y de referencia. Es en la fibra óptica donde se produce la interacción con el medio modificando las propiedades de la luz en función de la variable a medir. En estos sensores encontramos entre otros: Sensores basados en FBG, microcurvaturas, scattering, etc.

Clasificación según la distribución espacial de la medida

Es la forma de clasificar los sensores según su forma de medir

Puntual: Cuando el sensor realiza una sola medida en un punto. Generalmente el punto sensor está en un extremo de la sonda. Un ejemplo de esto son los sensores de GaAs o los interferómetros Fabry-Perot.

Integrado: Cuando la medida es la integración de todas las variaciones que se han producido a lo largo de la zona sensora, con un único resultado. Los sensores de corriente por efecto Faraday son un ejemplo de esto.

Cuasi-distribuido: Cuando un sistema tiene la capacidad de medir diferentes valores de la variable en diferentes puntos discretos a lo largo de una fibra óptica. Los sensores que destacan en este apartado son los sensores FBG, donde es posible integrar varios sensores dentro de la misma fibra óptica.

Distribuido: Los sensores que pueden medir una variable en todos los puntos a lo largo de una fibra óptica se llaman distribuidos. A la mínima distancia con la que se pueden diferenciar dos eventos se le llama resolución espacial. En este apartado destacan los sensores que funcionan por scattering de Raman, Rayleigh o Brillouin.

Clasificación por dominio y tipo de magnitud

Es una forma clásica de clasificar los sensores. Es una clasificación académica más que comercial, pero no tan lejos del mercado como la clasificación por tecnología.

Mecánicos: Sensores que miden magnitudes como la vibración, la presión, el desplazamiento, la fuerza, la velocidad, la aceleración o el strain.

Térmicos: Sensores que miden temperatura.

Electromagnéticos: Sensores que permiten medir campos eléctricos, campos magnéticos o corriente eléctrica.

Sensores de radiación: Sensores que permiten medir radiación X o radiación nuclear.

Sensores de composición química: Sensores que permiten medir la concentración de un elemento químico en un medio, por ejemplo la cantidad de oxígeno en un líquido.

Sensores de flujo y turbulencia de fluidos: Sensores que miden estas características en fluidos.

Sensores que miden magnitudes habituales en el campo de la biomedicina: Sensores que miden magnitudes como la temperatura, presión intracraneal, acidez, concentración de oxígeno en sangre, etc.

Clasificación por tipo de modulación

Es una forma de clasificar los sensores de acuerdo al tipo de modulación que se genera en la señal óptica.

Amplitud o Intensidad: Sensores en los que la medida se realiza comparando la intensidad recibida con la transmitida.

Fase o interferometría: Sensores en los que la variable a medir causa una modulación en la fase de la señal transmitida.

Polarimétrico: Sensores en los que la variable a medir causa una modulación en la polarización de la señal transmitida.

Espectroscópicos: Sensores en los que la variable a medir modula el espectro de la señal transmitida.

1.3.1. Formas de clasificar los sensores de fibra óptica dentro de la aplicación

Dentro de la aplicación sobre la que está basada esta memoria, los sensores han sido clasificados según su aplicación y según su tecnología. La clasificación por aplicación será ampliamente detallada en esta memoria más adelante. La clasificación por tecnología no se desarrollara para evitar repeticiones innecesarias en la memoria.

La clasificación según la tecnología quedaría así:

- **Fiber Bragg Grating (FBG)**

- MEDIDAS PUNTUALES**

- *Sensores de temperatura*
 - *Sensores*
- *Sensores de strain*
 - *Sensores*
- **Acelerómetros**
 - *Sensores*
- **Sensores de presión**
 - *Sensores*

- **Sensores de desplazamiento**
 - *Sensores*
- *Principios físicos de la tecnología*
- *Empresas fabricantes*

MEDIDAS DISTRIBUIDAS

- *Sensores de temperatura y strain*
 - *Sensores*
- *Sensor de forma*
 - *Sensores*
- *Principios físicos de la tecnología*

- **Scattering de Raman**

- *Sensor de temperatura*
 - *Principios físicos de la tecnología*
 - *Sensores*
 - *Empresas fabricantes*

- **Scattering de Brillouin**

- *Sensores de temperatura*
 - *Sensores*
- *Sensores de strain*
 - *Sensores*
- *Principios físicos de la tecnología*
- *Empresas fabricantes*

- **Scattering de Rayleigh**

- *Sensores de temperatura y strain*
 - *Principios físicos de la tecnología*
 - *Sensores*
 - *Empresas fabricantes*

- **Interferometría**

- FABRY-PEROT o WLPI**

- *Sensores de temperatura*
 - *Sensores*
 - *Sensores de strain*
 - *Sensores*
 - **Sensores de presión**
 - *Sensores*
 - **Sensores de desplazamiento**
 - *Sensores*
 - **Sensores de índice de refracción**
 - *Sensores*
 - *Principios físicos de la tecnología*

- BAJA COHERENCIA**

- *Sensores de strain*
 - *Sensores*
 - *Principios físicos de la tecnología*

- BAJA COHERENCIA**

- *Hidrófonos*

- **Fluorescencia óptica**

- *Sensores de temperatura*
 - *Sensores*
 - *Sensores químicos*
 - *Sensores*
 - *Principios físicos de la tecnología*

- **Efecto Faraday**

- *Sensores de corriente*
 - *Principios físicos de la tecnología*
 - *Sensores*

- **Efecto Sagnac**

- ***Giroscopios***
 - *Principios físicos de la tecnología*
 - *Sensores*
 - *Girocompases*

- **Arseniuro de galio (GaAs)**
 - ***Sensores de temperatura***
 - *Principios físicos de la tecnología*
 - *Sensores*
 - *Sondas*

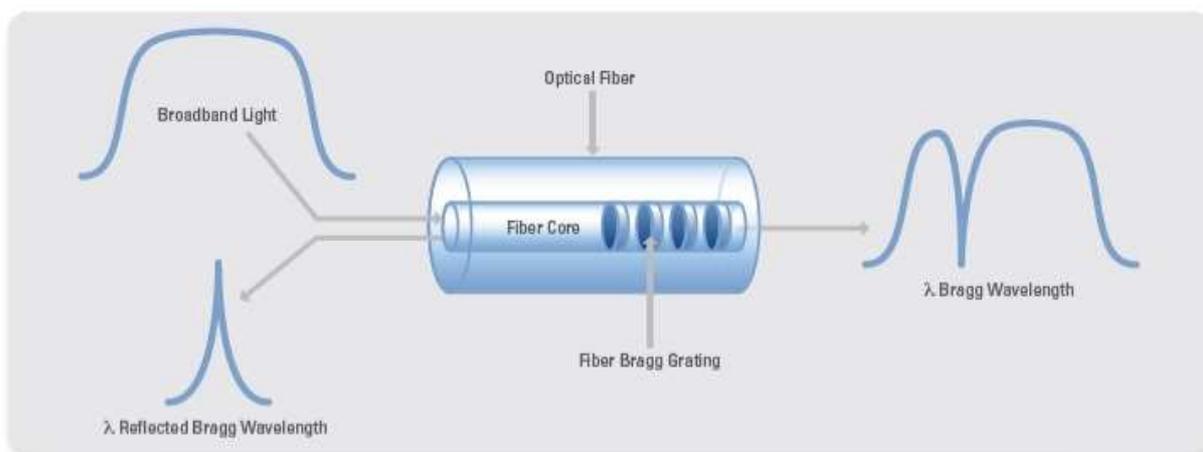
- **Otros**

2. Principios físicos de funcionamiento

2.1. Fiber Bragg Grating (FBG)

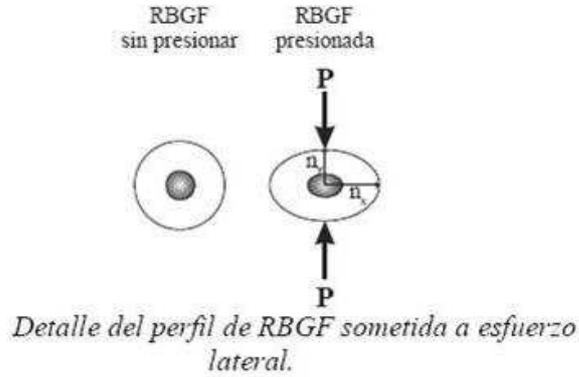
Una red de Bragg es un pequeño segmento de fibra óptica, en el cual se ha introducido mediante exposición parcial de la fibra a luz ultravioleta, una perturbación o variación periódica del índice de refracción a lo largo de su núcleo. Esta perturbación refleja longitudes de onda particulares y transmite todas las demás, lo que genera su aplicabilidad dual: como un filtro óptico en línea para bloquear ciertas longitudes de onda, o como un reflector de longitudes de onda específicas.

Esta reflexión es realmente un pico espectral muy angosto, llamado longitud de onda de Bragg (λ_B), perteneciente a la radiación incidente. Esta respuesta depende de dos factores: el período de la perturbación (Λ , red de índices de refracción) y el índice de refracción efectivo de la fibra (n_{eff}). Cualquier cambio en alguno o ambos parámetros, modifica el espectro reflejado. Estos cambios dependen a su vez de los llamados esfuerzos laterales (temperatura y strain). De ahí que los FBG-s puedan ser usados como sensores de fibra óptica.



Cuando una red de Bragg es sometida a esfuerzos laterales, se produce un fenómeno llamado birrefringencia. Dicho fenómeno consiste en una doble refracción, un desdoblamiento del rayo de luz en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí.

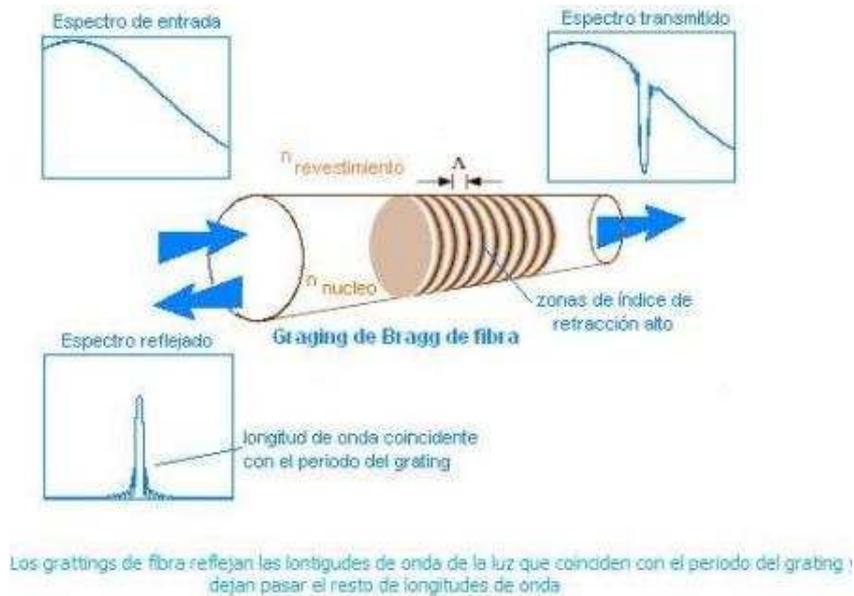
Esto obedece a la diferencia de los índices de refracción entre los ejes correspondientes a la dirección de aplicación del esfuerzo y a la dirección perpendicular a la misma.



Todo lo anterior genera un corrimiento de la longitud de onda de Bragg, distinto para dichas direcciones. La separación en longitud de onda de ambas reflexiones polarizadas respecto de la posición no perturbada, es proporcional al esfuerzo aplicado.

Cuando una presión lateral es aplicada, el perfil circular de la fibra se deforma elípticamente.

El eje sobre el que se aplica la presión se comprime (eje Y) y se expande en la dirección ortogonal (eje X). En la dirección de compresión aumenta el índice de refracción (n_y), mientras que en la dirección de expansión disminuye (n_x). De esta manera se induce una birrefringencia. En consecuencia la red presenta dos ejes ortogonales con diferente constante de propagación.

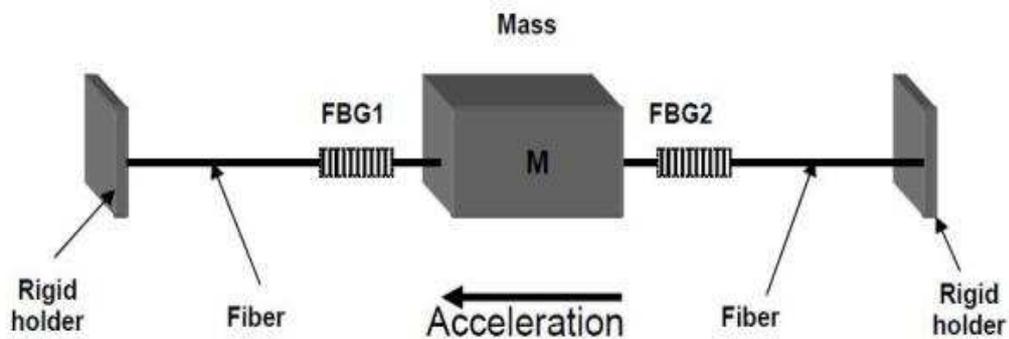


λ_B depende del índice de refracción efectivo de la fibra y del período de la perturbación (Λ). Esta relación se rige por la siguiente ecuación:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

Esa longitud de onda cambiará de manera proporcional a una tensión ejercida sobre la fibra o a un cambio de temperatura, puesto que el cambio de temperatura varía el período de la perturbación (Λ).

Gracias a estos principios tecnológicos y a la dependencia de las FBG-s en cuanto a temperatura y strain, se pueden fabricar una amplia variedad de sensores de fibra óptica. Sensores de temperatura, strain, presión, desplazamiento, inclinación y acelerómetros entre otros. Salvo en el caso de los sensores de temperatura, todos los demás están basados en variar las propiedades de strain del FBG. Por ejemplo los acelerómetros están compuestos por una masa unida a un muelle que a la vez está unido a una fibra con FBG.



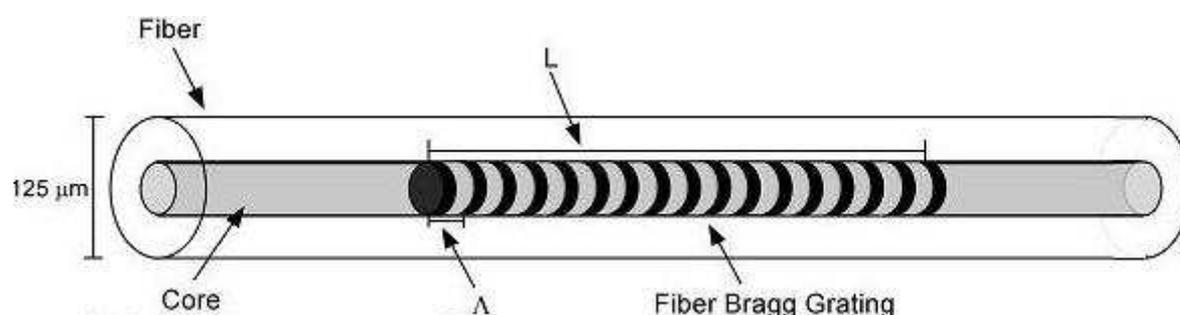
Dado que son ambas variables, temperatura y strain, las que afectan a la respuesta del FBG, se intenta aislar una de la otra dependiendo de la magnitud a medir, incluso en muchos sensores basados en strain se incluye una segunda fibra sensora que permite compensar las variaciones de temperatura.

Un interrogador es conectado en uno de los extremos de la fibra óptica. El interrogador está compuesto por una fuente de banda ancha, que emite luz en una amplia gama de frecuencias; un acoplador, que separa la señal enviada y la reflejada y un detector CCD o policromador, que permite analizar las reflexiones de uno o varios sensores FBG.

Esta tecnología también permite integrar más de un sensor en la misma fibra óptica, creando así sensores cuasi-distribuidos que permiten obtener medidas en más de un punto del recorrido de la fibra óptica.

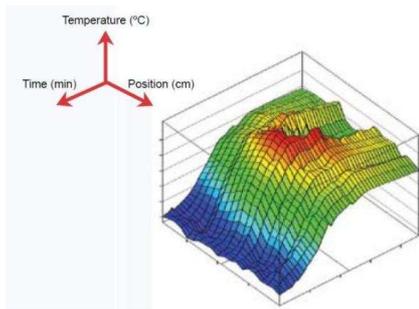
2.2. Sensores FBG distribuidos

Una rejilla Bragg de fibra (FBG) es un cambio periódico de índice de refracción en el núcleo de una fibra óptica, creado mediante un proceso de grabado láser. Un FBG se crea mediante la exposición del núcleo de una fibra óptica a un patrón periódico de luz ultravioleta, formando un cambio en el índice de refracción del núcleo de la fibra. Este patrón periódico actúa como una rejilla de difracción con una respuesta espectral que depende del perfil de índice de refracción de la rejilla. El perfil del índice de refracción de la rejilla se ve afectado por la temperatura y el índice de refracción efectivo de la fibra óptica por el strain, modificando su respuesta espectral y permitiendo su utilización como sensor al someter a la fibra a dichos factores.



La tecnología FBG distribuida funciona mediante un OFDR. Dicho OFDR permite interrogar simultáneamente miles de sensores FBG en una sola fibra. Este proceso se realiza mediante interferometría de salto de longitud de onda, gracias a un láser continuamente sintonizable.

La luz reflejada de estos FBG-s es detectada, demodulada y analizada. Debido a que la diferencia de camino entre el reflector de referencia y cada FBG es diferente, la señal reflejada de cada FBG es modulada con una única frecuencia que depende directamente de la localización de dicho FBG en la fibra.

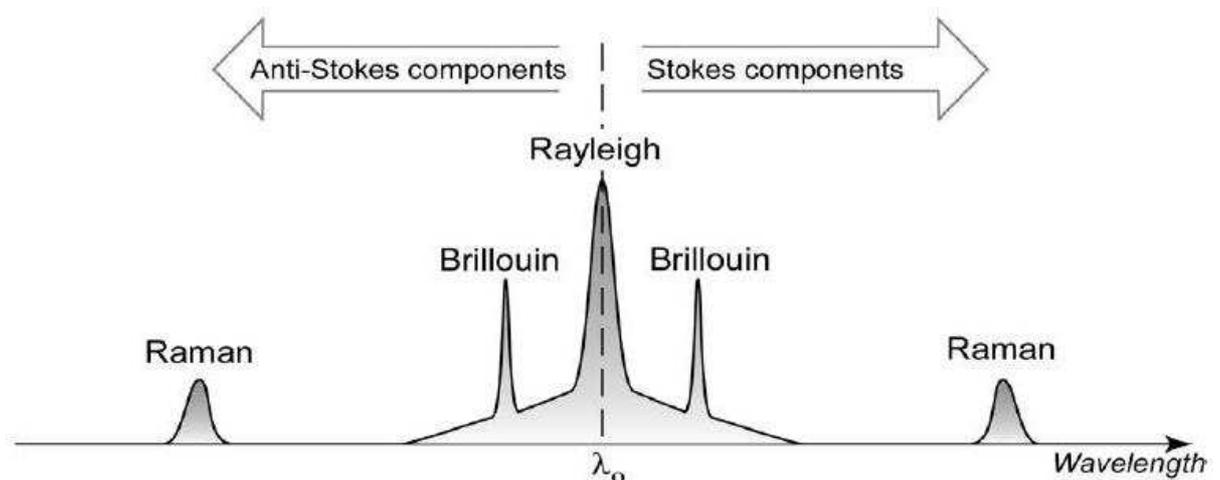


A diferencia de otras técnicas de reflectometría, los FBG-s de la fibra pueden tener y tienen superposición de espectros. Esto permite la producción en masa de arrays de sensores e incrementa el número de FBG-s que pueden ser multiplexados en una sola fibra.

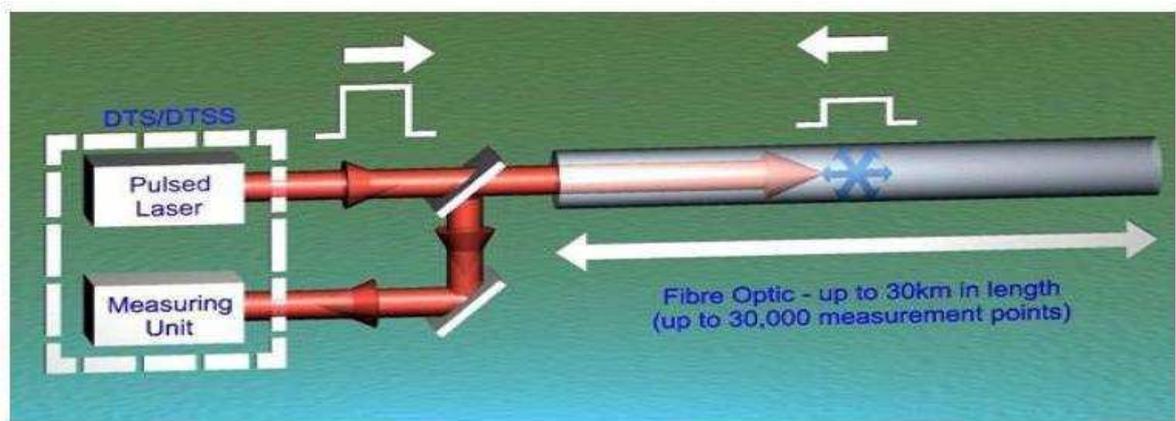
Gracias a esta tecnología, aunque con diferentes dispositivos que el sensor de temperatura y strain, también funciona el sensor de forma que ofrece Luna Technologies.

2.3. Scattering de Raman

La dispersión Raman o Scattering de Raman es una dispersión inelástica de un fotón. Cuando la luz es dispersada de un átomo o molécula, la mayoría de los fotones son dispersados elásticamente (Dispersión de Rayleigh). Los fotones dispersados tienen la misma energía y (frecuencia) y, por lo tanto, la misma longitud de onda que los fotones incidentes. Sin embargo, una pequeña fracción de la luz es dispersada ópticamente a frecuencias diferentes, mayormente inferiores, que la frecuencia de los fotones incidentes. Se le denomina dispersión Stokes cuando la molécula con la que choca el fotón absorbe la energía. El fotón resultante es de inferior frecuencia y genera una línea de Stokes. Se le denomina dispersión anti-Stokes cuando la molécula con la que choca el fotón pierde energía. Los fotones incidentes son desplazados a frecuencias más elevadas del espectro, y generan por lo tanto una línea que se denomina anti-Stokes.



Se transmite un pulso de luz por una fibra óptica, debido a impurezas y defectos estructurales, se producen diferentes dispersiones de ese pulso en la fibra óptica, las cuales se reflejan en parte. Una parte de esta dispersión reflejada es la dispersión Raman. Esta dispersión varía en función de la temperatura de una forma muy precisa. Es esta relación junto con el tiempo que ha viajado el pulso la que determina la temperatura en un punto dado. Esto permite crear un sensor distribuido analizando las señales recibidas con un OTDR.



En caso de que se requiera una resolución espacial muy alta, se necesita un pulso muy estrecho, lo cual implica un nivel muy bajo de Scattering que ha de ser detectado con un filtro más ancho, por el que pasará más ruido. Esto se puede solucionar utilizando optical frequency-domain reflectometry (OFDR).

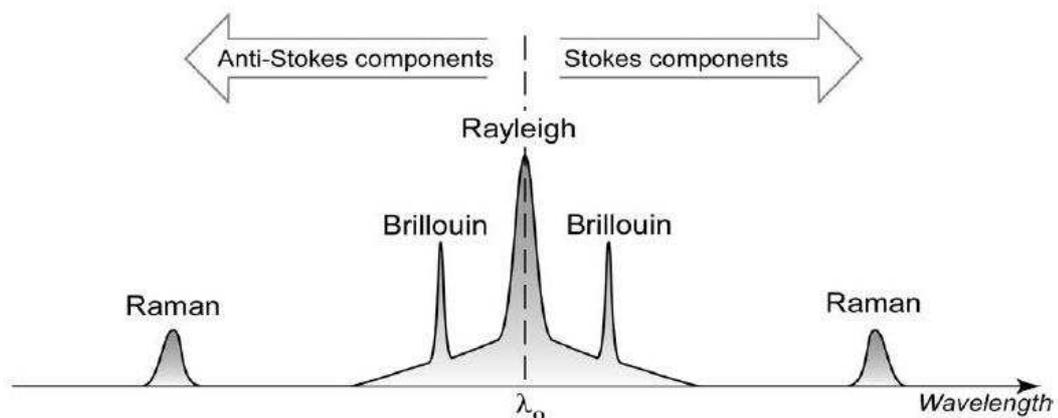
En lugar de un pulso se transmite una señal modulada y se detectan variaciones de fase, pero requiere detección coherente aumentando mucho el precio.

La dispersión Raman es de todas las dispersiones la que menos potencia tiene, por ello es común utilizar fibra multimodo en los sensores Raman para poder acoplar una mayor potencia en el pulso de entrada.

2.4. Scattering de Rayleigh

La dispersión de Rayleigh es una dispersión elástica de la luz o cualquier otra radiación electromagnética por partículas mucho menores que la longitud de onda de los fotones dispersados. Ocurre cuando la luz viaja por sólidos o líquidos transparentes y en gases.

Un fotón que viaja por la fibra óptica es absorbido por una molécula creando otro fotón con la misma energía y longitud de onda.

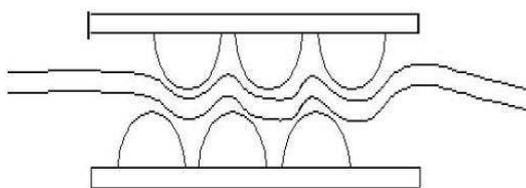


Cuando la luz viaja en una fibra óptica pierde potencia debido al scattering de Rayleigh, que se crea por variaciones aleatorias en el índice de refracción del núcleo de la fibra. Estas variaciones son debidas a impurezas y defectos estructurales en la red cristalina de la fibra óptica. Una parte de la luz es dispersada en sentido contrario a la dirección de propagación hacia la fuente.

Cuando un pulso estrecho es lanzado en una fibra óptica, monitorizando la variación en intensidad del back-scatter de Rayleigh (la dispersión Rayleigh que vuelve hacia la fuente), se pueden determinar las variaciones en el coeficiente de scattering de la fibra o la atenuación.

Dado que el coeficiente de scattering reflejado en un lugar concreto indica el estado de la fibra en dicho punto, se puede medir y localizar las perturbaciones externas y el estado de la fibra.

Esto permite crear sensores tanto de temperatura como de strain, ya que ambos parámetros afectan al estado de la fibra.



Sabiendo que el nivel de scattering de Rayleigh en la fibra es el factor que permite medir los eventos que ocurren en ella, a veces se manipula el recubrimiento de la fibra óptica para aumentar su atenuación, aumentando así su nivel de back-scatter de Rayleigh. Esto se puede realizar con cubiertas que provocan a la fibra micro curvaturas o con cubiertas hidrófilas que atraen el agua, para que la fibra óptica esté más presionada y sea más sensible, por mencionar dos ejemplos.

La señal de back-scatter es analizada con un OTDR.

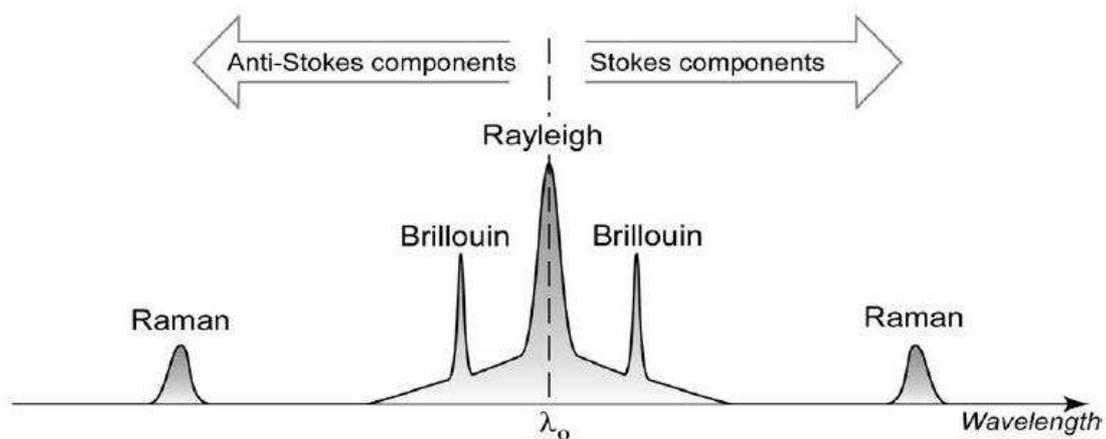
En caso de que se requiera una resolución espacial muy alta, se necesita un pulso muy estrecho, lo cual implica un nivel muy bajo de Scattering que ha de ser detectado con un filtro más ancho, por el que pasará más ruido. Esto se puede solucionar utilizando optical frequency-domain reflectometry (OFDR).

En lugar de un pulso se transmite una señal modulada y se detectan variaciones de fase, pero requiere detección coherente aumentando mucho el precio.

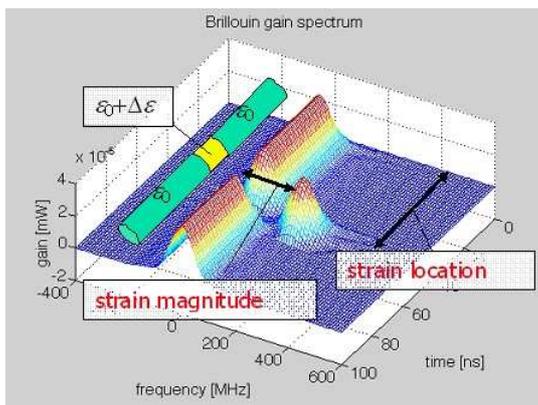
2.5. Scattering de Brillouin

La dispersión Brillouin ocurre cuando un medio, en este caso la fibra óptica, interactúa con variaciones de densidad óptica dependientes del tiempo y cambia su energía (frecuencia) y su camino. Dichas variaciones son generalmente causadas por fonones, al menos para lo que a los sensores de fibra óptica les concierne. Un fonón se crea cuando la energía fotón es absorbida por una molécula creando una vibración en la red cristalina del medio, una onda acústica.

Estas ondas acústicas crean un cambio en el índice de refracción, creando una red de difracción. Dicha red de difracción variable (porque es una onda acústica) desvía parte de la luz incidente. Mientras la onda acústica viaja por la fibra la luz está sujeta a efecto doppler, por lo que su frecuencia varía en función.



La dispersión de Brillouin ocurre debido a vibraciones acústicas estimuladas en la fibra óptica cuando un pulso de luz es lanzado a través de la fibra. Dichas vibraciones acústicas generan una onda de luz, debido a las reflexiones, que drena energía del pulso transmitido. Esta señal generada se llama Scattering de Brillouin.



Ocurre un salto de frecuencia entre el pulso transmitido y la dispersión ocurrida, que en general es de 10 GHz, haciendo que se cumpla el principio de conservación de energía. Dicho salto de frecuencia es sensible a la temperatura y al strain, (ya que estos dos factores cambian la velocidad de la señal acústica) lo que hace a esta tecnología ideal para construir sensores distribuidos.

En particular el salto de frecuencia depende de la magnitud del strain longitudinal. Bajo diferentes condiciones de strain la onda acústica inducida por el fotón es diferente.

Esto permite crear un sensor distribuido analizando las señales recibidas con un OTDR.

En caso de que se requiera una resolución espacial muy alta, se necesita un pulso muy estrecho, lo cual implica un nivel muy bajo de Scattering que ha de ser detectado con un filtro más ancho, por el que pasará más ruido. Esto se puede solucionar utilizando optical frequency-domain reflectometry (OFDR).

En lugar de un pulso se transmite una señal modulada y se detectan variaciones de fase, pero requiere detección coherente aumentando mucho el precio.

Una de las ventajas principales de las técnicas de Scattering de Brillouin es que permiten utilizar fibra monomodo estándar de telecomunicaciones para realizar las medidas. Esto abarata el coste e incluso permite utilizar tendidos de fibras ya existentes.

2.6. Interferometría Fabry-Perot

La cavidad resonante Fabry-Perot consiste en 2 espejos paralelos altamente reflectantes. Al espacio que los separa se le llama longitud de la cavidad. Cuando un haz de luz entra en la cavidad, los fotones se reflejan de un lado a otro, entre los 2 espejos. Algunas frecuencias pueden salir de esta cavidad. El interferómetro Fabry-Perot se comporta como un filtro de frecuencia, cuyas frecuencias autorizadas dependen de la longitud de la cavidad.

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}$$

El principio de funcionamiento de estos sensores es la interferometría. Miden la diferencia de camino (que se traduce en una diferencia de fase) entre el haz transmitido y el reflejado. Como la instrumentación de sensores de fibra óptica no acostumbra a utilizar detectores coherentes, esta diferencia de fase se traduce en una variación de la intensidad.

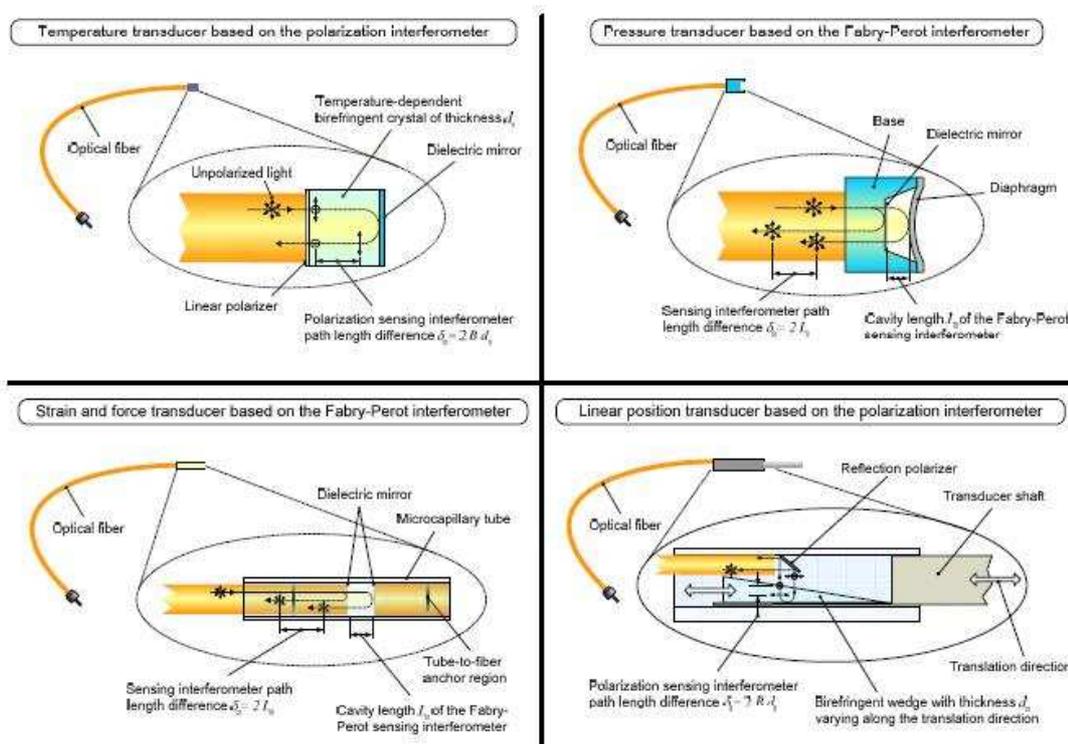
En el caso de los sensores basados en Fabry-Perot, la diferencia de camino depende de la longitud de la cavidad resonante y de reflectancia de los espejos.

$$I = \frac{I_0}{1 + F \sin^2 \frac{\Phi}{2}} \quad \text{con} \quad F = \frac{4R}{(1-R)^2}$$

Siendo Φ el retardo de fase de ida y vuelta y R la reflectancia de los espejos

Los sensores que funcionan gracias a esta tecnología están compuestos de un acondicionador de señal y una sonda. El acondicionador de señal es el que se encarga de emitir un haz de luz y analizar la señal reflejada, mientras que la sonda está compuesta por un cable de fibra óptica, adecuadamente recubierta según la aplicación, y una cavidad

Fabry-Perot en el extremo. El funcionamiento de estos sensores se basa en modificar las propiedades de la cavidad Fabry-Perot (FPI).



La modificación de la cavidad se hace dependiente de la magnitud a medir. En el caso de los sensores de temperatura los espejos están fabricados de un material cuya reflectancia varía en función de la temperatura. Para los sensores de presión un diafragma modifica la longitud de la cavidad. En los sensores de strain la cavidad es modificada también por el strain. Modificar las propiedades de la cavidad en función de la magnitud a medir es la clave de esta tecnología.

Para realizar la medición basta con analizar diferencia de fase, entre la onda transmitida y la reflejada, a través de la intensidad e interpretar el resultado.

Como caso especial citar la empresa OpSens en su tecnología White Light Polarization Interferometry (WLPI), que utiliza interferometría de baja coherencia para realizar la medición de diferencia de caminos en sus sensores Fabry-Perot.

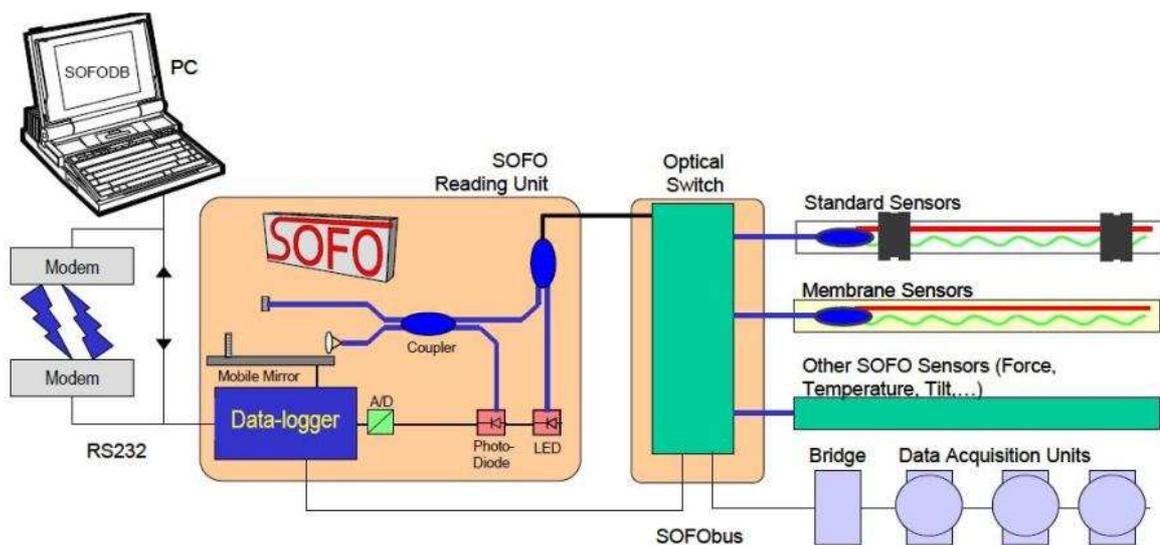
2.7. Interferometría de baja coherencia

El sistema SOFO de SMARTEC se basa en el principio de interferometría de baja coherencia. La emisión infrarroja de un diodo LED es transmitida a través de una fibra monomodo estándar y dirigida, a través de un acoplador hacia dos fibras, que pueden estar incrustadas o montadas sobre la estructura que va a ser monitorizada.

Una fibra está en contacto con la estructura, por lo que sufre las mismas deformaciones que esta, tanto en acortamiento como en elongación. Una segunda fibra de referencia es instalada en la misma tubería pero sin contacto con la estructura, libre.

Espejos, colocados al final de las fibras, reflejan la luz de nuevo al acoplador, donde se recombinan los dos haces y los dirigen hacia el analizador.

El mismo proceso se realiza con dos líneas de fibra y puede introducirse una diferencia de camino conocida entre los dos haces por medio de un espejo móvil.



Al mover el espejo, una señal modulada se obtiene en el fotodiodo solamente cuando la diferencia de longitud entre las fibras en el analizador compensa la diferencia de longitud entre las fibras de la estructura mejor que la longitud de coherencia de la fuente (en nuestro caso, algunos cientos de milímetros).

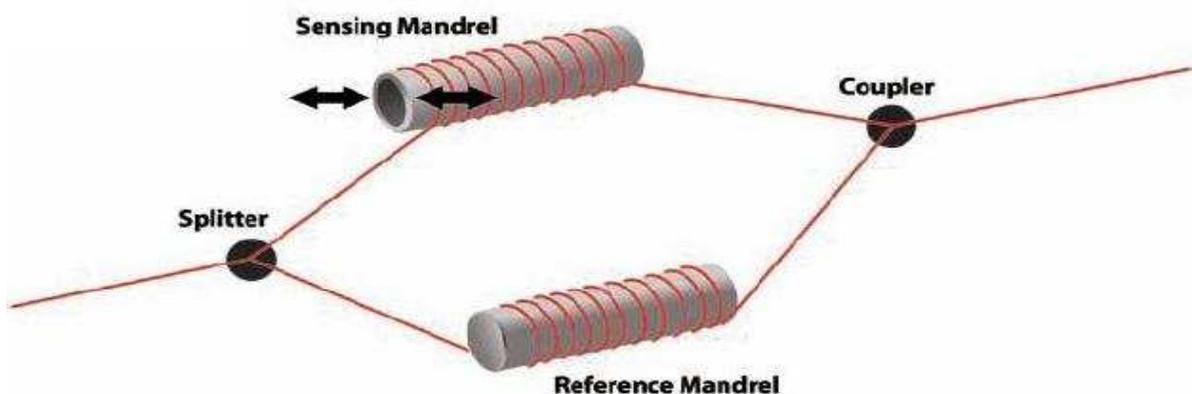
Cada medición da una nueva posición de compensación reflejando la deformación que sufre la estructura, en relación a los puntos de medición anterior.

2.8. Interferometría en el caso del hidrófono

Los hidrófonos utilizan la interferometría para detectar las variaciones acústicas. La fibra óptica se enrolla alrededor de carretes de plástico maleable llamados mandrels. La presión de eventos acústicos se transmite a través del carrete modificando su forma, lo que se traduce en estiramiento o relajación de la fibra.

Cuando la luz viaja a través de la fibra óptica enrollada en el carrete, las variaciones acústicas deforman el carrete modificando la distancia que la luz tiene que viajar. Esto es comparado con la distancia que viaja la luz en un modelo de referencia.

La diferencia de fase entre los dos caminos representa las variaciones acústicas en el sistema y puede ser fácilmente medido con un equipo de procesamiento de señal.

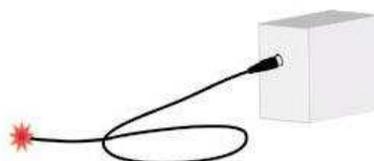


2.9. Fluorescencia óptica

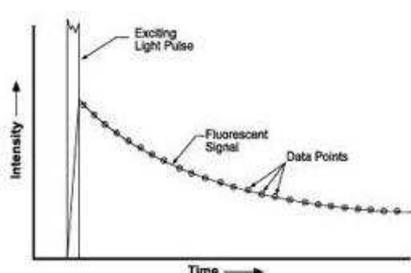
La fluorescencia es la propiedad de una sustancia para emitir luz cuando es expuesta a luz o radiaciones electromagnéticas. Las radiaciones absorbidas son transformadas en luz de una longitud de onda mayor al incidente (menor energía).

Un sensor basado en fluorescencia óptica se basa en que una fuente emisora de luz, generalmente ultravioleta o LED, emite un haz de luz a través de una fibra óptica y este haz ilumina una superficie fluorescente. La superficie que ha sido iluminada emite por fluorescencia una radiación. La forma de esta radiación, en cuanto a intensidad frente a tiempo, es función del parámetro que se quiere medir, temperatura, nivel de oxígeno u otro

compuesto químico, etc. Esta superficie fluorescente puede ser colocada sobre el objeto a medir, lo que permitiría medidas sin contacto, o en el final de la sonda sensora, lo que permitiría medidas con contacto de cualquier objeto.

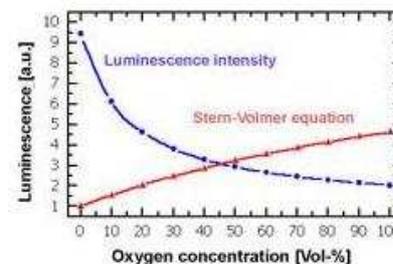


Para minimizar la interferencia entre la señal emitida y la señal creada por la propiedad de fluorescencia se colocan filtros paso-banda.



En el caso de la temperatura, la caída de la intensidad de fluorescencia es función del tiempo. Obteniendo el tiempo de caída y comparándolo en unas tablas en función del material, se obtiene la temperatura con una precisión mejor que $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Los sensores químicos funcionan de manera diferente, pongamos el caso del oxígeno. El sensor ilumina la superficie fluorescente, creando una nueva radiación y ambas radiaciones entran en el medio a medir. La radiación reflejada será función de la cantidad de oxígeno en el medio, en la longitud de onda de la radiación fluorescente. Cuanto más oxígeno haya menor será la intensidad de fluorescencia detectable.



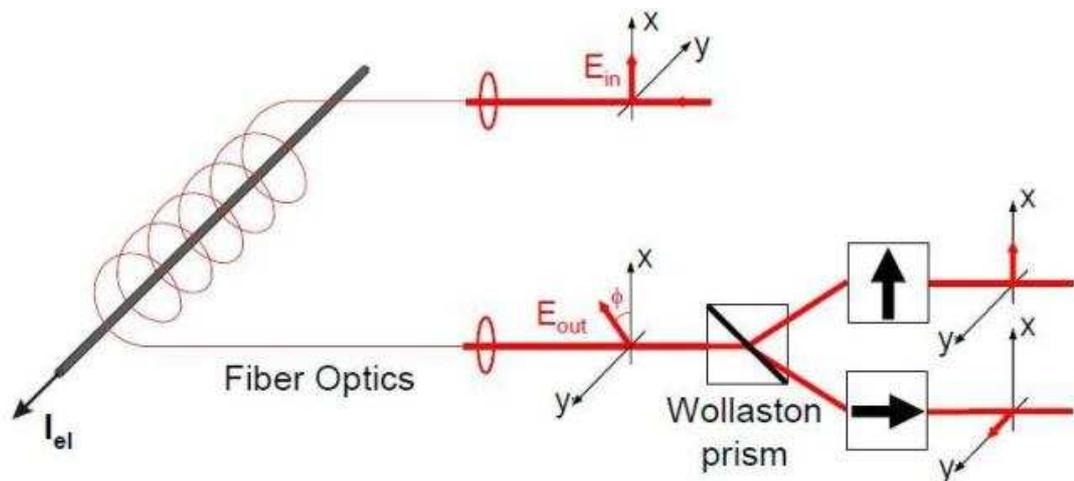
2.10. Efecto Faraday

Los sensores de fibra óptica que se encargan de medir la corriente eléctrica funcionan gracias al efecto Faraday.

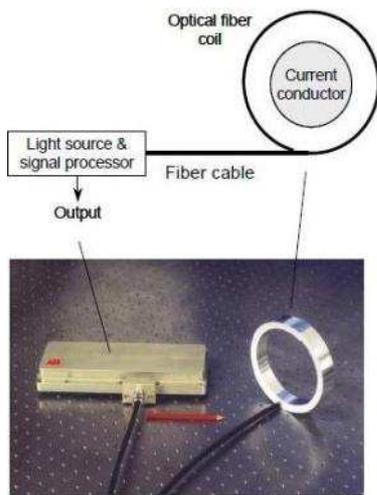
El vector de polarización de un haz de luz linealmente polarizado que atraviesa un medio es rotado por el campo magnético del medio. Dicha rotación es proporcional a la componente del campo magnético en la dirección de propagación de la luz. Si una fibra óptica rodea completamente una línea de corriente, el efecto Faraday puede medirse como:

$$\Phi = nVI$$

Donde n es el número de vueltas de fibra sobre la línea y V la constante de Verdet (4.7×10^{-6} rad/Amperio)



Como se puede observar, analizando la variación del ángulo de polarización en la luz, se puede obtener muy fácilmente la corriente de la línea, con solo saber el número de vueltas del sensor. La precisión del sensor mejora cuanto mayor sea el número de vueltas de la fibra sobre la línea eléctrica.



Debido a la presencia de birrefringencia en la fibra, se producen cambios de estados de polarización. Para evitar estas distorsiones y ofrecer una alta precisión se utilizan fibras especiales.

Los sensores de corriente de fibra óptica permiten realizar medidas sin contacto, con una amplia respuesta en frecuencia que no se ve afectada por las interferencias electromagnéticas ni los altos voltajes.

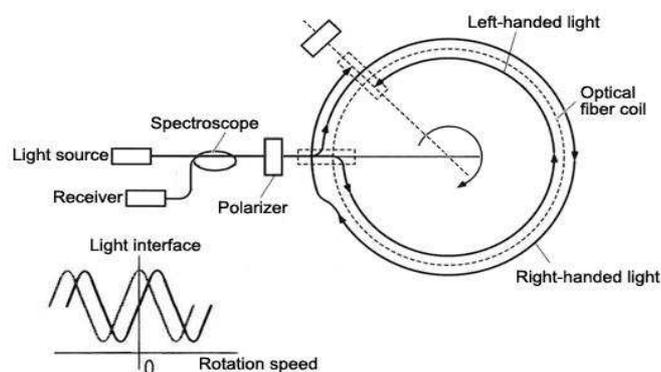
2.11. Efecto Sagnac

El giróscopo o giroscopio de fibra óptica es un dispositivo capaz de detectar rotaciones mecánicas mediante la interferencia de dos haces de luz.

El sensor consiste en una bobina en la que se enrolla un cable de fibra óptica, que puede medir hasta 5000 metros.

Dos rayos de luz viajan a través de la fibra en direcciones opuestas. Debido al Efecto de Sagnac, el rayo que viaja en sentido contrario a la rotación experimenta un camino más corto que el otro.

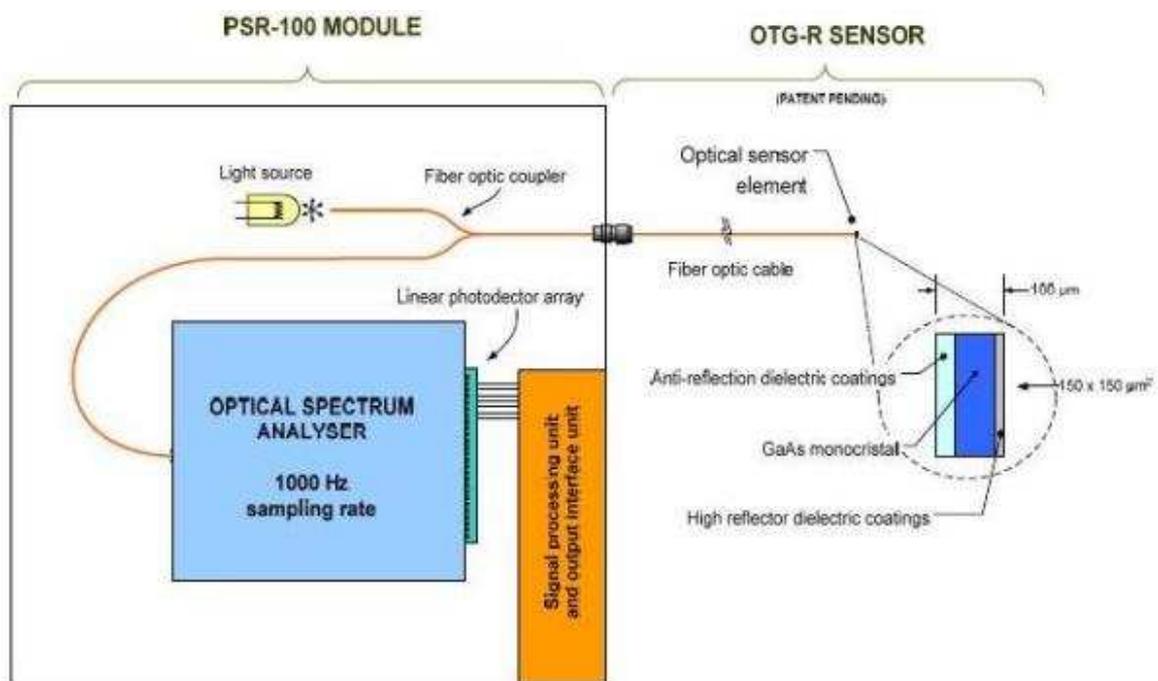
El desplazamiento de fase resultante genera una pauta de interferencias que permiten conocer la velocidad de rotación según la intensidad del rayo resultante.



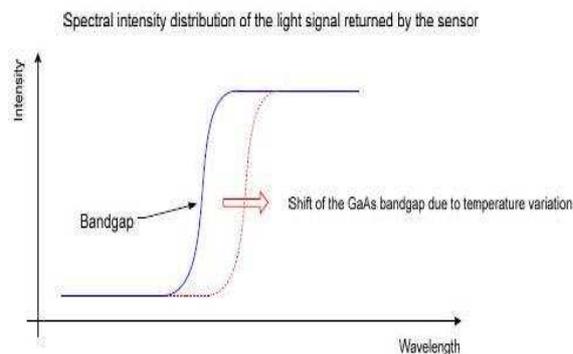
2.12. Arseniuro de galio (GaAs)

Los sensores de temperatura de fibra óptica que funcionan gracias a cristales de arseniuro de galio (GaAs) están basados en una simple pero robusta técnica de espectrometría. Esta técnica se basa en la dependencia de la temperatura que sufre la banda de gap de un cristal semiconductor de GaAs. El cristal GaAs es opaco a longitudes de onda por debajo de su banda de gap y transparente para longitudes de onda por encima de él.

El esquema del sensor se puede ver perfectamente en la siguiente figura:



La sonda de fibra óptica está compuesta por un diminuto cristal GaAs adherido al extremo de la fibra. La luz es inyectada por un acondicionador de señal a través de la fibra óptica hacia el cristal GaAs. El cristal absorbe las longitudes de onda por debajo de la posición espectral de la banda de gap mientras las longitudes de onda por encima son reflejadas hacia el acondicionador. Esta luz reflejada es dirigida a un analizador de espectros óptico (OSA) que separa la luz espacialmente en las diferentes longitudes de onda que la componen. La intensidad de estas longitudes de onda es medida en un detector lineal CCD en array. Cada pixel del array CCD corresponde a una longitud de onda específica previamente calibrada y por lo tanto, la detección conjunta del array proporciona la distribución espectral de la luz reflejada por el cristal GaAs.



La posición espectral de la banda de gap es calculada mediante la distribución de intensidad y convertida en una lectura de la temperatura absoluta, utilizando un método de procesamiento digital de señales basado en filtrado adaptativo, en el caso de OpSens, u otro método de procesamiento de señal en el caso de otras empresas.

2.13. Termometría infrarroja

Miden la temperatura sin contacto, utilizando la propiedad que tienen todos los materiales de emitir una onda electromagnética en el rango del infrarrojo. Esta radiación está totalmente relacionada con la temperatura del objeto. En general, la longitud de onda donde un cuerpo emite el máximo de radiación es inversamente proporcional a la temperatura de éste (Ley de Wien).

El transductor utiliza esta radiación para calcular la temperatura.

Para medir la temperatura se ilumina el objeto con una fuente blanca de espectro plano y se analiza la radiación reflejada. Con ello se obtiene el coeficiente de emisividad y a partir de él la temperatura.

2.14. Transmisión

Un LED emite un haz de luz y es recogido por el detector que tiene en frente. Entre el transmisor y el receptor está el objeto a medir. El sistema se basa en detectar la intensidad que llega al receptor.

Puede servir para detectar el nivel de líquido de una botella al llenarla (cuando el líquido llega al nivel deseado, la intensidad que llega al receptor es mucho menor) o para detectar los huecos donde van los tornillos de una pieza (cuando el detector recibe el haz).

2.15. Reflexión

Un transductor emite un haz, que choca con el objeto, se refleja en él y el haz vuelve al transductor. Analizando la intensidad se puede detectar la posición o el desplazamiento (la distancia entre las palas de un motor y el chasis, por ejemplo).

Una aplicación destacable de esta tecnología son los sensores de presión que fabrica OPTRAND. Hay un diafragma móvil, donde se recoge la presión y un haz de luz que se está reflejando contra el diafragma.

BLOQUE II:

**Estudio del mercado del los sensores de fibra
óptica, clasificándolos según su aplicación**

1. Introducción

En este apartado se va a desarrollar la clasificación de los sensores de fibra óptica según su aplicación.

Lo que pretende cada capítulo es contener toda la información de todos los sensores que dan solución a esa aplicación. Por ello, cada capítulo incluirá la tabla de comparativas, una lista de empresas que pueden fabricar los sensores a medida (si las hubiera), la lista de las empresas estudiadas y una pequeña bibliografía. Esto dota de independencia a la información de cada familia de aplicación. De este modo si se quiere consultar los sensores de temperatura, por ejemplo, con leer ese capítulo será suficiente.

Por otra parte los fundamentos teóricos de los principios de funcionamiento de cada tecnología, se han incluido en el bloque anterior para evitar redundancia.

Por motivos de espacio las tablas comparativas que aparecen en la memoria están más resumidas que en la aplicación. Por ello para cualquier consulta se recomienda utilizar la aplicación.

Uno de los casos que hay que citar para el correcto entendimiento de las tablas de la memoria es cuando un sensor sirve para más de una aplicación, por ejemplo si un sensor de temperatura mide strain, en la sección de observaciones de la tabla pondrá sensor de strain.

2. Sensores de Temperatura

2.1. Introducción

Dentro del mercado de los sensores de fibra óptica los sensores de temperatura son los más desarrollados. Es donde se puede encontrar una mayor variedad de sensores, un mayor número de empresas fabricantes y un mayor número de tecnologías que hacen posible todos estos sensores. Se pueden encontrar sensores de temperatura puntuales, cuasi-distribuidos (con tecnología FBG) y distribuidos.

SENSORES PARA MEDIDAS PUNTUALES

2.2. Fiber Bragg Grating (FBG)

La tecnología FBG es sin duda una de las más sobresalientes en cuanto a los sensores de fibra óptica de temperatura se refiere. Esto es debido a que es una de las más desarrolladas, por lo que permite fabricar sensores a precios competitivos, y porque permite medidas puntuales y cuasi-distribuidas. Además ofrecen las siguientes ventajas.

- ✓ Capacidad de Multiplexación de varios transductores para compartir un equipo terminal costoso y reducir la cantidad de cableado necesario.
- ✓ Instalación embebida, integrada, adherida sobre la superficie o soldada sobre la superficie
- ✓ Codificación de longitudes de onda.
- ✓ Producción en masa a costo razonable.
- ✓ Resistentes a altas deformaciones.
- ✓ Resistentes a altas y bajas temperaturas (Desde 4 grados Kelvin hasta 1000°C), dependiendo del recubrimiento de la fibra.
- ✓ Posibilidad de lograr largas distancias entre los sensores y los dispositivos de adquisición de datos.

2.2.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Precisión	Dimensiones	Observaciones	Fabricante
<i>Temp Chain TC-01</i>	-20°C a 80°C	0.1°C	0.2°C	Modificable	Cuasi-distribuido Modificable	FOS&S
<i>Temp Chain TC-02</i>	-20°C a 80°C	0.1°C	0.2°C	15 cm	Cuasi-distribuido Modificable Configuraciones en serie	FOS&S
<i>Temp Probe TP-01</i>	-45°C a 500°C	0.1°C	0.2°C	60 cm (modificable)	-	FOS&S
<i>Temp Probe TP-02</i>	-20°C a 80°C (aumentable)	0.05°C	0.1°C	11 cm	Configuraciones sencillas o en serie	FOS&S
<i>Probe TC-probe</i>	-20°C a 110°C (aumentable)	0.1°C	0.2°C	58 mm	Combinable con sensor de strain	FOS&S
<i>Sensor os 4100</i>	-40°C a 120°C (aumentable)	0.75°C	0.75°C	36.51 x 7.94 mm	Combinable con sensor de strain	Microm Optics
<i>Sensor os 4200</i>	-40°C a 120°C (aumentable)	1°C a 0.2°C	1°C a 0.2°C	Según el encapsulado	Diferentes encapsulados	Microm Optics
<i>Sensor os 4300</i>	-40°C a 120°C -40°C a 250°C (1er modelo)	1°C a 0.2°C	1°C a 0.2°C	Según el encapsulado	Diferentes encapsulados	Microm Optics
<i>Sensor os 4400</i>	-40°C a 100°C	1°C ó 0.6°C	1°C ó 0.6°C	Modificable	Cuasi-distribuido Modificable	Microm Optics
<i>FS6300</i>	-20°C a 80°C	0.1°C	±0.5°C	Según el modelo	Sensibilidad: 10 pm/°C	FiberSensing
<i>FS6300 HIGH</i>	-50°C a 200°C	0.1°C	±0.5°C	65 mm	Sensibilidad: 10 pm/°C	FiberSensing
<i>AOS temp</i>	-30°C a 80°C (modificable)	1°C	0.5°C	Entre 30 mm y 50 mm	Completamente modificable	AOS GmbH
<i>SmartFBG</i>	-170°C a 85°C (acrilato) -170°C a 300°C (Poliamida)	0.05°C	-	Según el modelo	Sensibilidad: 11 pm/°C Sensor de strain	SMART FIBRES
<i>SmartPatch</i>	0°C a 30°C (modificable)	0.05°C	-	6 mm	Sensibilidad: 11 pm/°C Sensor de strain	SMART FIBRES
<i>SmartWeld</i>	-170°C a 150°C	0.05°C	-	3 mm	Sensibilidad: 11 pm/°C Sensor de strain	SMART FIBRES
<i>Downhole</i>	-20°C a 150°C	0.001°C	0.1°C	según modelo	Sensor de presión	SMART FIBRES

<i>Bottomhole</i>	-20°C a 150°C	0.001°C	0.1°C	61 x 54 x 18 mm	Sensor de presión	SMART FIBRES
<i>SmartPort</i>	-20°C a 200°C	-	0.1°C	¾ x 9 in	Sensor de presión	SMART FIBRES
<i>LP SmartPort</i>	-20°C a 150°C	-	0.1°C	¾OD x 9 in	Sensor de presión	SMART FIBRES
<i>SmartTape</i>	-20°C a 50°C	0.05°C	-	6 mm	Sensor de strain	SMART FIBRES
<i>SmartTemp</i>	-170°C a 85°C	-	-	según el modelo	Diferentes encapsulados	SMART FIBRES
<i>MUST TEMP</i>	-120°C a 80°C	±0.1°C	±0.5°C	según el modelo	3 diferentes encapsulados	smartec
<i>Temperature FBG</i>	-20°C a 85°C	0.1°C	1°C	según el modelo	2 diferentes encapsulados	Welltech instrument
<i>SPT-70</i>	-20°C a 80°C	0.1°C	-	100 x Ø 6 mm	-	IFOS
<i>OETMS-100</i>	-50°C a 120°C	0.1°C o 0.05°C	±0.5°C o ±0.25°C	10 x 25 x 6 mm	-	O/E LAND
<i>OETMS-200</i>	-50°C a 120°C	0.1°C	±0.3°C	10 x 40 x 6.5 mm	-	O/E LAND
<i>OETMS-400</i>	-50°C a 400°C	0.5°C	±1.0°C	90 x Ø 3 mm	-	O/E LAND
<i>OETMS-700</i>	-50°C a 700°C	1.0°C	±2.0°C	90 x Ø 3 mm	-	O/E LAND
<i>OBTS-50</i>	-30°C a 50°C	< 0.05°C	±0.5°C	120 x 20 mm	Permite conexiones en serie	SCAIME

2.2.2. Instrumentación

La instrumentación de estos sensores está compuesta por interrogadores, tanto estáticos como dinámicos, y software-s de análisis de los datos.

Existen interrogadores con diferente número de canales, que soportan un mayor o menor número de sensores FBG.

Los interrogadores dinámicos son los que ofrecen una respuesta más rápida (> 1 muestra/s), mientras que los estáticos son más lentos (< 1 muestra/s).

El interrogador se elegirá en función de la aplicación y el presupuesto.

Para realizar medidas cuasi-distribuidas con más de una fibra, con varios sensores en cada fibra, a veces se utilizan switch-s ópticos, si el número de canales de interrogador no es suficiente.

2.2.3. Empresas fabricantes

Hay en el mercado algunas empresas importantes, que a pesar de no tener un catálogo de sensores comercial, ofrecen la posibilidad de fabricarlos a medida. Para los sensores FBG estas son las empresas que ofrecen ese servicio:

- ◆ **BLUE ROAD RESEARCH**
- ◆ **Bropitics**
- ◆ **ITF Labs**
- ◆ **IXFIBER**
- ◆ **OFS**

2.3. Fluorescencia óptica

La mayor parte de los sensores de temperatura por fluorescencia óptica que aparecen en esta memoria están basados en la tecnología Fluoroptic que creó Luxtron, empresa que más tarde adquirió LumaSense Technologies.

LumaSense Technologies es la empresa que lidera el sector de los sensores de fibra óptica por fluorescencia óptica.

La aplicación fundamental de estos sensores es para medir la temperatura en transformadores eléctricos de alta potencia y en aplicaciones médicas y bio-médicas.

2.3.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Precisión	Nº canales	Observaciones	Fabricante
Luma SMART	-30°C a 230°C	0.1°C	±0.5°C	4-16	Transformadores	LUMASENSE Technologies
Therm Asset 2	-30°C a 200°C	-	±2°C	2, 4, 6 o 8	Transformadores	LUMASENSE Technologies
Luxtron WTS-	-30°C a 200°C	-	±2°C	4	Transformadores	LUMASENSE

22						Technologies
<i>Luxtron 812</i>	-100°C a 330°C	0.1°C	±0.5°C a ±0.1°C	2	-	LUMASENSE Technologies
<i>FOT Lab Kit</i>	-100°C a 330°C	0.01°C	±0.5°C a ±0.1°C	4	Ideal para investigación	LUMASENSE Technologies
<i>Bio Lab Kit - m3300</i>	0°C a 120°C	-	±0.2°C	4	Aplicaciones medicas e investigación	LUMASENSE Technologies
<i>FocalPoint</i>	0°C a 120°C	0.1°C	2°C	4	Aplicaciones medicas de ablación	LUMASENSE Technologies
<i>m600 OEM Module</i>	-100°C a 330°C	-	0.5°C o 0.2°C	1, 2 o 4	Fácilmente integrable	LUMASENSE Technologies
<i>m600 Utility Module</i>	-30°C a 200°C	-	±2°C	1, 2 o 4	Fácilmente integrable	LUMASENSE Technologies
<i>m3300 OEM module</i>	0°C a 120°C	-	±0.5°C	1, 2 o 4	Integrable en instrumentos médicos	LUMASENSE Technologies
<i>RJC-O2-TEMP</i>	15°C a 45°C	0.1°C	±0.2°C	-	Mide concentración de O ₂	RJC enterprises

2.3.2. Instrumentación

La instrumentación está compuesta por diferentes sondas, que hay que elegir en función del rango de temperatura medir y la longitud requerida por la aplicación.

2.4. Arseniuro de galio (GaAs)

La mayoría de los sensores de temperatura basados en GaAs que se encuentran en el mercado pertenecen a la empresa OpSens. LumaSense ha adquirido esta tecnología directamente de OpSens. En este caso, los propios fabricantes al clasificar los sensores no diferencian bien cuál es la parte fundamental y cual la instrumentación, por lo que han sido creadas dos tablas comparativas con los acondicionadores de señal y las sondas.

Es importante destacar que la precisión del sistema sensor es la suma de la precisión de la sonda con la precisión del acondicionador de señal.

2.4.1. Tabla comparativa de acondicionadores de señal

	Rango	Resolución	Precisión	Nº canales	Observaciones	Fabricante
LumaSHIELD	-40°C a 230°C	0.1°C	±0.8°C	2-16	Transformadores de potencia	LUMASENSE
LumaTEST	Limitado por la sonda	0.1°C	±0.8°C	1	Medidor portátil	LUMASENSE
PicoM	20°C a 45°C	0.05°C	±0.3°C	1	Utilizar con la sonda OTG-M Medidor portátil	opSens
PicoP	Limitado por la sonda	0.1°C	±0.8°C	1	Medidor portátil	opSens
TempSens	Limitado por la sonda	0.05°C	±0.3°C (20 a 45°C) ±0.8°C (-20 a 250°C)	4 o 8	-	opSens
PowerSens II	Limitado por la sonda	0.1°C	±0.8°C	3, 6, 9, 12 o 15	Utilizar con las sondas OTG-T y OTG-P	opSens
PSR-100	-20°C a 250°C	0.1°C	±1.5°C	-	Diseño modular	opSens
OEM-MNT	-40°C a 250°C	0.05°C	±0.3°C (medicina) ±0.8°C (industria)	Hasta 8	Diseño modular	opSens
OEM-PWS	Limitado por la sonda	0.1°C	±0.8°C	9, 12 y 15	Diseño modular	opSens
Sentinel	-40°C a 225°C	0.1°C	1°C	2, 4, 6, 8, 10 o 12	Ideal para transformadores	FISO
getTemp	Según el modelo	0.1°C	±1°C	Según el modelo	Diferentes modelos	getAMO
FOTEMP	Según la sonda	-	±1°C	Según el modelo	Diferentes modelos	OPTOCON

2.4.2. Tabla comparativa de sondas

	Rango	Resolución	Precisión	T respuesta	Observaciones	Fabricante
<i>OTG-T+</i>	-40°C a 230°C	0.1°C	±0.8°C	0.5 s	Con fibra óptica de 62.5/125 µm	LUMASENSE
<i>OTG-T</i>	-40°C a 230°C	0.1°C	±0.8°C	0.5 s	Con fibra óptica de 62.5/125 µm	LUMASENSE
<i>OTG-A</i>	-40°C a 250°C	0.1°C	±0.8°C	0.5 s	-	opSens
<i>OTG-F</i>	-40°C a 250°C	0.05°C	±0.8°C	0.5 ms	-	opSens
<i>OTG-M170</i>	20°C a 45°C	0.05°C	±0.8°C	10 ms	-	opSens
<i>OTG-M280</i>	20°C a 45°C	0.05°C	±0.3°C	220 ms	Ø exterior: 0.280 mm	opSens
<i>OTG-M360</i>	20°C a 45°C	0.05°C	±0.3°C	220 ms	Ø exterior: 0.360 mm	opSens
<i>OTG-M420</i>	20°C a 45°C	0.05°C	±0.3°C	220 ms	Ø exterior: 0.420 mm	opSens
<i>OTG-M600</i>	20°C a 45°C	0.05°C	±0.3°C	220 ms	Ø exterior: 0.60 mm	opSens
<i>OTG-M3000</i>	20°C a 45°C	0.05°C	±0.3°C	1.5 s	Ø exterior: 3 mm	opSens
<i>OTG-MPK5</i>	20°C a 45°C	0.05°C	±0.3°C	500 ms	Ø exterior: 0.50 mm	opSens
<i>OTG-MPK8</i>	20°C a 45°C	0.05°C	±0.3°C	500 ms	Ø exterior: 0.80 mm	opSens
<i>OTG-P</i>	-40°C a 250°C	0.1°C	±0.8°C	-	Con fibra óptica de 62.5/125 µm	opSens
<i>OTG-T</i>	-40°C a 250°C	0.1°C	±0.8°C	0.5 s	-	opSens
<i>OTG-T+</i>	-40°C a 250°C	0.1°C	±0.8°C	0.5 s	-	opSens
<i>OTG-R</i>	0°C a 120°C	< 35 dB	-	< 10 ms	Ø exterior: 0.15 mm	opSens
<i>TPT-32</i>	-40°C a 225°C	0.1°C	±2°C	-	Dimensiones del sensor: 1 mm x 1.5 mm	FISO
<i>TPT-62</i>	-40°C a 225°C	0.1°C	±1°C	-	Longitud del sensor: 1.1 mm	FISO
<i>Catálogo sondas getTemp</i>	Según el modelo	-	-	-	Diferentes modelos	getAMO
<i>Catálogo de sondas OPTOCON</i>	Según la sonda	-	-	-	Diferentes modelos	OPTOCON

2.5. Interferometría Fabry-Perot

Las técnicas de interferometría Fabry-Perot dan lugar a una amplia variedad de sensores. Dentro de esta tecnología destacan FISO y opSens. Los sensores de opSens utilizan interferometría de baja coherencia pero su fundamento sensor es Fabry-Perot.

2.5.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Precisión	T. respuesta	Observaciones	Fabricante
<i>FOT-L</i>	-40°C a 300°C	0.1°C	±1°C	≤ 1.5 ms	-	FISO
<i>FOT-L-BA</i>	-40°C a 250°C	0.1°C	±1°C	≤ 0.5 ms	-	FISO
<i>FOT-M</i>	-20°C a 85°C	0.1°C	±0.3°C	< 750 ms	Aplicaciones médicas	FISO
<i>RJC-TEMP</i>	15°C a 55°C	0.02°C	±0.1°C	2 ms	-	RJC enterprises
<i>OTP-A</i>	-40°C a 250°C	0.1°C	±1°C	1.5 ms	-	opSens
<i>OTP-M</i>	0°C a 85°C	0.01°C	±0.15°C	< 1. s	Aplicaciones médicas	opSens
<i>OTP-P</i>	-40°C a 250°C	0.1°C	±1°C	-	Muy robusto	opSens
<i>OPP-W</i>	-40°C a 300°C	0.1°C	±1.5°C	-	Mide presión	opSens

2.5.2. Instrumentación

Los acondicionadores de señal son la instrumentación necesaria para utilizar esta tecnología.

SENSORES PARA MEDIDAS DISTRIBUIDAS

2.6. Fiber Bragg Grating (FBG)

Se trata de una solución particular creada por la empresa LUNA Technologies por lo que solo existe un sensor en el mercado. Su funcionamiento está explicado en el bloque anterior. Este sensor permite monitorizar temperatura y strain de forma distribuida.

2.6.1. Características del sensor DSS 4300

	Rango	Resolución	Resolución espacial	Longitud
Temperatura	-50°C a 300°C	±0.1°C	1.0 cm	70 m
Strain	± 7000 $\mu\epsilon$	±1 $\mu\epsilon$		

2.7. Scattering de Brillouin

Esta tecnología ofrece una solución óptima para la monitorización de temperatura de forma distribuida, ya que con ella también es posible la monitorización del strain. Por ello es una tecnología ideal para ser usada en la industria petrolera entre otras.

Otra de las ventajas que ofrece Brillouin es la posibilidad de utilizar fibra monomodo estándar de telecomunicaciones para realizar la monitorización.

En general las empresas que ofrecen este servicio se encargan de la instalación y de elegir la mejor instrumentación según las necesidades del cliente. De hecho muchas de ellas ofrecen el servicio, pero no tienen un catálogo comercial con sus soluciones.

2.7.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Res espacial	Longitud	Canales	Observaciones	Fabricante
<i>DSTA-R</i>	-273°C a 700°C	0.1°C	0.1 m	50 km	2	Monitoriza strain	Omnisens
<i>DTS</i>	-273°C a 700°C	0.11 a 3.5 K	<0.9 m // 1.5 m (12km)	2, 4, 8 o 12 km	1, 2, o 4	4 modelos: 2, 4, 8 y 12 km	FOS&S
<i>DTSS</i>	Limitado por la fibra	0.1°C	1 m	24 km	-	Monitoriza strain	sensornet
<i>B-DTS</i>	-270°C a 2000°C	0.005°C	Según modelo	100 km	1 o 2	-	OZoptics
<i>OZ-DTSS</i>	-270°C a 800°C	0.005°C	Según modelo	50 km o 100 km	1 o 2	Monitoriza strain	OZoptics
<i>NBX-6000</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain Precisión: ±1°C	NEUBREX
<i>NBX-6000(PM)</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain Precisión: ±1°C Mantiene la polarización	NEUBREX
<i>NBX-6010</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain y presión Precisión: ±0.6°C	NEUBREX
<i>NBX-6020</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 2 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain Precisión: ±1°C	NEUBREX
<i>NBX-6030</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain Precisión: ±0.6°C	NEUBREX
<i>NBX-6040</i>	Limitado por la fibra	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza strain Precisión: ±0.35°C	NEUBREX
<i>FOSTA</i>	-	0.5°C	≥ 1 m	10 km (DTSS- LR) 30 km (DTSS- XR)	-	Monitoriza strain	FOSTA

2.7.2. Instrumentación

La instrumentación de estos sistemas consiste en cables, con diferentes recubrimientos y distinto número de fibras en su interior, y software-s de procesamientos y análisis de datos.

2.7.3. Empresas fabricantes

Es muy común en los sistemas distribuidos que algunas empresas ofrezcan el sistema sensor y la instalación ajustado a las necesidades del cliente, sin que anuncien sus sensores detalladamente. Estas son algunas de las empresas que ofrecen sistemas de monitorización por scattering de Brillouin:

- ◆ *QOREX*
- ◆ *SILIXA*

2.8. Scattering de Rayleigh

Esta tecnología ofrece una solución óptima para la monitorización de temperatura de forma distribuida, ya que con ella también es posible la monitorización del strain. Por ello es una tecnología ideal para ser usada en la industria petrolera entre otras, aunque la importancia de su nombre en el mercado es menor que la de Brillouin.

En general las empresas que ofrecen este servicio se encargan de la instalación y de elegir la mejor instrumentación según las necesidades del cliente. Muchas de las empresas ofrecen el servicio pero no tienen un catálogo comercial con sus soluciones., de hecho solo se ha encontrado un sensor de este tipo en el mercado. El sensor encontrado ha sido fabricado por LUNA Technologies.

2.8.1. Características del sensor OBR 4600

	Rango	Resolución	Precisión	Resolución espacial	Longitud
Temperatura	0°C a 300°C (aumentable)	±0.1°C	±0.2°C	±1.0 cm	70 m
Strain	2 %	±1 $\mu\epsilon$	±1 $\mu\epsilon$		

2.8.2. Empresas fabricantes

Es muy común en los sistemas distribuidos que algunas empresas ofrezcan el sistema sensor y la instalación ajustado a las necesidades del cliente, sin que anuncien sus sensores detalladamente. Estas son algunas de las empresas que ofrecen sistemas de monitorización por scattering de Rayleigh:

- ◆ *FOtech solutions*
- ◆ *QinetiQ*
- ◆ *QOREX*
- ◆ *SILIXA*

2.9. Scattering de Raman

Esta es la tecnología de sensores de fibra óptica distribuidos con mayor número de sensores y más importancia en el mercado. Esto se debe a su amplia utilización como sistema de seguridad anti-incendio en los túneles de carreteras y autopistas

Ofrece una solución óptima para la monitorización de temperatura.

En general las empresas que ofrecen este servicio se encargan de la instalación y de elegir la mejor instrumentación según las necesidades del cliente. De hecho muchas de ellas no ofrecen el servicio pero no tienen un catálogo comercial con sus soluciones.

2.9.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Res espacial	Res muestreo	Longitud	Canales	Observaciones	Fabricante
<i>HALO DTS</i>	Limitado por la fibra	< 0.1°C	-	2 m	4 km	2 o 4	-	sensornet
<i>SENTINEL DTS-SR</i>	Limitado por la fibra	< 0.01°C	1 m	0.5 m	5 km	2, 4, 8 o 16	-	sensornet
<i>SENTINEL DTS-MR</i>	Limitado por la fibra	< 0.01°C	1 m	0.5 m	8 km	2, 4, 8 o 16	-	sensornet
<i>SENTINEL DTS-LR</i>	Limitado por la fibra	< 0.01°C	1 m	0.5 m	10 km	2, 4, 8 o 16	-	sensornet
<i>SENTINEL DTS-XR</i>	Limitado por la fibra	< 0.05°C	1 m (< 20 km) 2 m (> 20 km)	1 m (< 20 km) 2 m (> 20 km)	30 km	2, 4, 8 o 16	-	sensornet
<i>SENTINEL DTS-XR SM</i>	Limitado por la fibra	< 0.05°C	1 m (< 20 km) 2 m (> 20 km)	1 m (< 20 km) 2 m (> 20 km)	30 km	-	Utiliza fibra monomodo	sensornet
<i>ORYX DTS</i>	Limitado por la fibra	< 0.1°C	-	-	5 km	-	Aplicaciones externas Aplicaciones remotas	sensornet
<i>FibroLaser II</i>	Limitado por la fibra	± 0.1°C	0.5 m	-	4 km	10 o 20	Mundialmente conocido	SIEMENS
<i>LTS 200</i>	-5°C a 40°C	-	-	1 m	2 km por canal	1 o 2	Protección de incendios	Sensa
<i>LTS 240</i>	-5°C a 40°C	-	-	1 m	4 km por canal	1 o 2	Protección de incendios	Sensa
<i>ASTRA 5K</i>	Limitado por la fibra	< 0.07°C	1 m	0.5 m	5 km	1 a 16	Precisión: ±1°C	sensortran
<i>ASTRA 10K</i>	Limitado por la fibra	< 0.11°C	1 m	0.5 m	10 km	1 a 16	Precisión: ±1°C	sensortran
<i>ASTRA 15K</i>	Limitado por la fibra	< 0.6°C	1 m	0.5 m	15 km	1 a 16	Precisión: ±2°C	sensortran
<i>GEMINI HSI</i>	Limitado por la fibra	< 0.07°C	1 m	0.25 m	10 km	1 a 16	Precisión: ±1°C	sensortran
<i>GEMINI HT</i>	Limitado por la fibra	< 0.1°C	1 m	0.5 m	5 km	1 a 16	Precisión: ±2°C	sensortran
<i>CENTAURUS</i>	Limitado por la fibra	< 0.2°C	1 m	0.5 m	5 km	1 a 16	Precisión: ±3°C	sensortran
<i>HydroLight</i>	0 a 300°C	0.1°C	1 m	-	5 km	-	Precisión: 0.8°C	QOREX
<i>Extreme Duty DTS</i>	0 a 700°C	0.1°C	1 m	-	5 km	4	Precisión: 5°C	QOREX

DTS Acoustic +	0 a 300°C	0.1°C	1 m	-	5 km (temp) 2 km (acoustic)	-	Tecn Rayleigh Eventos acústicos	QOREX
DITEMP LIGHT	Según la fibra	0.5°C	2 m	2 m	km (DL2) 4 km (DL4)	2 o 4	-	smartec

2.9.2. Instrumentación

La instrumentación de estos sistemas consiste en cables, con diferentes recubrimientos y distinto número de fibras en su interior, y software-s de procesamientos y análisis de datos.

2.9.3. Empresas fabricantes

Es muy común en los sistemas distribuidos que algunas empresas ofrezcan el sistema sensor y la instalación ajustado a las necesidades del cliente, sin que anuncien sus sensores detalladamente. Estas son algunas de las empresas que ofrecen sistemas de monitorización por scattering de Raman:

- ◆ **QOREX**
- ◆ **Sensa**
- ◆ **SILIXA**

2.10. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

2.10.1. Lista de empresas

Fiber Bragg Grating:

- AOS GmbH
- FiberSensing
- FOS&S
- IFOS
- Microm Optics
- O/E LAND
- SCAIME
- SMART FIBRES
- smartec
- Welltech instrument
- Empresas que fabricantes:
 - BLUE ROAD RESEARCH
 - Broptics
 - ITF Labs
 - IXFIBER
 - OFS

Fluorescencia óptica:

- LUMASENSE Technologies
- RJC enterprises

Arseniuro de Galio:

- getAMO
- FISO
- LUMASENSE Technologies
- opSens
- OPTOCON

Interferometría Fabry-Perot:

- FISO
- opSens
- RJC enterprises

Fiber Bargg Grating distribuido:

- LUNA Technologies

Scattering de Brillouin:

- FOSTA
- FOS&S
- NEUBREX
- Omnisens
- OZoptics
- sensornet
- Empresas fabricantes:
 - *QOREX*
 - *SILIXA*

Scattering de Rayleigh:

- LUNA Technologies
- Empresas fabricantes:
 - *FOtech solutions*
 - *QinetiQ*
 - *QOREX*
 - *SILIXA*

Scattering de Raman:

- QOREX
- Sensa
- sensornet
- sensortran
- SIEMENS
- smartec
- Empresas fabricantes:
 - *QOREX*
 - *Sensa*
 - *SILIXA*

2.10.2. Bibliografía

FBG:

- <http://destec-corp.com/download/12/>
- <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/11821>
- <http://www.cenam.mx/simposio2010/info/pjueves/sm2010-jp03b>.

Fluorescencia óptica:

- <http://es.wikipedia.org/wiki/Fluorescencia>
- Fraden Jacob, “*HANDBOOK OF MODERN SENSORS*”, Ed Sringer, 2004, ISBN:978-0-387-00750-2
- http://www.getamo.com/www/getSens.nsf/main.html?open&lang=EN&id=tech_fluorescence_EN
- <http://lumasenseinc.com/EN/solutions/techoverview/fluoroptic/>
- <http://www.oceanopticsensors.com/theory.htm>

GaAs:

- <http://www.opsens.com/pdf/SCBG.pdf>
- <http://www.evaluationengineering.com/index.php/solutions/instrumentation/temperature-measurement-improves-patient-care.html>

Interferometría:

- Fraden Jacob, “*HANDBOOK OF MODERN SENSORS*”, Ed Sringer, 2004, ISBN:978-0-387-00750-2
- <http://www.opsens.com/pdf/WLPIREV2.3.pdf>
- <http://www.evaluationengineering.com/index.php/solutions/instrumentation/temperature-measurement-improves-patient-care.html>
- <http://www.hindawi.com/journals/js/2009/720980/>
- http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/libros2_TH/lib106/pdf/lib106/in_7.pdf
- López-Higuera Jose Miguel “*HANDBOOK OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY*”, Ed John Wiley & Sons Ltd, 2002, ISBN: 0-471-82053-9

FBG distribuido:

- http://www.lunatechnologies.com/products/DSS/files/DSS-4300_Data_Sheet_2009.pdf
- <http://www.lunatechnologies.com/products/DSS/dss.html>
- <http://www.lunatechnologies.com/technology/distributed-sensing.html>

Brillouin:

- http://en.wikipedia.org/wiki/Brillouin_scattering
- <http://www.waset.org/journals/waset/v42/v42-55.pdf>
- http://www.rp-photonics.com/brillouin_scattering.html
- López-Higuera Jose Miguel “HANDBOOK OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY”, Ed John Wiley & Sons Ltd, 2002, ISBN: 0-471-82053-9

Rayleigh:

- <http://www.waset.org/journals/waset/v42/v42-55.pdf>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Dispersi%C3%B3n_de_Rayleigh
- http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_scattering
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>

Raman:

- http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Raman
- http://www.sensornet.co.uk/module/page-275/zone-1/techtalk_id-18/tech_talk_action-view_techtalk/
- <http://www.waset.org/journals/waset/v42/v42-55.pdf>
- http://sensa.org/technology_principles.aspx
- http://www.rp-photonics.com/raman_scattering.html

3. Sensores de Strain

SENSORES PARA MEDIDAS PUNTUALES

3.1. Fiber Bragg Grating

La tecnología FBG es sin duda una de las más sobresalientes en cuanto a los sensores de fibra óptica de strain se refiere. Esto es debido a que es una de las más desarrolladas, por lo que permite fabricar sensores a precios competitivos, y porque permite medidas puntuales y cuasi-distribuidas. Además ofrecen las siguientes ventajas.

- ✓ Capacidad de Multiplexación de varios transductores para compartir un equipo terminal costoso y reducir la cantidad de cableado necesario.
- ✓ Instalación embebida, integrada, adherida sobre la superficie o soldada sobre la superficie.
- ✓ Codificación de longitudes de onda.
- ✓ Producción en masa a costo razonable.
- ✓ Resistentes a altas deformaciones.
- ✓ Resistentes a altas y bajas temperaturas (Desde 4 grados Kelvin hasta 1000 °C), dependiendo del recubrimiento de la fibra.
- ✓ Posibilidad de lograr largas distancias entre los sensores y los dispositivos de adquisición de datos.

Como se explica en el bloque anterior la temperatura y el strain son las dos variables que permiten crear los sensores FBG de fibra óptica. Concretamente gracias a diseños que modifican el strain es posible crear no solo sensores de strain, sino también de presión, desplazamiento, carga e inclinación. Debido a que es la variación de strain la que permite crear estos sensores, los hemos agrupado todos como sensores de strain. Algunos de ellos se desarrollan de nuevo más adelante.

3.1.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Precisión	Dimensiones	Observaciones	Fabricante
<i>Strain Gage SG-01</i>	1% (long term) 5% (short term)	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	28 mm 8 mm longitud activa	Sensor de vibración	FOS&S
<i>Strain Gage SGC-01</i>	1% (long term) 5% (short term)	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	28 mm 8 mm longitud activa	Sensor vibración	FOS&S
<i>ASC-01</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	0.5m - 5m (long)	Montaje en serie Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Strain Cable SC-01</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	1 m a 5 m (modificable)	Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Strain Cable SC-02</i>	25 mm 50 mm	< 8 μm	< 16 μm	50 cm (SC-02-50) 100 cm (SC-02-100)	Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Strain Cable SC-03</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	0.2 m a 1 m (modificable)	Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Sensor MS-01</i>	200	< 0.04 μm	< 0.08 μm	70 mm a 100 mm	Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Sensor ES-01</i>	$\pm 560 \mu\epsilon$	0.25 $\mu\epsilon$	0.5 $\mu\epsilon$	134 mm	-	FOS&S
<i>BDS-01</i>	1% FD	0.85 $\mu\epsilon$ FD	1.7 $\mu\epsilon$ FD	≤ 20 m	\varnothing pozo: 86 mm Nº galgas: ≤ 5	FOS&S
<i>Geodetec</i>	1% (long term) 3% (short term)	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	Modificable	Sensor de deformación de suelo	FOS&S
<i>Displacement D-01</i>	20/50/80 mm	1 %	1 %	-	Sensor de desplazamiento	FOS&S
<i>Sensor ES-02</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	1 m a 5 m (modificable)	-	FOS&S
<i>os 3100</i>	$\pm 2500 \mu\epsilon$	-	-	22 mm	Sensibilidad: 1.4 pm/ $\mu\epsilon$	Microm Optics
<i>os 3150</i>	$\pm 2500 \mu\epsilon$	-	-	75 mm	Sensibilidad: 1.4 pm/ $\mu\epsilon$	Microm Optics
<i>os 3155</i>	$\pm 2500 \mu\epsilon$	-	-	50 mm	Sensibilidad: 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ Compensa temperatura	Microm Optics
<i>os 3200</i>	$\pm 5000 \mu\epsilon$	-	-	10 mm	Sensibilidad: 1.2 pm/ $\mu\epsilon$	Microm Optics

<i>os 3600</i>	±2500 µε	-	0.5%	25.4, 100 o 150 cm	Sensibilidad: 1.2 pm/µε Compensa temperatura	Microm Optics
<i>MSS-1700</i>	5000 µε	-	-	145 x 30x 20 mm	Sensibilidad: 1.2 pm/µε	FIBERPRO
<i>FS6200</i>	±4000 µε	1 µε	±2 µε	Según el modelo	Sensibilidad: 1.2 pm/µε	FiberSensing
<i>FS6200 Athermal</i>	3000 µε	0.3 µε	±2 µε	Según el modelo	Sensibilidad: 3.9 ó 1.49 pm/µε Compensa temperatura	FiberSensing
<i>AOS strain</i>	-	-	-	-	Fabricable a medida Limite de Strain: ±1 % (20 mε)	AOSGmbH
<i>AOS vibración</i>	-	5 a 0.05 µm/m	-	1 m	Sensor de vibración Limite de Strain: 10000 * Resolución	AOSGmbH
<i>AOS Embeddable</i>	-	2.7 a 0.2 µm/m	-	150 a 200 mm	Limite de Strain: 10000 * Resolución	AOSGmbH
<i>AOS Displacement</i>	0 a 3.5 mm	0.01 %	0.3 %	130 x 50 x 40 mm	-	AOSGmbH
<i>SmartFBG</i>	±9000 µε	0.4 µε	-	Según el modelo	Sensibilidad: 1.20 pm/µε Sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>SmartPatch</i>	±5000 µε (modificable)	0.4 µε	-	6 mm	Sensibilidad: 1.20 pm/µε Sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>SmartWeld</i>	±2500 µε	0.4 µε	-	3 mm	Sensibilidad: 1.20 pm/µε Sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>SmartBridge</i>	10 mm	≤ 0.05 %FS	≤ 0.5 %FS	150 x 90 x 35 mm	Sensor de desplazamiento	SMART FIBRES
<i>SmartBar</i>	±1500 µε	0.4 µε	-	A medida	Posibilidad de compensación de temperatura	SMART FIBRES
<i>SmartTape</i>	±9000 µε	0.4 µε	-	6 mm	Sensibilidad: 1.20 pm/µε Sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>SHM FOSTA</i>	±2000 µε	1 µε 0.2 µε (Premium)	-	-	Salud de estructuras cuasi-distribuido	FOSTA

MUST STRAIN	$\pm 2000 \mu\epsilon$	$\pm 1 \mu\epsilon$	$\pm 2 \mu\epsilon$	Según el modelo	3 diferentes encapsulados	smartec
SMARTPROFILE	-0.5 % a 1 %;	$2 \mu\epsilon$	$2 \mu\epsilon$	680 x 7.8 x 2.9 mm	Sensor de temperatura opcional	smartec
DEFOR SENSOR	-0.5 % a 0.75 %;	$2 \mu\epsilon$	$2 \mu\epsilon$	680 x 7.8 x 2.9 mm	Sensor de temperatura opcional	smartec
BARE FBG	-1500 $\mu\epsilon$ a 3000 $\mu\epsilon$	-	-	10 mm (estándar)	Diferentes cubiertas	Welltech instrument
Weldable FBG	$\pm 3000 \mu\epsilon$	$1 \mu\epsilon$	-	65 x 35 mm	Sensor de temperatura opcional	Welltech instrument
Embedded FBG	$\pm 3000 \mu\epsilon$	$1 \mu\epsilon$	-	60 x 35 mm o 100 x 35 mm	Integrable en hormigón Sensor de temperatura opcional	Welltech instrument
Displacement FBG	100 mm o 250 mm	-	0.1 mm;	-	Sensor de desplazamiento	Welltech instrument
DPS -200	0 a 200 mm	1 μm	-	500 x \varnothing 47 mm	Sensor de desplazamiento	IFOS
SPS-50	$\pm 2000 \mu\epsilon$	$2 \mu\epsilon$	-	20 x 100 x 10 mm	-	IFOS
OEFDS-100	5 mm a 50 mm	$\leq 0.1 \%$	$\leq 1 \%$	90x 130 mm	Sensor de desplazamiento	O/E LAND
OESTS	$\pm 1000 \mu\epsilon$ $\pm 5000 \mu\epsilon$ (SEN-500)	$1 \mu\epsilon$	-	Según el modelo	Sensores strain O/E LAND	O/E LAND
OBSG-120	$\pm 5000 \mu\text{m/m}$	$< 1 \mu\text{m/m}$	$\pm 10 \mu\text{m/m}$	120 x 20 mm	Permite conexiones en serie	SCAIME

3.1.2. Tabla comparativa de sensores basados en strain

Aquí se muestran sensores FBG que miden otras variables, pero están basados en strain, algunos de ellos se desarrollan más adelante. Otros sin embargo, solo se desarrollan aquí, porque el número de sensores de ese tipo en el mercado es muy reducido.

	Tipo	Rango	Resolución	Precisión	Observaciones	Fabricante
<i>Pressure Sensor P-01</i>	Presión	1-150 bar	≤ 0.125 %	≤ 0.25 %	Incluye compensación de temperatura	FOS&S
<i>SmartCell</i>	Presión	10, 20 o 100 bar modificable:2 a 700 bar	0.01 a 0.002 %FS	< 0.25 %FS a < 0.1 %FS	Sensibilidad: 450 a 3000 pm/FS	SMART FIBRES
<i>Downhole</i>	Presión	Atmosférica a 350 bar	0.05 % FS	0.1 % FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>Bottomhole</i>	Presión	Atmosférica a 350 bar	0.05 % FS	0.1 % FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>SmartPort</i>	Presión	Atmosférica a 1000 bar	0.01 % FS	< 0.1 % FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>LP SmartPort</i>	Presión	Atmosférica a 350 bar	0.01 % FS	< 0.1 % FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>Pressure FBG</i>	Presión	0.35 a 10 Mpa	0.05 % FS	0.3 % FS	Mide nivel de agua Diferentes rangos	Welltech instrument
<i>WPS-30</i>	Presión	-50 kpa a 300 kpa	0.01 % FS	-	Mide nivel de agua	IFOS
<i>OEFPS-100</i>	Presión	1 MPb a 50 MPb	≤ 0.01 % FS	≤ 1 % FS	Sensor de temperatura integrable	O/E LAND
<i>Load Cell LC-01</i>	Carga	1-150 bar	≤ 0.125 %	≤ 0.25 %	Incluye compensación de temperatura	FOS&S
<i>FS6400</i>	Inclinación	6 deg o 10 deg	0.002 deg	±0.01 deg	Sensibilidad: 450 pm/deg Incluye compensación de temperatura	FiberSensing
<i>M-A TILTMETER</i>	Inclinación	±3 deg	0.001 deg	±0.01 deg	Sensibilidad: 450 pm/deg Incluye compensación de temperatura	smartec
<i>Tilt FBG</i>	Inclinación	±3 deg	-	0.3 % F.S.	-	Welltech instrument
<i>IPS-30</i>	Inclinación	±3 deg	-	0.005 deg	Compensa temperatura	IFOS
<i>Level Meter</i>	Nivel	250 mm	0.1 mm	0.2 mm	Sirve para vasos comunicantes	smartec

3.1.3. Instrumentación

La instrumentación de estos sensores está compuesta por interrogadores, tanto estáticos como dinámicos, y software-s de análisis de los datos.

Existen interrogadores con diferente número de canales, que soportan un mayor o menor número de sensores FBG.

Los interrogadores dinámicos son los que ofrecen una respuesta más rápida (> 1 muestra/s), mientras que los estáticos son más lentos (< 1 muestra/s).

El interrogador se elegirá en función de la aplicación y el presupuesto.

Para realizar medidas cuasi-distribuidas con más de una fibra, con varios sensores en cada fibra, a veces se utilizan switch-s ópticos, si el número de canales de interrogador no es suficiente.

3.1.4. Empresas fabricantes

Hay en el mercado algunas empresas importantes, que a pesar de no tener un catálogo de sensores comercial, ofrecen la posibilidad de fabricarlos a medida. Para los sensores FBG estas son las empresas que ofrecen ese servicio:

- ◆ ***BLUE ROAD RESEARCH***
- ◆ ***Broptics***
- ◆ ***ITF Labs***
- ◆ ***IXFIBER***
- ◆ ***OFS***

3.2. Interferometría Fabry-Perot

Las técnicas de interferometría Fabry-Perot dan lugar a una amplia variedad de sensores. Dentro de esta tecnología destacan FISO y opSens. Los sensores de opSens utilizan interferometría de baja coherencia pero su fundamento sensor es Fabry-Perot

3.2.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Sens transversa	Interferómetro	Observaciones	Fabricante
<i>FOS-N</i>	±1000 $\mu\epsilon$, ±2500 $\mu\epsilon$, ±5000 $\mu\epsilon$	0.01 %	< 0.1 %	Fabry-Perot	-	FISO
<i>SFO-W</i>	±1000 $\mu\epsilon$, ±1500 $\mu\epsilon$, ±2000 $\mu\epsilon$	0.01 %	< 0.1 %	Fabry-Perot	Soldable	FISO
<i>EFO</i>	±1000 $\mu\epsilon$, ±1500 $\mu\epsilon$, ±2000 $\mu\epsilon$, ±3000 $\mu\epsilon$	0.01 %	< 0.1 %	Fabry-Perot	Integrable en hormigón	FISO
<i>OSP-A</i>	±1000 $\mu\epsilon$ / ±2500 $\mu\epsilon$ / ±5000 $\mu\epsilon$	0.15 $\mu\epsilon$ / 0.3 $\mu\epsilon$ / 0.5 $\mu\epsilon$		WLPI	Tamaño minúsculo	opSens

3.2.2. Instrumentación

Los acondicionadores de señal son la instrumentación necesaria para utilizar esta tecnología.

SENSORES PARA MEDIDAS DISTRIBUIDAS

3.3. Fiber Bragg Grating (FBG)

Se trata de una solución particular creada por la empresa LUNA Technologies por lo que solo existe un sensor en el mercado. Su funcionamiento está explicado en el bloque anterior. Este sensor permite monitorizar temperatura y strain de forma distribuida.

3.3.1. Características del sensor DSS 4300

	Rango	Resolución	Resolución espacial	Longitud
Temperatura	-50°C a 300°C	±0.1°C	1.0 cm	70 m
Strain	± 7000 $\mu\epsilon$	±1 $\mu\epsilon$		

3.4. Scattering de Brillouin

Esta tecnología ofrece una solución óptima para la monitorización de strain de forma distribuida, ya que con ella también es posible la monitorización de la temperatura. Por ello es una tecnología ideal para ser usada en la industria petrolera entre otras.

Otra de las ventajas que ofrece Brillouin es la posibilidad de utilizar fibra monomodo estándar de telecomunicaciones para realizar la monitorización.

En general las empresas que ofrecen este servicio se encargan de la instalación y de elegir la mejor instrumentación según las necesidades del cliente. De hecho muchas de ellas ofrecen el servicio pero no tienen un catálogo comercial con sus soluciones.

3.4.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Res espacial	Longitud	Canales	Observaciones	Fabricante
DSTA-R	$\pm 3 \%$	2 $\mu\epsilon$	0.1 m	50 km	2	Monitoriza temperatura	Omnisens
D-Light	$\leq 0.5 \%$ a 2 %	-	0.5 m	10 km	2	Incertidumbre: 40 a 80 $\mu\mu$	Omnisens
DTSS	limitado por la fibra	20 $\mu\epsilon$	1 m	24 km	-	Monitoriza temperatura Res Presión: 2 psi	sensornet
OZ-DTSS	2 % a 3 %	0.1 $\mu\epsilon$	Según modelo	50 km o 100 km	1 o 2	Monitoriza temperatura	OZoptics
NBX-6000	-30000 $\mu\epsilon$ a 40000 $\mu\epsilon$	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura Precisión: $\pm 25 \mu\epsilon$	NEUBREX
NBX-6000(PM)	-30000 $\mu\epsilon$ a 40000 $\mu\epsilon$	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura Precisión: $\pm 25 \mu\epsilon$ Mantiene la polarización	NEUBREX
NBX-6010	-30000 $\mu\epsilon$ a 40000 $\mu\epsilon$	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura y presión Precisión: $\pm 15 \mu\epsilon$	NEUBREX
NBX-6020	-30000 $\mu\epsilon$ a 40000 $\mu\epsilon$	-	≥ 2 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura Precisión: $\pm 25 \mu\epsilon$	NEUBREX
NBX-6030	-30000 $\mu\epsilon$ a 40000 $\mu\epsilon$	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura Precisión: $\pm 15 \mu\epsilon$	NEUBREX
NBX-6040	-30000 $\mu\epsilon$ a 40000 $\mu\epsilon$	-	≥ 10 cm	50 m a 25 km	-	Monitoriza temperatura Precisión: $\pm 7.5 \mu\epsilon$	NEUBREX
FOSTA	-	10 $\mu\epsilon$	≥ 1 m	10 km (DTSS-LR) 30 km (DTSS-XR)	-	Monitoriza temperatura	FOSTA

3.4.2. Instrumentación

La instrumentación de estos sistemas consiste en cables, con diferentes recubrimientos y distinto número de fibras en su interior, y software-s de procesamientos y análisis de datos.

3.4.3. Empresas fabricantes

Es muy común en los sistemas distribuidos que algunas empresas ofrezcan el sistema sensor y la instalación ajustado a las necesidades del cliente, sin que anuncien sus sensores detalladamente. Estas son algunas de las empresas que ofrecen sistemas de monitorización por scattering de Brillouin:

- ◆ *QOREX*
- ◆ *SILIXA*

3.5. Scattering de Rayleigh

Esta tecnología ofrece una solución óptima para la monitorización de strain de forma distribuida, ya que con ella también es posible la monitorización de la temperatura. Por ello es una tecnología ideal para ser usada en la industria petrolera entre otras, aunque la importancia de su nombre en el mercado es menor que la de Brillouin.

En general las empresas que ofrecen este servicio se encargan de la instalación y de elegir la mejor instrumentación según las necesidades del cliente. Muchas de las empresas ofrecen el servicio pero no tienen un catálogo comercial con sus soluciones., de hecho solo se ha encontrado un sensor de este tipo en el mercado. El sensor encontrado ha sido fabricado por LUNA Technologies.

3.5.1. Características del sensor OBR 4600

	Rango	Resolución	Precisión	Resolución espacial	Longitud
Temperatura	0°C a 300°C (aumentable)	±0.1°C	±0.2°C	±1.0 cm	70 m
Strain	2 %	±1 με	±1 με		

3.5.2. Empresas fabricantes

Es muy común en los sistemas distribuidos que algunas empresas ofrezcan el sistema sensor y la instalación ajustado a las necesidades del cliente, sin que anuncien sus sensores detalladamente. Estas son algunas de las empresas que ofrecen sistemas de monitorización por scattering de Rayleigh:

- ◆ *FOtech solutions*
- ◆ *QinetiQ*
- ◆ *QOREX*
- ◆ *SILIXA*

3.6. Interferometría de baja coherencia

Se trata de un sistema para monitorizar el strain llamado SOFO que comercializa Smartec. El sistema está diseñado para monitorizar distancias pequeñas con una resolución muy alta.

3.6.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Precisión	Long activa(LA)	Observaciones	Fabricante
<i>STAND</i>	-0.5 % LA a 1 % LA	2 μ m RMS	± 0.2 %	0.25 m a 10 m	-	smartec
<i>SMARTape</i>	± 1.5 %	1.5 %	1.5 %	100 mm a 2 m (SMARTape Flexi) 100 mm a 10 m (SMARTape Compact)	2 modelos	smartec
<i>SMARTprofile</i>	± 1.5 %	2 μ m (Marine) 10 μ m (Flexi)	< 0.2 %	100 mm a 2 m	2 modelos	smartec
<i>Concrete sensor</i>	-	-	< 0.2 %	100 mm a 2 m	Monitoriza el tiempo de secado del hormigón	smartec

3.6.2. Instrumentación

La instrumentación principal de este sistema está compuesta por un sistema de adquisición de datos y un software.

3.7. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

3.7.1. Lista de empresas

Fiber Bragg Grating:

- AOS GmbH
- FIBERPRO
- FiberSensing
- FOSTA
- FOS&S
- IFOS
- Microm Optics
- O/E LAND
- SCAIME
- SMART FIBRES
- smartec
- Welltech instrument
- Empresas que fabricantes:
 - BLUE ROAD RESEARCH
 - Broptics
 - ITF Labs
 - IXFIBER
 - OFS

Interferometría Fabry-Perot:

- FISO
- opSens

Fiber Bargg Grating distribuido:

- LUNA Technologies

Scattering de Brillouin:

- FOSTA
- NEUBREX
- Omnisens
- OZoptics
- sensornet
- Empresas fabricantes:
 - QOREX
 - SILIXA

Scattering de Rayleigh:

- LUNA Technologies
- Empresas fabricantes:
 - FOtech solutions
 - QinetiQ
 - QOREX
 - SILIXA

Interferometría de baja coherencia:

- smartec

3.7.2. Bibliografía

FBG:

- <http://destec-corp.com/download/12/>
- <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/11821>
- <http://www.cenam.mx/simposio2010/info/pjueves/sm2010-jp03b>.

Interferometría:

- Fraden Jacob, “HANDBOOK OF MODERN SENSORS”, Ed Springer, 2004, ISBN:978-0-387-00750-2
- <http://www.opsens.com/pdf/WLPIREV2.3.pdf>
- <http://www.evaluationengineering.com/index.php/solutions/instrumentation/temperature-measurement-improves-patient-care.html>
- <http://www.hindawi.com/journals/js/2009/720980/>
- http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/libros2_TH/lib106/pdf/lib106/in_7.pdf
- Lopéz-Higuera Jose Miguel “HANDBOOK OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY”, Ed John Wiley & Sons Ltd, 2002, ISBN: 0-471-82053-9

FBG distribuido:

- http://www.lunatechnologies.com/products/DSS/files/DSS-4300_Data_Sheet_2009.pdf
- <http://www.lunatechnologies.com/products/DSS/dss.html>
- <http://www.lunatechnologies.com/technology/distributed-sensing.html>

Brillouin:

- http://en.wikipedia.org/wiki/Brillouin_scattering
- <http://www.waset.org/journals/waset/v42/v42-55.pdf>
- http://www.rp-photonics.com/brillouin_scattering.html
- Lopéz-Higuera Jose Miguel “HANDBOOK OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY”, Ed John Wiley & Sons Ltd, 2002, ISBN: 0-471-82053-9

Rayleigh:

- <http://www.waset.org/journals/waset/v42/v42-55.pdf>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Dispersi%C3%B3n_de_Rayleigh
- http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_scattering
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>

Interferometria de baja coherencia

- <http://smartec.ch/PDF/SDS%2010.1000%20SOFO%20Technology.PDF>
- López-Higuera Jose Miguel “HANDBOOK OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY”, Ed John Wiley & Sons Ltd, 2002, ISBN: 0-471-82053-9

4. Acelerómetros

4.1. Fiber Bragg Grating

Los acelerómetros son un caso particular de sensores de strain basados en FBG, sin embargo debido a su importancia en el mercado les hemos dedicado un capítulo entero. Su funcionamiento está explicado en el bloque anterior dentro de los principios de funcionamiento de los FBG-s.

Los acelerómetros se emplean para medir vibraciones y oscilaciones en muchas máquinas e instalaciones, así como para el desarrollo de productos. La medición proporciona la aceleración de la vibración,

Ofrece las mismas ventajas otros sensores FBG:

- ✓ Capacidad de Multiplexación de varios transductores para compartir un equipo terminal costoso y reducir la cantidad de cableado necesario. Pudiéndose multiplexar instrumentos que miden distintas variables
- ✓ Codificación de longitudes de onda
- ✓ Producción en masa a costo razonable
- ✓ Posibilidad de lograr largas distancias entre los sensores y los dispositivos de adquisición de datos.

4.1.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Sensibilidad	Rango Frec	Frec resonancia	Observaciones	Fabricante
<i>os7100</i>	-	-	16 pm/g	DC a 300 Hz	700 Hz	Máx shok: 100g	Microm Optics
<i>FS6500</i>	±10 g	12.5 μg/√Hz	75 pm/g	0 a 50 Hz	430 Hz	Sens transversal: < 2 %	FiberSensing
<i>GS6500</i>	±40 g	1 x 10 ⁻³ g	-	-	-	-	FiberSensing
<i>Smart Accel 40g</i>	±40 g	-	4 a 10 pm/g	0 a 1 kHz	> 1.3 kHz	-	SMART FIBRES

CATFISH-1000	±3 g	-	4 a 10 pm/g	0 a 1 kHz	> 1.3 kHz	-	NEWPORT sensors
Acceleration FBG	±1 g a ±50 g	≤ 1 % FS	-	0 Hz a 40 Hz 0 Hz a 1000H	-	Diferentes rangos	Welltech instrument
BPS-700	±2 g	0.01 % FS	-	0 Hz a 40 Hz	-	-	IFOS
OEFAS-100	1 g a 2 g	< 0.1 % FS	≤ 1 % F.S.	-	-	-	O/E LAND

4.1.2. Instrumentación

La instrumentación de estos sensores está compuesta por interrogadores, tanto estáticos como dinámicos, y software-s de análisis de los datos.

Existen interrogadores con diferente número de canales, que soportan un mayor o menor número de sensores FBG.

Los interrogadores dinámicos son los que ofrecen una respuesta más rápida (> 1 muestra/s), mientras que los estáticos son más lentos (< 1 muestra/s).

El interrogador se elegirá en función de la aplicación y el presupuesto.

Para realizar medidas cuasi-distribuidas con más de una fibra, con varios sensores en cada fibra, a veces se utilizan switch-s ópticos, si el número de canales de interrogador no es suficiente.

4.2. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

4.2.1.Lista de empresas

Fiber Bragg Grating:

- FiberSensing
- IFOS
- Microm Optics
- NEWPORT sensors
- O/E LAND
- SMART FIBRES
- Welltech instrument

4.2.2.Bibliografía

FBG:

- <http://destec-corp.com/download/12/>
- <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/11821>
- <http://www.cenam.mx/simposio2010/info/pjueves/sm2010-jp03b>.
- <http://lib.semi.ac.cn:8080/tsh/dzzy/wsqq/SPIE/vol15877/58770Z.pdf>

5. Sensores de corriente

5.1. Efecto Faraday

Los sensores de corriente de fibra óptica que funcionan gracias al efecto Faraday presentan una gran cantidad de ventajas:

- ✓ La medida se realiza sin contacto, sin tener que colocar el sensor en serie.
- ✓ Al estar basados en fibra óptica son sensores pasivos y dieléctricos, ideales para entornos de alta tensión.
- ✓ No presentan saturación magnética.
- ✓ Su tamaño es pequeño, su peso ligero y son fácilmente integrables.
- ✓ Proporcionan alta precisión, un amplio rango dinámico y gran ancho de banda.
- ✓ Su instrumentación puede encontrarse a cientos de metros, de forma que se encuentre aislada de los fuertes campos electromagnéticos que provoca una línea de alta tensión por ejemplo.

5.1.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Precisión	Repetibilidad	Observaciones	Fabricante
<i>FOMAS</i>	10 kA a 1000 kA	1 %	-	-	fiberware
<i>FOCS</i>	10 kA a 500 kA	±0.1 %	±0.02 %	Detecta corriente inversa	ABB
<i>COSI-NXCT</i>	1 A rms a 63 kA rms	±0.2 % (según el modelo)	-	-	ALSTOM
<i>COSI-NXCM</i>	-	±0.15 % (mínima)	-	-	ALSTOM
<i>COSI-NXCT F3</i>	1 A a 500 kA (según el modelo)	±0.1 % (según el modelo)	-	3 modelos	ALSTOM

5.1.2. Instrumentación

La instrumentación necesaria para estos sensores son dispositivos que proporcionan el valor de la corriente en función de la variación de la polarización de la luz.

5.2. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

5.2.1. Lista de empresas

Efecto de Faraday:

- ABB
- ALSTOM
- fiberware

5.2.2. Bibliografía

Efecto Faraday:

- http://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_effect
- <http://www.fiberware.de/eng/sensorik.htm>
- http://www.fer.hr/_download/repository/Doktorski_Predavanje_Sipus_2.pdf
- <http://www.ieee.ch/pes/downloads/052kbohnertopticalsensors.pdf>

6. Sensores químicos

6.1. Fluorescencia óptica

Los sensores químicos de fibra óptica presentan ventajas sobre otros sensores químicos:

- ✓ Permiten medidas tanto en gases como en líquidos con el mismo sensor.
- ✓ Son inmunes a cambios ambientales, solo responden al compuesto que miden, al contrario que algunos sensores no de fibra óptica. Por ejemplo algunos sensores que miden la concentración de oxígeno y funcionan gracias a otras tecnologías pueden verse afectados por las variaciones de pH, salinidad, etc.
- ✓ Son inmunes a otras sustancias químicas que no son la que se pretende medir.
- ✓ Rápida respuesta.
- ✓ No consumen el elemento que miden, por lo que les permite estar siempre en contacto con el medio a medir. Por ejemplo, si son de oxígeno, no consumen oxígeno para realizar la medida.
- ✓ No es necesaria la recalibración frecuente.
- ✓ Las sondas soportan temperaturas del torno a $\pm 80^{\circ}\text{C}$

6.1.1. Tabla comparativa de sensores

	Mide	Rango	Resolución	Precisión	Observaciones	Fabricante
NeoFox FOXY (patch)	Oxígeno	0 % a 100 % 0 ppm a 40 ppm (DO)	0.05 % 20 ppb (DO)	5 % 5 % (DO)	Min nivel detec: 0.1 % Min nivel detec: 40 ppb	Ocean Optics
NeoFox FOSPOR (patch)	Oxígeno	0 % a 10 % 0 ppm a 4 ppm (DO)	0.01 % 4 ppb (DO)	5 % 5 % (DO)	Min nivel detec: 0.01 % Min nivel detec: 4 ppb	Ocean Optics
NeoFox HIOXY (patch)	Oxígeno	0 % a 20 % 0 ppm a 8 ppm (DO)	0.05 % 20 ppb (DO)	5 % 5 % (DO)	Min nivel detec: 0.1 % Min nivel detec: 40 ppb Atmósferas de hidrocarburos	Ocean Optics
NeoFox FOXY (probe)	Oxígeno	0 % a 100 % 0 ppm a 40 ppm (DO)	100 ppm 4 ppb (DO)	< 5 % < 5 % (DO)	Min nivel detec: 0.01 % a 0.05 %	Ocean Optics

NeoFox FOSPOR (probe)	Oxígeno	0 % a < 10 % 0 ppm a 4 ppm (DO)	10 ppm 0.4 ppb (DO)	< 5 % < 5 % (DO)	Min nivel detec: 0.001 % a 0.01 %	Ocean Optics
NeoFox HIOXY (probe)	Oxígeno	0 % a 20.9 % 0 ppm a 8 ppm (DO)	100 ppm 4 ppb (DO)	< 5 % < 5 % (DO)	Min nivel detec: 0.01 % a 0.05 % Atmósferas de hidrocarburos	Ocean Optics
NeoFox Sport	Mismas propiedades que NeoFox pero portátil, para medidas de campo					Ocean Optics
pH Sensor Probes	pH	5 a 9	0.02 pH	< 1 %	Funciona con espectrómetro Jaz	Ocean Optics
RJC-O2-TEMP	Oxígeno	0 mmHg a 800 mmHg	1 mmHg	± 1 mmHg ± 5 %	Mide también temperatura	RJC enterprises
getOtwo	Oxígeno (DO)	0.01 mg/l a 20 mg/l 0 % a 200 % (Sat) 0 mbar a 400 mbar	0.01 mg o 0.1 mg/l 0.1 % Sat 0.2 mbar	± 1 %	-	getAMO

6.1.2. Instrumentación

En este caso la instrumentación es muy variada (en tipo no en número) y depende mucho del fabricante.

Ocean Optics ofrece sondas, parches, cubetas, un software, etc.

RJC ofrece un acondicionador de señal.

6.2. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

6.2.1.Lista de empresas

Fluorescencia óptica:

- getAMO
- Ocean Optics
- RJC enterprises

6.2.2.Bibliografía

Fluorescencia óptica:

- <http://es.wikipedia.org/wiki/Fluorescencia>
- Fraden Jacob, “HANDBOOK OF MODERN SENSORS”, Ed Sringer, 2004, ISBN:978-0-387-00750-2
- http://www.getamo.com/www/getSens.nsf/main.html?open&lang=EN&id=tech_fluorescence_EN
- <http://lumasenseinc.com/EN/solutions/techoverview/fluoroptic/>
- <http://www.oceanopticsensors.com/theory.htm>
- <http://www.oceanopticsensors.com/products/fibervelectrode.htm>

7. Giroscopios

7.1. Efecto Sagnac

El gir6scopo de fibra 6ptica es un dispositivo capaz de detectar rotaciones mec6nicas mediante la interferencia de dos haces de luz.

Este giroscopio (conocido tambi6n por sus siglas en ingl6s FOG) aporta informaci6n extremadamente precisa de la rotaci6n a la que est6 sometido el sistema.

A diferencia del giroscopio tradicional, el FOG no tiene partes m6viles, ni resistencia al movimiento. Los FOG-s proporcionan una lectura muy precisa de la tasa de rotaci6n gracias a su insensibilidad a las vibraciones, a la aceleraci6n, a los choques y a su insensibilidad entre ejes (cross-axis sensibility). Su precisi6n es incluso mayor que la del giroscopio l6ser.

Otra de las ventajas del FOG frente a otros giroscopios es que se trata de un elemento pasivo, ideal para ser utilizado en entornos sensibles a las radiaciones electromagn6ticas.

Este dispositivo se usa en tareas de vigilancia, estabilizaci6n y navegaci6n, tanto a6rea como marítima.

7.1.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango entrada (Rate range)	Estabilidad Bias	Estabilidad factor de escala	ARW	BW	Observaciones	Fabricante
<i>DSP-1500 Digital</i>	$\pm 204^\circ/s$	$\leq 5^\circ/h$	1.0 ($\pm 0.2\%$)	$\leq 8^\circ/h\sqrt{Hz}$	440 Hz ($\pm 5\%$)	Ultra compacto	KVH
<i>DSP-1500 Anal6gico</i>	$\pm 204^\circ/s$	$\leq 9^\circ/h$	36 mV $^\circ/s$ ($\pm 1\%$)	$\leq 12^\circ/h\sqrt{Hz}$	3800 Hz ($\pm 5\%$)	Ultra compacto	KVH
<i>DSP-3000 Digital</i>	$\pm 375^\circ/s$	$\leq 1^\circ/h$	< 500 ppm (rate: $\leq \pm 150^\circ/s$) < 1000 ppm (rate: $\geq \pm 150^\circ/s$)	0.0667 $^\circ/\sqrt{h}$ (4 $^\circ/h/\sqrt{Hz}$)	44 Hz o 440 Hz	FOG m6s vers6til de KVH	KVH

DSP-3000 Analógico	±100°/s	≤3°/h	< 500 ppm (rate: ≤ ±150°/s) N/A (rate: ≥ ±150°/s)	0.1°/√h (6°/h/√Hz)	200 Hz	FOG más versátil de KVH	KVH
DSP-3100 Digital	±375°/s	≤1°/h	< 500 ppm (rate: ≤ ±150°/s) < 1000 ppm (rate: ≥ ±150°/s)	0.0667°/√h (4°/h/√Hz)	440 Hz	Salida de datos de alta velocidad	KVH
DSP-3400 Digital	±375°/s	≤1°/h	< 500 ppm (rate: ≤ ±150°/s) < 1000 ppm (rate: ≥ ±150°/s)	0.0667°/√h (4°/h/√Hz)	440 Hz	Carcasa robusta Conector Samtec	KVH
DSP-4000 Digital	±375°/s	≤1°/h	N/A	0.0667°/√h (4°/h/√Hz)	440 Hz	Aplicaciones militares	KVH
DSP-4000 Analógico	±100°/s	≤10°/h	100 mV°/s	0.1°/√h (6°/h/√Hz)	100 Hz	Aplicaciones militares	KVH
VG 103 PT	250°/s	0.003°/s	0.03 %	0.002°/s√Hz	1 kHz	-	Fizoptika
VG 099 F	150°/s	5°/h	0.1 %	0.04°/s√Hz	0.45 kHz	-	Fizoptika
VG 910 D	150°/s	10°/h	0.1 %	0.03°/s√Hz	0.1 kHz	-	Fizoptika
VG 910 H	160°/s	10°/h	0.1 %	0.03°/s√Hz	1 kHz	-	Fizoptika
VG 910	150°/s	10°/h	0.1 %	0.05°/s√Hz	1 kHz	-	Fizoptika
VG 949 P	230°/s	20°/h	0.1 %	0.05°/s√Hz	1 kHz	-	Fizoptika
VG 949 PD	230°/s	20°/h	0.1 %	0.05°/s√Hz	0.1 kHz	-	Fizoptika
VG 091 A	300°/s	30°/h	0.1 %	0.05°/s√Hz	1 kHz	-	Fizoptika
VG 095 M	300°/s	15°/h	0.1 %	0.03°/s√Hz	0.45 kHz	-	Fizoptika
VG 091 B	±300°/s	30°/h	0.1 %	0.05°/s√Hz	1 kHz	-	Fizoptika
VG 071 P	350°/s	20°/h	0.1 %	0.07°/s√Hz	1 kHz	-	Fizoptika
VG 071 3D	350°/s	20°/h	0.1 %	0.07°/s√Hz	-	3 FOG-s (mide en XYZ)	Fizoptika
VG 035 P	60°/s	1°/h	0.1 %	0.015°/s√Hz	0.45 kHz	-	Fizoptika
VG 035 K	60°/s	0.3°/h	0.1 %	0.015°/s√Hz	0.45 kHz	-	Fizoptika
VG 035 PD	60°/s	1°/h	0.1 %	0.015°/s√Hz	0.1 kHz	-	Fizoptika
VG 910 Q	150°/s	3°/h	0.1 %	0.04°/s√Hz	0.45 kHz	-	Fizoptika
VG 099 F	150°/s	5°/h	0.1 %	0.04°/s√Hz	0.45 kHz	-	Fizoptika
VG 099 D	150°/s	10°/h	0.1 %	0.03°/s√Hz	0.1 kHz	-	Fizoptika
VG 091 3D	300°/s	30°/h	0.1 %	0.05°/s√Hz	-	3 FOG-s (mide en XYZ)	Fizoptika
TINA-A	±60°/s	15°/h	166.7 mVdc/deg/s ± 3 %	0.2°/√h	60 Hz	Aplicaciones militares	IAI
TINA-B	±60°/s	180°/h	100 mVdc/deg/s ± 3 %	0.2°/√h	30 Hz	Aplicaciones militares	IAI
TINA-C	±60°/s	180°/h	100 mVdc/deg/s ± 3 %	0.2°/√h	30 Hz	Aplicaciones militares	IAI
ASTRIX 120	±40°/s	0.01°/h	0.048 arcsec/increment	≤ 0.0025°/√h	-	Aplicaciones en satélites	IXSEA
ASTRIX 200	±10°/s	0.01°/h	0.005 arcsec/increment	≤ 0.0002°/√h	-	Aplicaciones en satélites	IXSEA

<i>iOLFOG-S-D</i>	±200°/s	<0.002°/h	<0.2 %	0.10°/√h	100 Hz	Rate modificable hasta 4000°/s	iMAR
<i>EMP-1</i>	1000°/s (tasa max)	0.1°/h (corto) 0.5°/h (largo)	100 ppm	0.020°/√h	-	-	emcore
<i>EMP-1.2k</i>	1000°/s (tasa max)	0.005°/h (corto) 0.01°/h (largo)	50 ppm	0.0015°/√h	-	-	emcore
<i>HOFG-1(A)</i>	±60°/s	0.05°/s	± 0.5 % // ± 1.5 %	≤ 0.1°/√h // ≤ 0.15°/√h	50 Hz	-	Hitachi Cable
<i>HOFG-OLC</i>	±120°/s	0.1°/s	± 1 %	-	30 Hz	-	Hitachi Cable

7.1.2. Girocompases

Los girocompases se crean integrando en un solo dispositivo uno o varios giroscopios de fibra óptica (FOGs) junto con diferentes dispositivos como acelerómetros MEMS, dispositivos GPS, procesadores digitales de señal, etc. A pesar de no ser sensores de fibra óptica exclusivamente, deben ser mencionados en cualquier estudio sobre el tema por su importancia. Los girocompases son dispositivos fundamentales para posicionamiento y navegación, tanto aérea como marítima.

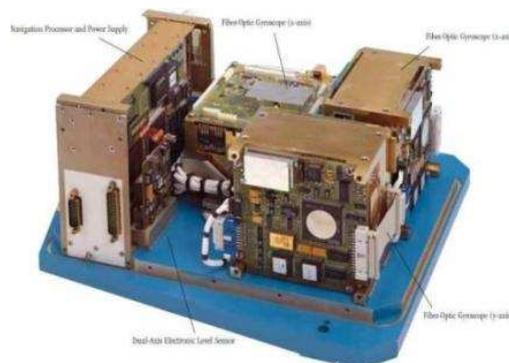
Siendo el FOG un dispositivo que permite medir una variación angular, los girocompases proporcionan los ángulos de cabeceo (pitch), alabeo (roll) y guiñada (heading o yaw). Además de estos ángulos y dependiendo con que otros dispositivos estén integrados, pueden proporcionar información del desplazamiento longitudinal (surge), transversal (sway) y de subida/bajada (heave), de las coordenadas exactas, etc.

Los girocompases tienen especial importancia en aviación, navegación, guiado de vehículos por control remoto, guiado de misiles, submarinos y control y apuntamiento de armas pesadas. Como puede observarse destaca su utilización militar, aunque la utilización civil también tiene su importancia.

Estas son algunas de las empresas que destacan en la fabricación de girocompases:

- CDL
- iMAR
- IXSEA
- KVH
- NORTHROP GRUMMAN

En la aplicación es posible ver 3 ejemplos de girocompases de diferentes empresas:



7.2. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

7.2.1. Lista de empresas

Efecto Sagnac:

- emcore
- Fizoptika
- Hitachi Cable
- IAI
- iMAR
- IXSEA
- KVH

7.2.2. Bibliografía

Efecto Sagnac:

- http://es.wikipedia.org/wiki/Gir%C3%B3scopo_de_fibra_%C3%B3ptica
- http://en.wikipedia.org/wiki/Fibre_optic_gyroscope
- <http://www.neubrex.com/htm/applications/gyro-principle.htm>
- <http://www.fizoptika.com/description/index.html>
- López-Higuera Jose Miguel “HANDBOOK OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY”, Ed John Wiley & Sons Ltd, 2002, ISBN: 0-471-82053-9

8. Sensores de presión

8.1. Fiber Bragg Grating

Los sensores FBG de presión funcionan modificando el strain de la fibra óptica, por ello también son tenidos en cuenta el apartado de sensores de strain.

Por estar basados en tecnología FBG ofrecen las siguientes ventajas.

- ✓ Capacidad de Multiplexación de varios transductores para compartir un equipo terminal costoso y reducir la cantidad de cableado necesario
- ✓ Instalación embebida, integrada, adherida sobre la superficie o soldada sobre la superficie
- ✓ Codificación de longitudes de onda
- ✓ Producción en masa a costo razonable
- ✓ Resistentes a altas deformaciones
- ✓ Resistentes a altas y bajas temperaturas (Desde 4 grados Kelvin hasta 1000 °C), dependiendo del recubrimiento de la fibra.
- ✓ Posibilidad de lograr largas distancias entre los sensores y los dispositivos de adquisición de datos.

8.1.1. Tabla comparativa de sensores

	Tipo	Rango	Resolución	Precisión	Observaciones	Fabricante
<i>Pressure Sensor P-01</i>	Presión	1-150 bar	≤ 0.125 %	≤ 0.25 %	Incluye compensación de temperatura	FOS&S
<i>SmartCell</i>	Presión	10, 20 o 100 bar modificable: 2 a 700 bar	0.01 a 0.002 %FS	< 0.25 %FS a < 0.1 %FS	Sensibilidad: 450 a 3000 pm/FS	SMART FIBRES
<i>Downhole</i>	Presión	Atmosférica a 350 bar	0.05 % FS	0.1 % FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>Bottomhole</i>	Presión	Atmosférica a 350 bar	0.05 % FS	0.1 % FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES

<i>SmartPort</i>	Presión	Atmosférica a 1000 bar	0.01 % FS	< 0.1 % FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>LP SmartPort</i>	Presión	Atmosférica a 350 bar	0.01 % FS	< 0.1 % FS	Valido como sensor de temperatura	SMART FIBRES
<i>Pressure FBG</i>	Presión	0.35 a 10 Mpa	0.05 % FS	0.3 % FS	Mide nivel de agua Diferentes rangos	Welltech instrument
<i>WPS-30</i>	Presión	-50 kpa a 300 kpa	0.01 % FS	-	Mide nivel de agua	IFOS
<i>OEFPs-100</i>	Presión	1 MPb a 50 MPb	≤ 0.01 % FS	≤ 1 % FS	Sensor de temperatura integrable	O/E LAND

8.1.2. Instrumentación

La instrumentación de estos sensores está compuesta por interrogadores, tanto estáticos como dinámicos, y software-s de análisis de los datos.

Existen interrogadores con diferente número de canales, que soportan un mayor o menor número de sensores FBG.

Los interrogadores dinámicos son los que ofrecen una respuesta más rápida (> 1 muestra/s), mientras que los estáticos son más lentos (< 1 muestra/s).

El interrogador se elegirá en función de la aplicación y el presupuesto.

Para realizar medidas cuasi-distribuidas con más de una fibra, con varios sensores en cada fibra, a veces se utilizan switch-s ópticos, si el número de canales de interrogador no es suficiente.

8.1.3. Empresas fabricantes

Hay en el mercado algunas empresas importantes, que a pesar de no tener un catálogo de sensores comercial, ofrecen la posibilidad de fabricarlos a medida. Para los sensores FBG estas son las empresas que ofrecen ese servicio:

- ◆ **BLUE ROAD RESEARCH**
- ◆ **Broptics**
- ◆ **ITF Labs**

◆ **IXFIBER**

◆ **OFS**

8.2. Interferometría Fabry-Perot

Las técnicas de interferometría Fabry-Perot dan lugar a una amplia variedad de sensores. Dentro de esta tecnología destacan FISO y opSens. Los sensores de opSens utilizan interferometría de baja coherencia pero su fundamento sensor es Fabry-Perot

8.2.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Precisión	Observaciones	Fabricante
FOP-M260	±300 mmHg	< 0.3 mmHg (FPI-HR) < 0.1 mmHg (FPI-HS)	2 mmHg	Aplicaciones médicas	FISO
FOP-MIV	±300 mmHg (R1) -300 mmHg a 7500 mmHg (R2)	< 0.3 mmHg (R1) < 2.6 mmHg (R2)	1.5 % (R1) 0.1 % (R2)	Aplicaciones médicas	FISO
FOP-F125	±300 mmHg	< 0.4 mmHg	±8 mmHg	Aplicaciones médicas	FISO
FOP-M	0 psi a 5 psi, 0 psi a 50 psi, 0 psi a 150 psi, 0 psi a 1000 psi	< 0.2 %	±0.5 %	Soporta altas temperaturas	FISO
FOP-C	30 psi a 10000 psi	0.00625 %	0.25 %	-	FISO
FOP-MHP	0 psi a 3000 psi, 0 psi a 5000 psi	0.5 %	< 2 %	-	FISO
FOP-MH	0 psi a 150 psi, 0 psi a 1000 psi, 0 psi a 3000 psi 0 psi a 50 psi	0.1 %	±1 %	-	FISO
FOP-MS	0 psi a 5 psi, 0 psi a 50 psi, 0 psi a 150 psi, 0 psi a 1000 psi	0.1 %	±0.5 %	-	FISO
FOP-MSL	0 psi a 50 psi, 0 psi a 1000 psi	0.1 %	±0.5 %	-	FISO
FOP-MA	0 psi a 2 psi	0.0075 psi	±1 %	Alta precisión	FISO
RJC-PRES	500 mmHg a 1100 mmHg	< 0.1 mmHg	-	-	RJC enterprises

OPP-W	0 kPa a 8000 kPa	0.002 % FS	±0.2 % FS	Mide temperatura	opSens
--------------	------------------	------------	-----------	------------------	--------

8.2.2. Instrumentación

Los acondicionadores de señal son la instrumentación necesaria para utilizar esta tecnología.

8.3. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

8.3.1. Lista de empresas

Fiber Bragg Grating:

- FOS&S
- IFOS
- O/E LAND
- SMART FIBRES
- Welltech instrument
- Empresas que fabricantes:
 - BLUE ROAD RESEARCH
 - Broptics
 - ITF Labs
 - IXFIBER
 - OFS

Interferometría Fabry-Perot:

- FISO
- opSens
- RJC enterprise

8.3.2. Bibliografía

FBG:

<http://destec-corp.com/download/12/>

<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/11821>

<http://www.cenam.mx/simposio2010/info/pjueves/sm2010-jp03b>.

Interferometría:

- Fraden Jacob, “HANDBOOK OF MODERN SENSORS”, Ed Springer, 2004, ISBN:978-0-387-00750-2
- <http://www.opsens.com/pdf/WLPIREV2.3.pdf>
- <http://www.evaluationengineering.com/index.php/solutions/instrumentation/temperature-measurement-improves-patient-care.html>
- <http://www.hindawi.com/journals/js/2009/720980/>
- http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/libros2_TH/lib106/pdf/lib106/in_7.pdf
- López-Higuera Jose Miguel “HANDBOOK OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY”, Ed John Wiley & Sons Ltd, 2002, ISBN: 0-471-82053-9

9. Sensores de desplazamiento

9.1. Fiber Bragg Grating

Los sensores FBG de desplazamiento funcionan modificando el strain de la fibra óptica, por ello también son tenidos en cuenta el apartado de sensores de strain.

Por estar basados en tecnología FBG ofrecen las siguientes ventajas.

- ✓ Capacidad de Multiplexación de varios transductores para compartir un equipo terminal costoso y reducir la cantidad de cableado necesario
- ✓ Instalación embebida, integrada, adherida sobre la superficie o soldada sobre la superficie
- ✓ Codificación de longitudes de onda
- ✓ Producción en masa a costo razonable
- ✓ Resistentes a altas deformaciones
- ✓ Resistentes a altas y bajas temperaturas (Desde 4 grados Kelvin hasta 1000 °C), dependiendo del recubrimiento de la fibra.
- ✓ Posibilidad de lograr largas distancias entre los sensores y los dispositivos de adquisición de datos.

9.1.1. Tabla comparativa de sensores

	Rango	Resolución	Precisión	Dimensiones	Observaciones	Fabricante
<i>ASC-01</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	0.5m - 5m (long)	Posibilidad de varias galgas en serie	FOS&S
<i>Strain Cable SC-01</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	1 m a 5 m (modificable)	-	FOS&S
<i>Strain Cable SC-02</i>	25 mm 50 mm	< 8 μm	< 16 μm	50 cm (SC-02-50) 100 cm (SC-02-100)	-	FOS&S

<i>Strain Cable SC-03</i>	5000 $\mu\epsilon$	0.85 $\mu\epsilon$	1.7 $\mu\epsilon$	0.2 m a 1 m (modificable)	-	FOS&S
<i>Sensor MS-01</i>	200	< 0.04 μm	< 0.08 μm	70 mm a 100 mm	-	FOS&S
<i>Displacement D-01</i>	20/50/80 mm	1 %	1 %	-	-	FOS&S
<i>AOS Displacement</i>	0 a 3.5 mm	0.01 %	0.3 %	130 x 50 x 40 mm	-	AOSGmbH
<i>SmartBridge</i>	10 mm	≤ 0.05 %FS	≤ 0.5 %FS	150 x 90 x 35 mm	-	SMART FIBRES
<i>Displacement FBG</i>	100 mm o 250 mm	-	0.1 mm;	-	-	Welltech instrument
<i>DPS -200</i>	0 a 200 mm	1 pm	-	500 x \varnothing 47 mm	Compena temperatura	IFOS
<i>OEFDs-100</i>	5 mm a 50 mm	≤ 0.1 %	≤ 1 %	90x 130 mm	Sensor de temperatura integrable	O/E LAND

9.1.2. Instrumentación

La instrumentación de estos sensores está compuesta por interrogadores, tanto estáticos como dinámicos, y software-s de análisis de los datos.

Existen interrogadores con diferente número de canales, que soportan un mayor o menor número de sensores FBG.

Los interrogadores dinámicos son los que ofrecen una respuesta más rápida (> 1 muestra/s), mientras que los estáticos son más lentos (< 1 muestra/s).

El interrogador se elegirá en función de la aplicación y el presupuesto.

Para realizar medidas cuasi-distribuidas con más de una fibra, con varios sensores en cada fibra, a veces se utilizan switch-s ópticos, si el número de canales de interrogador no es suficiente.

9.1.3. Empresas fabricantes

Hay en el mercado algunas empresas importantes, que a pesar de no tener un catálogo de sensores comercial, ofrecen la posibilidad de fabricarlos a medida. Para los sensores FBG estas son las empresas que ofrecen ese servicio:

- ◆ **BLUE ROAD RESEARCH**
- ◆ **Bropitics**
- ◆ **ITF Labs**
- ◆ **IXFIBER**
- ◆ **OFS**

9.2. Interferometría Fabry-Perot

Las técnicas de interferometría Fabry-Perot dan lugar a una amplia variedad de sensores. Dentro de esta tecnología destacan FISO y opSens. Los sensores de opSens utilizan interferometría de baja coherencia pero su fundamento sensor es Fabry-Perot

9.2.1. Tabla comparativa de sensores

	Trazo lineal	Resolución	Precisión	Observaciones	Fabricante
FOD	25 mm	0.002mm	±0.02 mm	-	FISO
ODP-A	25 mm	1 μm	0.2 % FS	Repetibilidad: 0.05 % FS	opSens

9.2.2. Instrumentación

Los acondicionadores de señal son la instrumentación necesaria para utilizar esta tecnología.

9.3. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

9.3.1.Lista de empresas

Fiber Bragg Grating:

- AOSGmbH
- FOS&S
- IFOS
- O/E LAND
- SMART FIBRES
- Welltech instrument
- *Empresas que fabricantes:*
 - BLUE ROAD RESEARCH
 - Broptics
 - ITF Labs
 - IXFIBER
 - OFS

Interferometría Fabry-Perot:

- FISO
- opSens

9.3.2.Bibliografía

FBG:

- <http://destec-corp.com/download/12/>
- <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/11821>
- <http://www.cenam.mx/simposio2010/info/pjueves/sm2010-jp03b>.

Interferometría:

- Fraden Jacob, “HANDBOOK OF MODERN SENSORS”, Ed Sringer, 2004, ISBN:978-0-387-00750-2
- <http://www.opsens.com/pdf/WLPIREV2.3.pdf>
- <http://www.evaluationengineering.com/index.php/solutions/instrumentation/temperature-measurement-improves-patient-care.html>
- <http://www.hindawi.com/journals/js/2009/720980/>

- http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/libros2_TH/lib106/pdf/lib106/in_7.pdf
- López-Higuera Jose Miguel “HANDBOOK OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY”, Ed John Wiley & Sons Ltd, 2002, ISBN: 0-471-82053-9

10. Sensores de índice de refracción

10.1. Interferometría Fabry-Perot

Las técnicas de interferometría Fabry-Perot dan lugar a una amplia variedad de sensores. Dentro de esta tecnología destacan FISO y opSens.

Los sensores de índice de refracción son utilizados en las industrias químicas y de procesado de comida, además de medir la concentración de aceite en procesos industriales.

No existe mucha variedad en el mercado y solo se contempla un sensor de este tipo en este proyecto. El sensor está fabricado por FISO.

10.1.1. Características del sensor FRI

Rango	Resolución	Precisión	Dimensiones
1.0000 a 1.7000 RI	0.0001 RI	±0.0005 RI	10 mm x Ø 800 µm

10.1.2. Instrumentación

Los acondicionadores de señal son la instrumentación necesaria para utilizar esta tecnología.

10.2. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

10.2.1. Empresa fabricante

- FISO

10.2.2. Bibliografía

Interferometría:

- Fraden Jacob, “HANDBOOK OF MODERN SENSORS”, Ed Sringer, 2004, ISBN:978-0-387-00750-2
- <http://www.opsens.com/pdf/WLPIREV2.3.pdf>
- <http://www.evaluationengineering.com/index.php/solutions/instrumentation/temperature-measurement-improves-patient-care.html>
- <http://www.hindawi.com/journals/js/2009/720980/>
- http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/libros2_TH/lib106/pdf/lib106/in_7.pdf
- López-Higuera Jose Miguel “HANDBOOK OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY”, Ed John Wiley & Sons Ltd, 2002, ISBN: 0-471-82053-9
-

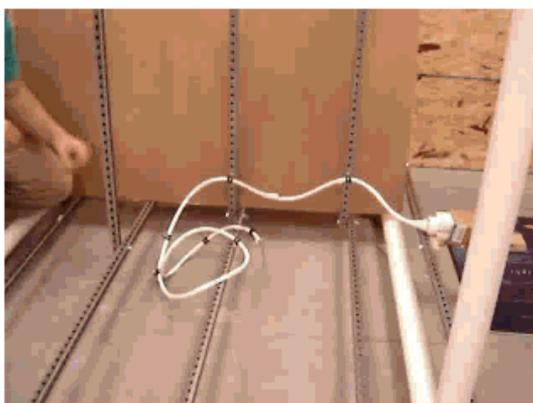
11. Sensores de forma - Shape sensing

11.1. Fiber Bragg Grating (distribuido)

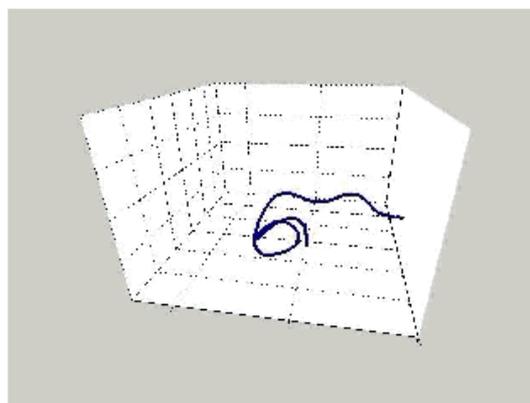
El sensor de forma es una solución que ofrece Luna Technologies solo bajo petición y fabricándolo según las necesidades del usuario, no existe un modelo en el mercado.

Su función es la detección y seguimiento de la forma de una fibra óptica. Puede seguir la posición de una fibra óptica a lo largo de toda su longitud. Se puede utilizar para controlar la forma dinámica en 3D de una estructura a la cual se conforma.

Se trata de un sistema mínimamente invasivo y prácticamente sin peso, cuyo funcionamiento es similar al sensor distribuido DSS 4300, pero el equipo no es el mismo



Aircraft wiring harness with embedded Luna shape sensing fiber



Calculated wiring harness shape in 3D coordinates

11.2. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

11.2.1. Empresa fabricante

-
- LUNA Technologies

11.2.2. Bibliografía

FBG distribuido:

- http://www.lunatechnologies.com/products/DSS/files/DSS-4300_Data_Sheet_2009.pdf
- <http://www.lunatechnologies.com/products/DSS/dss.html>
- <http://www.lunatechnologies.com/technology/distributed-sensing.html>

Sensor de forma:

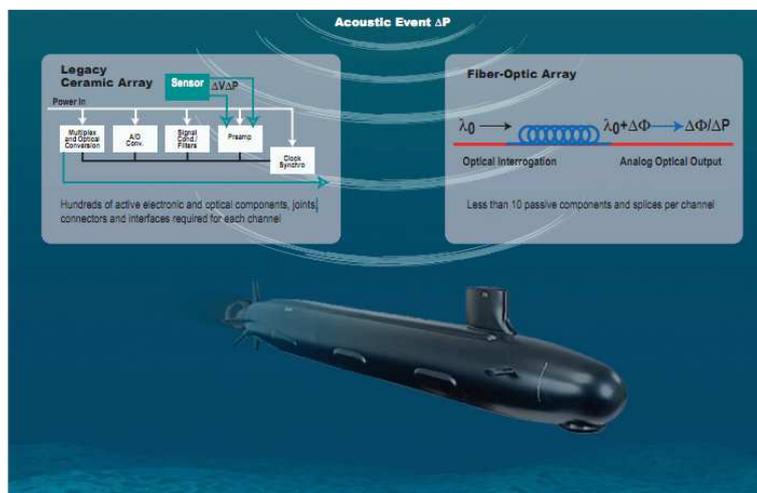
- <http://www.lunatechnologies.com/technology/shape-sensing.html>

12. Hidrófonos

12.1. Interferometría

Los hidrófonos son sensores acústicos que pueden ser colocados individualmente o en arrays de más de 100 km. Los array-s contienen pocos elementos y son totalmente pasivos. Con un transmisor-receptor remoto se completa toda la electrónica necesaria.

Los hidrófonos de fibra óptica superan a los cerámicos en su sencillez. Los cerámicos requieren corriente eléctrica, una electrónica mucho más compleja y que el equipamiento de procesado de señal esté cerca del sensor. Los hidrófonos de fibra óptica también superan a los cerámicos en que no necesitan un gran número de conectores y juntas mecánicas que reducen su fiabilidad. Tener el equipamiento de procesado de señal lejos del sensor permite realizar fácilmente reparaciones, lo que no sucede con los sensores cerámicos.



Los hidrófonos de fibra óptica tienen su nicho de aplicación en submarinos y seguridad submarina. Su labor en seguridad es detectar posibles submarinos enemigos en una bahía y aplicaciones similares.

A pesar de solo haber localizado una empresa que se dedique a la fabricación e instalación de hidrófonos, se quiere remarcar su importancia, ya que se utilizan para aplicaciones

militares y de seguridad. No hay que olvidar que una aplicación que se instala en submarinos y además también es capaz de crear un perímetro de seguridad subacuático mueve una gran cantidad de dinero.

12.2. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

12.2.1. Empresa fabricante

- NORTHROP GRUMMAN

12.2.2. Bibliografía

FBG distribuido:

- http://www.es.northropgrumman.com/solutions/hullarrays/assets/Fiber-Optic-Acoustic-Sensors_F.pdf
- http://www.es.northropgrumman.com/media/whitepapers/assets/CENTURION-Total_Port_Maritime_.pdf

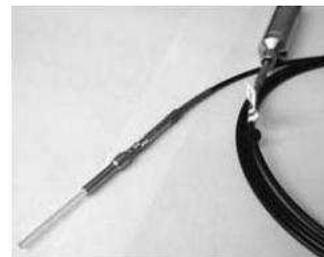
13. Otros sensores

En este apartado se mencionan algunos tipos de sensores que no se desarrollan en el proyecto. El principal motivo de que no se amplíe la información ni se comparen los sensores que existen en el mercado, es que la fibra óptica no es el elemento sensor, solo hace la función de transportar la luz, pudiéndose sustituir por un transductor en el punto a medir.

Por otro lado en el mercado existen soluciones ópticas (no de fibra óptica), ampliamente desarrolladas que cubren las mismas necesidades.

13.1. Sensores infrarrojos de temperatura

Son sensores que miden la temperatura sin contacto, utilizando termometría infrarroja.



Puede alcanzar rangos de medida de -50°C hasta 4000°C (variable según la aplicación) y precisiones de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$

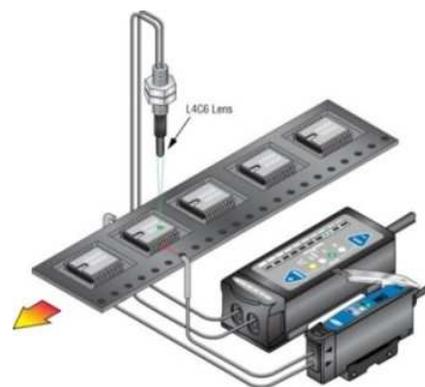
Algunas empresas fabricantes son: LumaSense, ADVANCED ENERGY y Lambda photometrics

13.2. Sensores de detección, posición o desplazamiento (Non-contact)

Detectan la posición de un objeto, desplazamientos y vibración. Su funcionamiento es muy sencillo. Se basan en transmisión o en reflexión y ambos en intensidad.

En estos sensores la fibra óptica solo sirve para transportar la luz. Además en el mercado hay soluciones ópticas que en lugar de fibra utilizan un transductor con una forma de haz específica para cada aplicación.

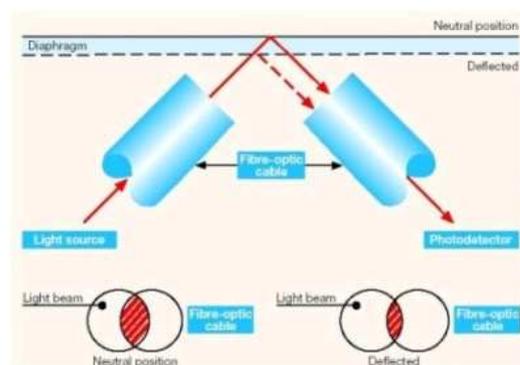
Una aplicación destacable de esta tecnología son los sensores de presión que fabrica OPTRAND. Su funcionamiento es similar al del micrófono óptico. Hay un diafragma móvil, donde se recoge la presión y un haz de luz que se está reflejando contra el diafragma.



Algunas empresas fabricantes son: PHILTEC, mti Instruments, BANNER, OMRON, OptexFA y Panasonic

13.3. Micrófono óptico

La empresa SENNHEISER ha creado un micrófono que funciona gracias a la fibra óptica. El micrófono funciona como un reflectómetro. Un haz de luz choca contra un diafragma en cierto ángulo y se refleja introduciéndose por otra fibra óptica que va al receptor. Las ondas acústicas hacen vibrar el diafragma. Al vibrar el diafragma la trayectoria del haz varía en función del sonido, lo que se traduce en un cambio en la intensidad.



Este micrófono tiene la ventaja de poder ser completamente no metálico y pasivo. Puede ser utilizado en atmósferas explosiva y en lugares donde la inmunidad a los campos EM es importante. Por ejemplo para poder hablar con el paciente durante una resonancia magnética.

Existen los siguientes modelos en el mercado: MO 2000 Set y IAS MO 2000 Set

13.4. Lista de empresas y bibliografía

En este apartado se exponen las empresas que han sido estudiadas y la bibliografía teórica del principio de funcionamiento de las diferentes tecnologías, que se puede leer en el bloque anterior.

13.4.1. Lista de empresas

Termometría infrarroja:

- LumaSense
- ADVANCED ENERGY
- Lambda photometrics

Transmisión y reflexión (Non contact):

- PHILTEC
- mti Instruments
- BANNER
- OMRON,
- OptexFA
- Panasonic OPTRAND

Micrófono óptico:

- SENNHEISER

13.4.2. Bibliografía

Termometría infrarroja:

- <http://lumasenseinc.com/EN/solutions/techoverview/irtemp/infrared-temperature-sensing.html>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_infrarroja

Micrófono óptico:

- http://www.sennheiser.com/sennheiser/home_en.nsf/root/professional_wired-microphones_industry-microphones_500488
- http://www.prosoundweb.com/article/sennheiser_introduces_optical_microphone_for_industrial_medical_application/

BLOQUE III:

Conclusiones, recursos utilizados y bibliografía

1. Conclusiones

Tras el estudio realizado sobre el mercado de sensores de fibra óptica se pueden sacar algunas conclusiones:

- La tecnología de fiber bragg grating (FBG) es la más desarrollada de todas las tecnologías de fibra óptica. Esta tecnología ofrece más soluciones para diferentes aplicaciones que ninguna otra de sensores de fibra óptica. Además permite multiplexar varios sensores y crear sistemas cuasi-distribuidos. Debido a su amplio desarrollo ofrece soluciones a precios competitivos. Es sin duda la tecnología que sobresale en el campo de los sensores la fibra óptica.
- En cuanto a aplicación se refiere, los sensores de fibra óptica que han sido más desarrollados son los que permiten medir la temperatura. Es en la aplicación donde se encuentra sensores con un mayor número de tecnologías diferentes. También es para la aplicación donde se encuentra un mayor número de empresas y distribuidores.
- A las aplicaciones de temperatura le siguen sin duda los sensores de strain en cuanto a importancia.
- Los sensores distribuidos son una aplicación con la que apenas pueden competir otras tecnologías. Siendo la tecnología de scattering de Raman la que tiene más importancia en el mercado. Esto es debido en gran parte a que estos sensores son utilizados en la monitorización de túneles en carreteras, autovías y autopistas, para la prevención y solución de posibles incendios.

Las tecnologías de Brillouin y Rayleigh están más orientadas a industrias más herméticas como la petrolera y otras industrias, mientras que la seguridad en los tuneles es algo que afecta a la ciudadanía. Por lo tanto más fácil encontrar información y está más difundida.

- La industria petrolera y de gas natural es el área donde más destacan los sensores de fibra óptica. Desde la extracción hasta el transporte del petróleo o el gas por oleoductos y gaseoductos. Esto es debido a que gracias a las tecnologías de fibra óptica, se puede monitorizar la temperatura, el strain y la presión de forma distribuida o cuasi-distribuida. Además los sensores de fibra óptica son pasivos y dieléctricos, lo que es ideal para un entorno potencialmente explosivo. Además existen recubrimientos que soportan atmosferas ricas en hidrógeno para fibras ópticas. Se puede decir, que en este campo los sensores de fibra óptica no tiene casi competidores salvo algún sistema sonar. En este campo las tecnologías que más destacan son el scattering de Brillouin y el scattering de Rayleigh.
- Es importante acentuar la importancia de los sensores de fibra óptica en el campo de la medicina y la biotecnología. En estos campos destacan los sensores interferométricos así como los de fluorescencia óptica.
Debido a su reducido tamaño los sensores de fibra óptica son ideales para ser integrados en dispositivos médicos y de cirugía.

Por último, concluir que a la hora de elegir un sensor de fibra óptica para una aplicación en concreto, es importante saber qué tipo de sensor elegir. Todos los sensores de temperatura no sirven para lo mismo, por poner un ejemplo, algunos son mejores para aplicaciones médicas, otros para transformadores, otros permiten ser adheridos directamente sobre una estructura, etc.

Es por ello que no tiene sentido comparar los sensores de las diferentes tecnologías entre sí.

2. Recursos

A continuación van a ser citados los recursos principales utilizados para la realización tanto de la aplicación como de esta memoria. En el caso de los recursos web (links de recursos en internet) se muestran los nombres tal como aparecen en la aplicación web.

Para acceder a estos recursos se debe usar la aplicación.

En el caso de los recursos teóricos que aparecen en el apartado de bibliografía también se ha seguido este criterio. De esta forma se muestra como está estructurada la aplicación, ya que estos mismos links han sido escritos con toda su ruta (en lugar de un nombre) en el apartado de bibliografía de cada familia de sensores, en el bloque anterior y repetirlos sería redundante.

2.1. Recursos para la búsqueda de sensores comerciales

Estos son algunos de los recursos que se han consultado para localizar los sensores de fibra óptica. Los recursos que están aquí abajo citados se distinguen sobre los demás por ser guías de referencia que contienen información de un gran número de sensores de fibra óptica de diferentes tecnologías, así como de las empresas que los fabrican.

- ◆ *Azo optics*
- ◆ *Azo sensors*
- ◆ *DIRECT INDUSTRY*
- ◆ *optical fiber sensors*

2.2. Directorio de empresas

2.2.1. Empresas que fabrican sensores a medida

En este apartado se mencionan las empresas que fabrican sensores de fibra óptica cubriendo las especificaciones que les dé el cliente, pero no tienen modelos en el mercado.

- ◆ *BLUE ROAD RESEARCH*
- ◆ *Broptics*
- ◆ *FOtech solutions*
- ◆ *ITF Labs*
- ◆ *IXFIBER*
- ◆ *LUNA Technologies*
- ◆ *OFS*
- ◆ *QinetiQ*
- ◆ *QOREX*
- ◆ *Sensa*
- ◆ *SILIXA*

2.2.2. Empresas fabricantes

Empresas con diferentes líneas de sensores en el mercado.

- | | |
|---|-----------------------|
| ◆ <i>ABB</i> | ◆ <i>emcore</i> |
| ◆ <i>Advanced Optics Solutions GmbH</i> | ◆ <i>FIBERPRO</i> |
| ◆ <i>AOS Technology</i> | ◆ <i>FiberSensing</i> |
| ◆ <i>CDL</i> | ◆ <i>fiberware</i> |
| | ◆ <i>FISO</i> |

- ♦ *Fizoptika*
- ♦ *FOSTA*
- ♦ *FOS&S -Fiber Optic Sensing-*
- ♦ *getAMO*
- ♦ *Hitachi Cable*
- ♦ *IFOS*
- ♦ *iMAR*
- ♦ *ISRAEL AEROSPACE INDUSTRIES*
- ♦ *IXSEA*
- ♦ *KVH*
- ♦ *LIOS Technology*
- ♦ *LUMA SENSE Technologies*
- ♦ *LUNA Technologies*
- ♦ *Microm Optics*
- ♦ *NEUBREX*
- ♦ *NEWPORT sensors*
- ♦ *NORTHROP GRUMMAN*
- ♦ *Ocean Optics*
- ♦ *Omnisens*
- ♦ *opSens*
- ♦ *Optilab*
- ♦ *OPTOCON*
- ♦ *OZoptics*
- ♦ *O/E LAND*
- ♦ *QOREX*
- ♦ *RJC enterprises*
- ♦ *SCAIME*
- ♦ *Sensa*
- ♦ *sensornet*
- ♦ *SENSORTRAN*
- ♦ *SIEMENS*
- ♦ *SMART FIBRES*
- ♦ *smartec*
- ♦ *Tritech*
- ♦ *Welltech instrument*

2.2.3. Empresas que ofrecen algunas soluciones muy específicas

Estas empresas son empresas que ofrecen soluciones de fibra óptica, sin especificar la tecnología ni dar mucha más información al respecto o empresas que dan soluciones muy específicas. Por ello sus soluciones no se han podido clasificar dentro de ninguna familia, pero es obligatorio mencionárselas por ser empresas importantes, algunas de ellas forma parte de la industria petrolera

- ◆ *HALLIBURTON*
- ◆ *neoptix*
- ◆ *príme photonics*
- ◆ *sabeus*
- ◆ *Weatherford*

2.2.4. Algunos distribuidores

- ◆ *Alava Ingenieros*
- ◆ *CALEX*
- ◆ *FAST Laser GROUP Ltd.*
- ◆ *Lambda photometrics*

2.3. Bibliografía

2.3.1. Recursos de texto destacados

- ◆ “HANDBOOK OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY” López-Higuera Jose Miguel, Ed John Wiley & Sons Ltd, 2002, ISBN: 0-471-82053-9
- ◆ “HANDBOOK OF MODERN SENSORS” Fraden Jacob, Ed Sringer, 2004, ISBN: 978-0-387-00750-2
- ◆ “SENSORS MATERIALS” PT Moseley and AJ Crocker, Ed Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1996, ISBN: 0 7503 0015 9

2.3.2. Recursos web

- ◆ *About Distributed Sensing Technology*
- ◆ *Brillouin scattering*
- ◆ *Brillouin Scattering*
- ◆ *CENTURION - A Total Port Maritime Surveillance Concept*
- ◆ *Dispersión de Rayleigh*
- ◆ *Distributed Sensing SystemT (DSS 4300)*
- ◆ *Distributed Temperature Sensing (DTS) Technology Principles*
- ◆ *Efecto Raman*
- ◆ *Fabry-Pérot Fiber-Optic Sensors for Physical Parameters Measurement in Challenging Conditions*
- ◆ *Faraday effect*
- ◆ *FBG - Fiber Bragg Grating*
- ◆ *Fibre optic gyroscope*
- ◆ *Fiber Optic Gyroscope development*
- ◆ *Fiber Optic Oxygen Sensors Versus Commercial Electrodes*
- ◆ *Fiber Optic Oxygen Sensors: Theory of Operation*
- ◆ *Fiber Optic Sensors*
- ◆ *FIBER OPTIC SENSOR TECHNOLOGY*
- ◆ *fiberoptic magnatíf-field sensor FOMAS*
- ◆ *Fiber-Optic Acoustic Sensors (FOAS)*
- ◆ *Fluorescencia*
- ◆ *Fluoroptic Temperature Measurement*
- ◆ *Fundamentals of FBG Optical Sensing*
- ◆ *Giróscopo de fibra óptica*
- ◆ *Information Guide*

- ◆ *Infrared Temperature Sensing*
- ◆ *Luna Technologies' Distributed Sensing System (DSST) 4300*
- ◆ *NUEVOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA: SENSORES Y UNIDADES DE LECTURA DE FIBRA ÓPTICA*
- ◆ *Opsens SCBG temperature sensing technology*
- ◆ *OPSENS WHITE-LIGHT POLARIZATION INTERFEROMETRY TECHNOLOGY*
- ◆ *Radiación infrarroja*
- ◆ *Raman Scattering*
- ◆ *Rayleigh scattering*
- ◆ *Shape Sensing Technology*
- ◆ *SOFO Technology*
- ◆ *Temperature Measurement Improves Patient Care*
- ◆ *The principle of fluorescence quenching*
- ◆ *WHY DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSORS (DTS)*