

Trabajo Fin de Máster
Máster en Electrónica, Tratamiento de Señal y
Comunicaciones

Desarrollo de un sistema de monitorización y/o
detección de arena acumulada y arena eólica en vías
de tren de altas prestaciones mediante sensores
basados en fibra óptica

Autor: Adrián Lara Pérez

Tutor: Alejandro Carballar Rincón

Dep. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014



Trabajo Fin de Máster
Máster en Electrónica, Tratamiento de Señal y Comunicaciones

**Desarrollo de un sistema de monitorización y/o
detección de arena acumulada y arena eólica
en vías de tren de altas prestaciones mediante
sensores basados en fibra óptica**

Autor:

Adrián Lara Pérez

Tutor:

Alejandro Carballar Rincón

Dep. Ingeniería Electrónica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014

Trabajo Fin de Máster: Desarrollo de un sistema de monitorización y/o detección de arena acumulada y arena eólica en vías de tren de altas prestaciones mediante sensores basados en fibra óptica

Autor: Adrián Lara Pérez

Tutor: Alejandro Carballar Rincón

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2014

El Secretario del Tribunal

*Solo es posible avanzar cuando se mira lejos.
Solo cabe progresar cuando se piensa en grande.*
José Ortega y Gasset

Agradecimientos

He dedicado a este trabajo más tiempo que a ningún otro hasta la fecha y puedo decir que he aprendido un par de cosas sobre esto de la fibra óptica y de la luz, e incluso algo de mecánica cuántica, pero me quedo con el espíritu investigador e innovador con el que se ha desarrollado este trabajo. Nunca antes me había visto involucrado en este tipo de proyectos y debo agradecer a Alejandro Carballar Rincón el haberme introducido en él y el guiarme a través de él. También debo agradecerle el haber intentado abrirme todas las puertas posibles a lo largo del desarrollo del trabajo y de enseñarme cómo funciona el ámbito profesional de un ingeniero.

Por último, y haciendo honor a mi fama de escueto, decir que me quedo con la sensación de un trabajo bien hecho, que pienso es de las mejores cosas que se pueden decir tras haber dedicado tanto esfuerzo, ganas y horas en crear algo desde cero.

Resumen

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar, desde cero y sin ningún tipo de referencia específica, un sistema de detección de arena acumulada y arena eólica en vías de tren de altas prestaciones empleando sensores basados en fibra óptica.

Se ha realizado un estudio del arte de los sensores basados en fibra óptica y se han estudiado las diferentes tecnologías para ser capaces de escoger la más adecuada.

Tras escoger la tecnología a emplear, se ha establecido el equipamiento necesario, se ha desarrollado un montaje específico para la aplicación y un método de medida para los fenómenos de arena acumulada y arena eólica.

Por último, se han desarrollado unas pruebas de concepto en laboratorio para comprobar las hipótesis de partida y ver el funcionamiento del sistema de medida propuesto en un entorno controlado.

Descriptores

Fibra Óptica, Estado del arte, Red de difracción de Bragg, Dispositivo, Componente, Sistema de medida, Aparato de medida, Método de medida, Prueba de concepto.

Abstract

The goal of this work is to develop, from the ground and without any specific reference, a detection system of accumulated sand and aeolian sand in high performance railroads using fiber-based sensors.

It has been made a state of the art research of fiber-based sensors and an investigation of different technologies to be able to choose the most appropriate.

After it is clear the technology to use, it has been established the necessary equipment and it has been developed a specific mounting and measurement method for accumulated sand and aeolian sand.

Finally, it has been developed a proof of concept to test the measurement system and see how the proposed hypothesis works in a controlled environment.

Keywords

Optical fiber, State of the art, Fiber Bragg Gratings, Device, Component, Measuring system, Measuring equipment, Measuring method, Proof of concept.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xviii
Documento 1 MEMORIA	1
1 Introducción y antecedentes	5
2 Objetivos y justificación del proyecto.....	15
3 Estudio de alternativas	19
3.1 Descripción de las posibles soluciones	19
3.1.1 Sensores basados en FBG.....	19
3.1.2 Sensores basados en dispersión no lineal	22
3.2 Justificación de la solución adoptada.....	31
4 Descripción de las obras e instalaciones	37
4.1 Aparato de Medida.....	37
4.1.1 Esquema.....	37
4.1.2 Planificación de frecuencias	37
4.2 Método de Medida	39
5 Resultados experimentales	43
5.1 Prueba de concepto en laboratorio.....	43
5.1.1 Pruebas de funcionamiento.....	43
5.1.2 Compensación.....	47
5.1.3 Pruebas de larga duración.....	49
5.1.4 Pruebas montaje definitivo	51
6 Programación de tareas y plazos	57
6.1 Prueba de concepto en laboratorio.....	57
6.2 Pruebas de campo	59
7 Equipo redactor del proyecto	65
8 Conclusiones y líneas futuras de trabajo.....	69
ANEXOS MEMORIA.....	71
A.I Bibliografía.....	75

A.II Tabla estado del arte.....	81
A.III Estudio económico.....	85
A.IV Cálculos justificativos	91
A.IV.1 Conversión Longitud de Onda – Medida Física.....	91
A.IV.2 Compensación	91
A.V Planificación y programación	95
A.V.1 Pruebas de concepto en laboratorio.....	95
A.V.2 Pruebas de campo.....	96
A.VI Datasheet	101
A.VI.1 Hoja de calibración del sensor de deformación	101
A.VI.2 Hoja de calibración del sensor de temperatura.....	103
Documento 2 PLANOS	105
Documento 3 PLIEGO DE CONDICIONES.....	109
1 Condiciones generales.....	113
2 Especificación de materiales y equipos.....	117
2.1 Equipos y dispositivos	117
2.1.1 Interrogador	117
2.1.2 Sensores	120
2.1.3 Fibra óptica	126
2.2 Materiales y herramientas	131
3 Condiciones de ejecución.....	135
3.1 Conectores BraggMetter	135
3.2 Display iLog	136
Documento 4 PRESUPUESTO	137
1 Cuadros de Precio	141
1.1 Desarrollo del sistema de medida	141
1.2 Pruebas experimentales.....	141
1.3 Sistema de medida Laboratorio	141
1.4 Sistema de medida Campo.....	141
1.5 Resumen Presupuesto	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Recorrido Ave del desierto.	5
Figura 2. Prototipo del tren talgo para proyecto "Haramain".	6
Figura 3. Transductores de ultrasonido adosados al carril.	7
Figura 4. Máquina para montar la fibra óptica al carril.	8
Figura 5. Fibra óptica adosada al carril.	8
Figura 6. Monitorización del viaducto del Jarama en el proyecto MIFFO.	10
Figura 7. Principio de funcionamiento de las FBG.	20
Figura 8. Medida de la deformación en las FBG.	21
Figura 9. Dispersión en la fibra.	23
Figura 10. Sensor BOTDA.	27
Figura 11. Sensor BOTDR.	29
Figura 12. Sensor BOFDA.	30
Figura 13. Esquema Aparato de Medida.	37
Figura 14. Esquema prueba de concepto.	43
Figura 15. Gráfica Prueba.	44
Figura 16. Sensores en OSA.	44
Figura 17. Sensor deformación en OSA.	45
Figura 18. Sensor Temperatura en OSA.	45
Figura 19. Gráfica Deformación.	46
Figura 20. Gráfica Temperatura.	46
Figura 21. Gráfica Deformación con ventilador y en voladizo.	47
Figura 22. Gráfica de comportamiento en temperatura.	48
Figura 23. Gráfica Deformación frente a Temperatura.	48
Figura 24. Gráfica 24 horas.	50
Figura 25. Gráfica 48 horas.	50
Figura 26. Montaje laboratorio.	51
Figura 27. Sensores montaje.	51
Figura 28. Montaje.	52
Figura 29. Gráfica prueba arena acumulada.	53
Figura 30. Gráfica prueba arena eólica.	53
Figura 31. GANTT Prueba de Laboratorio.	58

Figura 32. GANTT Prueba de Campo.	60
Figura 33. Gráfica FBG (2 km) vs Brillouin (1 m).	86
Figura 34. Gráfica FBG (1 m) vs Brillouin (1 m).	86
Figura 35. Conectores BraggMeter.	135
Figura 36. Display iLog.	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características generales sensores FBG.	22
Tabla 2. Características generales sensores Raman.	25
Tabla 3. Características generales sensores BOTDA.	28
Tabla 4. Características generales sensores BOTDR.	29
Tabla 5. Características generales sensores BOFDA.	30
Tabla 6. Valor Medio Ponderado Tecnologías Sensores Fibra Óptica.	32
Tabla 7. Estudio de frecuencias.	38
Tabla 8. Distancia vs Resolución.	38
Tabla 9. Precios FBG y Brillouin.	85



Documento 1 MEMORIA

Desarrollo de un sistema de monitorización y/o
detección de arena acumulada y arena eólica en
vías de tren de altas prestaciones mediante sensores
basados en fibra óptica

Adrián Lara Pérez

Trabajo Fin de Máster





CAPÍTULO I





1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Desde que se descubrió la posibilidad de usar la fibra óptica como sensor para magnitudes físicas como la temperatura y la deformación, su estudio y uso se ha extendido a la misma vez que lo ha hecho en el sector de las comunicaciones, proponiéndose diferentes técnicas con diversas características para diversas aplicaciones. Algunos ejemplos de estas aplicaciones son la monitorización de estructuras civiles, gaseoductos, calderas, cálculos de tensiones mecánicas en partes de aeronaves y todas aquellas en las que sea útil medir y monitorizar cambios de temperatura y deformación [1].

El marco de este proyecto se encuadra en uno mucho más ambicioso, el Proyecto Haramain, el ‘AVE del desierto’, donde un consorcio de 12 empresas españolas y 2 saudíes se han adjudicado el proyecto de construir y mantener una vía de Alta Velocidad en Arabia Saudí a través del desierto, conectando las ciudades de Medina y La Meca. Con una inversión de 6736 millones de euros, se construirá y mantendrá una línea de alta velocidad de 449,2 km de doble vía, con una velocidad de diseño de 320 km/h, un tiempo estimado de duración del viaje entre Medina y La Meca menor de dos horas y media (contando con las paradas del camino) y la construcción de 35 trenes. Se prevé un tráfico de 160000 personas al día.



Figura 1. Recorrido Ave del desierto.
De: <http://viajesferroviarios.blogspot.com.es/>.



Figura 2. Prototipo del tren talgo para proyecto "Haramain".
De: <http://viajesferroviarios.blogspot.com.es/>.

Uno de los principales obstáculos a los que se enfrenta el proyecto “Haramain” es el de tener controlados los efectos ambientales extremos del desierto, que están obstaculizando las tareas de construcción de la estructura ferroviaria y son un auténtico problema para el posterior mantenimiento y seguridad en las vías y el tren. Los principales problemas asociados a esta climatología extrema son la llamada arena eólica, provocada por las tormentas de arena, y la acumulación de arena en la vía, provocada tanto por las tormentas de arena como por el desplazamiento de las dunas en el desierto. Estos fenómenos pueden generar, en primera instancia, obstáculos en la vía y, a la larga, desgastar la vía del tren. Este desgaste puede causar la formación de grietas que acaben provocando la rotura del carril. En esa situación, el paso de un tren por esa zona de la vía interrumpida puede desencadenar el descarrilamiento del tren y la consiguiente catástrofe.

En un primer acercamiento desde el proyecto “Haramain” se propone como objetivo un sistema de detección de carril roto basado en diferentes tecnologías de sensores y se estudian diferentes alternativas, con sus pros y contras, como son:

- Tecnología de ultrasonidos.
- Tecnología de fibra óptica.



- Tecnología de galgas extensiométricas.
- Tecnología de medición de la corriente de retorno (de tracción).

En este acercamiento al problema se presentan como tecnologías más prometedoras la basada en ultrasonidos, la tecnología basada en fibra óptica y la tecnología de medición de corriente de retorno. La tecnología de ultrasonido presenta una buena respuesta ante la rotura del carril, incluso detecta los alabeos sin necesidad de sensores adicionales, sin embargo es necesaria la instalación de transductores cada 3 km y equipo electrónico cada 1,5 km.



Figura 3. Transductores de ultrasonido adosados al carril.

De: Adif. (2012). Proyecto Meca - Medina. *Asamblea de la plataforma tecnológica ferroviaria española.*

La tecnología de fibra óptica ofrece resultados parecidos a la de ultrasonidos, aunque su sensibilidad es aún mayor. Esta sensibilidad le permite detectar pequeñas grietas en el carril, por lo que es capaz de predecir, en cierta medida, la rotura del carril. Por otro lado, su adhesión al carril es complicada y su mantenimiento, en caso de rotura del carril, costoso.



Figura 4. Máquina para montar la fibra óptica al carril.

De: Adif. (2012). Proyecto Meca - Medina. *Asamblea de la plataforma tecnológica ferroviaria española.*

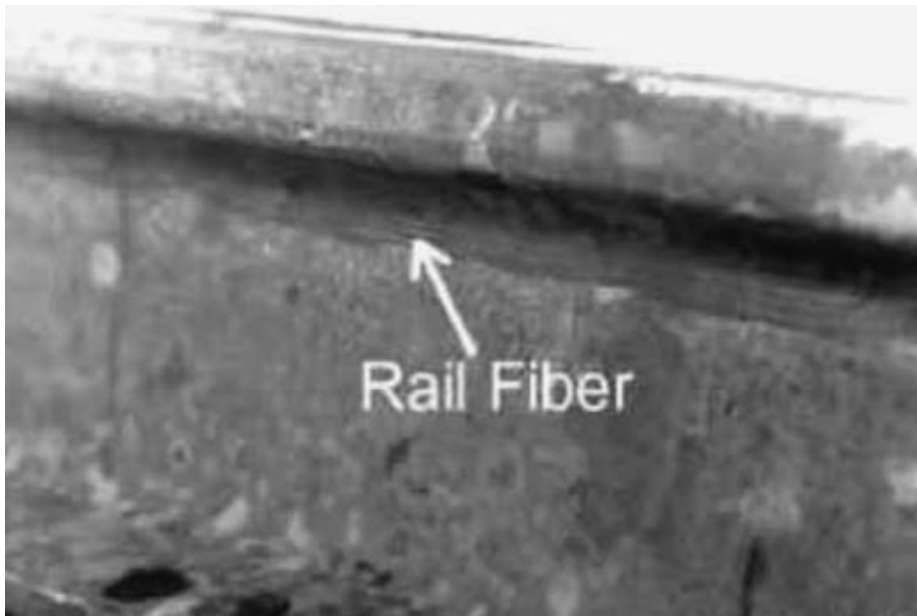


Figura 5. Fibra óptica adosada al carril.

De: Adif. (2012). Proyecto Meca - Medina. *Asamblea de la plataforma tecnológica ferroviaria española.*

La tecnología de medición de la corriente de retorno es capaz de detectar las roturas de carril y parece ser la menos costosa de todas las alternativas, aunque requiere de la presencia del tren en la vía para ser capaz de detectar las roturas. Esto es un gran inconveniente que puede ser compensado utilizando una resistencia para simular el tren, aunque complicaría el sistema.

En este contexto se gesta el proyecto de investigación ARID-LAP: “Minimización de los efectos originados por climatologías extremas sobre la



infraestructura ferroviaria de altas prestaciones localizada en zonas áridas”, con varias líneas de trabajo en la que se encuentra la referida en el presente proyecto: “Desarrollo de sensores de control y monitorización de arena eólica y arena acumulada”.

Como antecedentes al proyecto “Haramain” en la utilización de sensores de fibra óptica en líneas ferroviarias, cabe destacar dos proyectos específicos para la detección de roturas de carril y la presencia de trenes en la vía [2] [3].

El primero de ellos es el proyecto: “An Investigation into the Use of Buried Fiber Optic Filament to Detect Trains and Broken Rail”, desarrollado por el Instituto de Transportes de Texas en el año 2003. En este proyecto se propone la utilización de fibra óptica enterrada cerca de las vías del tren para la detección de carril roto y la presencia de trenes en la vía. Para ello utilizan la técnica C-OTDR (Coherent Optical Time Domain Reflectometry), basada en dispersión Rayleigh, con avanzadas técnicas de procesado de señal y redes neuronales. Como resultado, se aprecia un correcto funcionamiento en fibras de muy corta distancia, apenas 50 metros, y problemas en fibras de mayor distancia debido a la acumulación de ruido, que hace imposible detectar trenes en la vía o roturas del carril. En última instancia, apuntan a la dispersión Brillouin como posible solución al problema del ruido, ya que en este tipo de dispersión no es acumulable [2][1].

El segundo proyecto relacionado es el proyecto MIFFO: “Monitorización en tiempo real de Infraestructuras Ferroviarias utilizando tecnologías basadas en Fibra Óptica”, realizado en España en colaboración por el CSIC, Adif, el Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá y la empresa ICYF S.A., y finalizado en el año 2012. En él, se pretende detectar roturas y grietas en la vía del tren, la presencia de trenes en ella y la discriminación de distintos tipos de trenes, todo ello mediante sensado óptico basado en tecnología Brillouin, concretamente BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) con amplificación Raman. El sistema proporciona la localización precisa de la deformación o incremento de temperatura sobre distancias de 100 km con una resolución mejor de 2 metros [3].

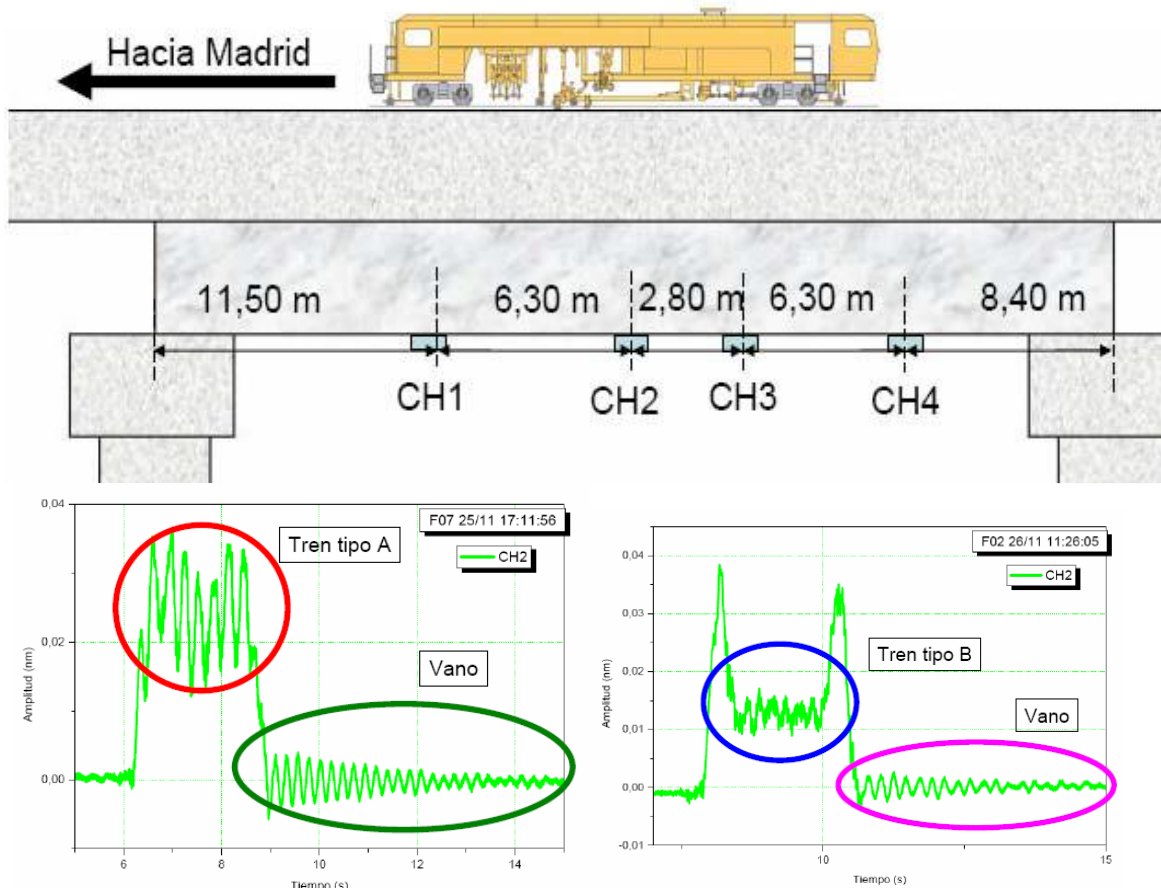


Figura 6. Monitorización del viaducto del Jarama en el proyecto MIFFO.
De: www.focustech.eu.

Por otro lado, también se ha investigado sobre las líneas ferroviarias que transcurren por zonas donde hay presencia de nieve [4], ya que la climatología de dichas zonas genera problemas similares a los que aparecen en el desierto: las tormentas de nieve se asemejan a las tormentas de arena y provoca efectos análogos, al igual que ocurre con la acumulación de nieve, similar a la acumulación de arena. En estos casos se emplean principalmente métodos de previsión meteorológica, con complejos cálculos matemáticos, para conocer las zonas del trayecto donde es más probable la aparición de estos fenómenos y actuar en consecuencia. Estas previsiones se calculan a partir de los datos transmitidos por pequeñas estaciones meteorológicas colocadas a lo largo de la línea del ferrocarril.

Así, pues, basado en nuestro conocimiento del estado del arte, no se han encontrado proyectos, patentes o publicaciones específicas en los que se utilicen los sensores de fibra óptica para la detección de arena acumulada y arena eólica, suponiendo un gran reto el desarrollo de un sistema de sensado con una tecnología muy



reciente, como es la de los sensores basados en fibra óptica, y aplicado a un campo que no se había analizado hasta el momento. Todo ello, por otro lado, nos ofrece la oportunidad de lanzar una línea de trabajo innovadora que conjuga las tecnologías de sensado por fibra óptica y su aplicación en la monitorización y mantenimiento de líneas ferroviarias de altas prestaciones en zonas de climatología extrema.





CAPÍTULO II





2 OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de investigación ARID-LAP, lanzado a partir del proyecto Haramain, está enfocado al desarrollo de I+D+i para la “Minimización de los efectos originados por climatologías extremas sobre la infraestructura ferroviaria de altas prestaciones localizada en zonas áridas” y comprende un gran número de líneas de estudio. Dentro de estas líneas de investigación se encuentra “Desarrollo de sensores de control y monitorización de arena eólica y arena acumulada” de manera predictiva, evitando que se produzcan problemas como la rotura del carril. Para afrontar el problema de la detección de arena acumulada y arena eólica se estudian dos alternativas distintas con diferentes tecnologías:

- Tecnología de sensores electrónicos.
- Tecnología de sensores basados en fibra óptica

El presente proyecto se encuadra en la resolución del problema de la detección de arena acumulada y arena eólica mediante sensores basados en fibra óptica.

Por tanto, el objetivo principal del presente proyecto consiste en el **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y/O DETECCIÓN DE ARENA ACUMULADA Y ARENA EÓLICA EN VÍAS DE TREN DE ALTAS PRESTACIONES MEDIANTE SENSORES BASADOS EN FIBRA ÓPTICA**, con el objeto de reducir riesgos asociados a la explotación y permitir gestionar de forma adecuada las labores de mantenimiento. Estos sensores estarán interconectados y conectados a un PC que permita almacenar los datos para su análisis y explotación permitiendo disponer de acceso a información sobre acumulación y transporte de arena en ambientes áridos y desérticos en tiempo real. El presente desarrollo tecnológico permitirá recoger la información producida por la red de sensores de acumulación y transporte de arena.

Como objetivos específicos y necesarios para la consecución del objetivo principal, se encuentran:

- Estudio del estado del arte de los sensores basados en fibra óptica: estudio exhaustivo de la oferta de mercado de los diferentes sensores basados en fibra óptica, sus características, aplicaciones y precios.



- Análisis de las alternativas: estudio de los principios físicos y principios de funcionamiento de las diferentes tecnologías que conforman los sensores basados en fibra óptica, así como estudios de viabilidad técnico-económica, conveniencia y rentabilidad.
- Justificación de la solución adoptada: justificación a nivel técnico y económico de la tecnología escogida para el desarrollo del sistema de detección.
- Aparato y método de medida de detección de arena eólica y arena acumulada: desarrollo a nivel teórico del sistema de detección propuesto en el presente proyecto.
- Pruebas de concepto en laboratorio: resultados experimentales en laboratorio del sistema de detección propuesto en el presente proyecto.

Aunque no forma parte del presente proyecto, se realizará también un estudio de las pruebas de campo del sistema de detección, ya que es posible que de manera posterior al desarrollo del presente proyecto se realicen dichas pruebas.

La justificación del desarrollo del presente proyecto se puede entender por un lado como la petición por parte de Adif del desarrollo de un sistema de medida para el problema concreto de arena acumulada y arena eólica, englobado en el proyecto de investigación ARID-LAP, pero, en el fondo, es el hecho de la ausencia de un sistema específico, tanto a nivel comercial como a nivel de investigación, capaz de detectar arena acumulada y arena eólica el que justifica el desarrollo del presente proyecto.



CAPÍTULO III





3 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Dentro de las distintas tecnologías de sensores basados en fibra óptica, se han analizado con mayor profundidad las tecnologías que permiten la medición de temperatura y de deformación ya que son las que mejor cubren las necesidades del proyecto. Con estas características se encuentran dos grandes grupos [5][6][7][8]:

- **Sensores basados en redes de difracción de Bragg (FBG):** se consideran cuasi-distribuidos y pueden medir tanto temperatura como deformación.
- **Sensores basados en dispersión no lineal:** se basan en la dispersión no lineal de la luz en la fibra.
 - **Sensores basados en dispersión Raman:** son distribuidos y miden temperatura [9].
 - **Sensores basados en dispersión Brillouin:** son distribuidos y miden temperatura y deformación [9].

3.1 Descripción de las posibles soluciones

3.1.1 Sensores basados en FBG

Son utilizados en túneles, puentes, edificios y en geotecnia. Como ejemplos reales de su aplicación están:

- Túnel subterráneo Nanjing Yangtze en China, donde se monitoriza la integridad de la estructura del túnel mediante FBG. [10]
- Puente Arsenal en Estados Unidos, donde se monitoriza la integridad de la estructura del puente mediante FBG. [10]

3.1.1.1 Principio físico y método de medida

Una red de difracción de Bragg consiste en una modulación del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica mediante exposición a luz ultravioleta, convirtiéndose la zona donde se encuentra la red de Bragg, en un filtro óptico con una longitud de onda que es reflejada, mientras que las demás componentes espectrales no sufren atenuación alguna. En la Figura 7 se puede ver un esquema de su principio de funcionamiento.

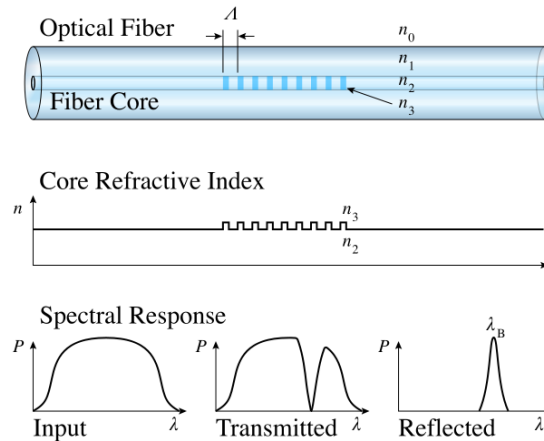


Figura 7. Principio de funcionamiento de las FBG.
De: Wikipedia "Fiber Bragg Gratings".

La longitud de onda reflejada, λ_B , denominada longitud de onda de Bragg, cumple la siguiente condición:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1)$$

donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra y Λ es el periodo espacial de la red. Los cambios de temperatura y la deformación axial modifican tanto el periodo espacial como el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra.

El periodo espacial se describe como:

$$\Lambda = \frac{L}{n}, \quad (2)$$

donde L es la longitud de la red de difracción y n es el número de periodos espaciales en la red. La deformación inducida, o dilatación, modifica la longitud de la red de difracción pero sin cambiar el número de periodos de la red, por lo que el periodo espacial varía y por consiguiente lo hace la longitud de onda de Bragg (Figura 8).

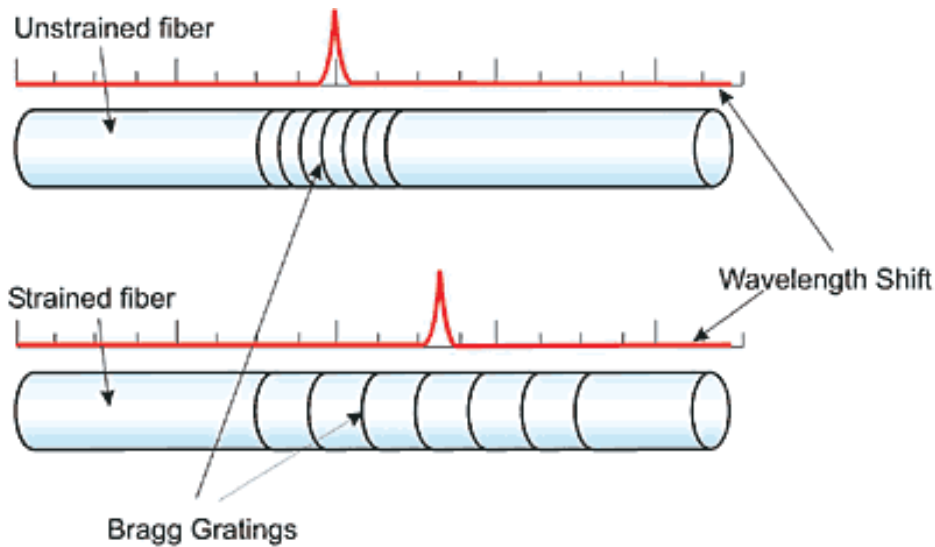


Figura 8. Medida de la deformación en las FBG.
De: Brigham Young University, Photonics/Optics Lab, "Fiber Bragg Gratings".

En el caso concreto del índice de refracción, cuando se aplica una deformación de manera perpendicular a la fibra, se produce un efecto llamado birrefringencia. Este efecto consiste en una doble refracción, la luz incidente se desdobra en dos haces de luz linealmente polarizados perpendicularmente entre sí. Esto se debe a la diferencia del índice de refracción entre la dirección en la que se aplica la deformación y su perpendicular, provocando, todo ello, un desplazamiento de la frecuencia de Bragg.

Estos dos efectos provocan que la dinámica de la longitud de onda de Bragg sea de la siguiente manera:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial L} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \right) \Delta L + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (3)$$

donde ΔL es la deformación axial inducida y ΔT el cambio térmico sufrido en la estructura. Se puede observar que los dos efectos son simultáneos, así que se debe compensar o controlar uno para la medida del otro. Su dependencia lineal respecto a los dos términos y el hecho de que la longitud de onda de Bragg es un valor absoluto, hacen muy interesantes a los sensores basados en FBG [5][7].

3.1.1.2 Principio de operación

Para montar un aparato de medida basado en FBG se necesita una fibra monomodo con las redes de Bragg grabadas en ella y un interrogador.



Las redes de Bragg deben tener distintas longitudes de onda de Bragg para poder diferenciarlas. El interrogador consta de una fuente de luz de espectro ancho y un fotodetector.

La luz emitida por la fuente del interrogador es reflejada en las redes de Bragg con distintas longitudes de onda y cuando llegan al receptor, éste identifica cada red por su longitud de onda central y relaciona el desplazamiento en longitud de onda con la deformación o el gradiente de temperatura sufrido, dato que viene dado por el fabricante de la fibra grabada con las FBG [3] [11] [12].

3.1.1.3 Características generales

Estos datos han sido recogidos de diferentes modelos y diferentes marcas y sirven como orientación sobre las características principales de la tecnología [13]. Una tabla más extensa y completa se encuentra en el Anexo II.

Parámetro	Valor	Unidades
Rango Temperatura	-10 a 85	°C
Resolución Temperatura	±0.1	°C
Rango Deformación	±1.5	%
Resolución Deformación	±1	με
Longitud de Sensado	0 a 10	km
Resolución espacial	1	cm

Tabla 1. Características generales sensores FBG.

Los sensores basados en FBG poseen una gran precisión y su resolución espacial puede llegar al centímetro, aunque a costa de aumentar el número de sensores, ya que su medida no es distribuida. Sus aplicaciones están orientadas para longitudes de medida de distancias cortas o medias.

3.1.2 Sensores basados en dispersión no lineal

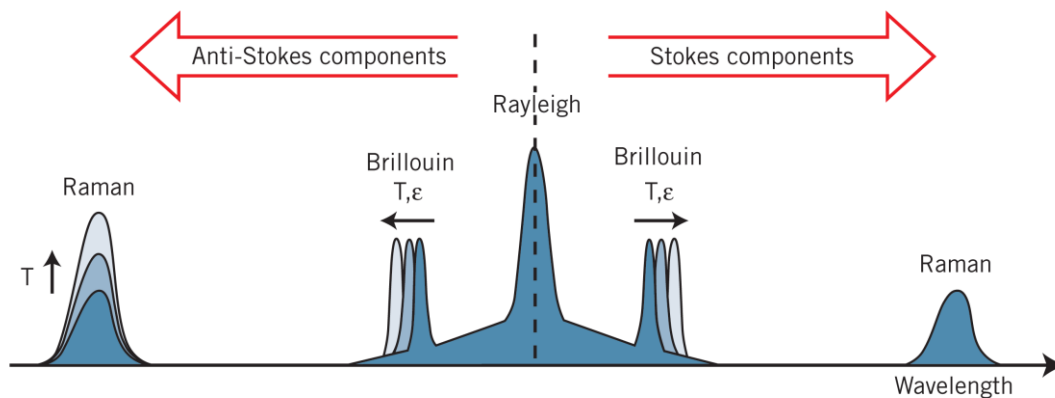
La dispersión no lineal en las fibras ópticas se debe a la dispersión inelástica de un fotón a niveles menos energéticos. Esta diferencia energética es absorbida por las vibraciones moleculares o fonones del medio, es decir, una onda de luz con cierta energía se dispersa en otra onda menos energética, de tal manera que la diferencia aparece en forma de fonones. A esta onda con menos energía se le denomina onda de Stokes. Puede suceder el efecto contrario, en el cual la onda se dispersa en una onda con



más energía. A esta onda se le denomina onda Anti-Stokes. Para que estos fenómenos ocurran, la señal ha de ser una señal de bombeo.

Existen dos fenómenos distintos de dispersión no lineal y ambos están relacionados con la excitación de los modos vibracionales del Sílice (SiO_2), material con el que se fabrica la fibra óptica. Uno es la dispersión Raman estimulada (SRS) y el otro es la dispersión Brillouin estimulada (SBS). La principal diferencia es que en la dispersión Raman participan los fonones ópticos (frecuencias altas) mientras que en la dispersión Brillouin participan los fonones acústicos (frecuencias bajas). Debido a esta diferencia, la dispersión Raman ocurre en los dos sentidos de la fibra mientras que la dispersión Brillouin solo ocurre hacia atrás [14][15].

SCATTERING EFFECTS WITHIN FIBER OPTIC CABLES*



*Caused by temperature, T, or strain ϵ .

Figura 9. Dispersión en la fibra.

De: Walk, T., & Fringe, J. (2010). Fiber optic sensing can help reduce third-party threats. Retrieved 2/5, 2014, from <http://www.ogj.com/articles/print/volume-108/issue-33/transportation/fiber-optic-sensing.html>

3.1.2.1 Sensores basados en efecto Raman

Son utilizados en detección de incendio en túneles, detección de fugas de gas en oleoductos y gaseoductos, refinerías e industrias de procesos, depósitos de gas natural licuado, cables de tensión, presas, diques y canales [16].

3.1.2.1.1 Principio físico y método de medida

La dispersión Raman es el resultado de la interacción de un fotón y un fonón óptico. Cuando una onda de luz monocromática se propaga por la fibra, los fotones que viajan por la fibra pueden excitar de manera vibracional al material, formando fonones ópticos y fotones con menos energía. Los fotones dispersados pueden perder energía



(desplazamiento Stokes) o ganar energía (desplazamiento Anti-Stokes). Esta diferencia de energía corresponde a la de los fonones ópticos.

La componente Anti-Stokes de la dispersión Raman tiene menos intensidad y una fuerte relación con la temperatura, mientras que la Stokes es más intensa y es casi independiente de la temperatura. Por lo tanto, la medición de la temperatura en la fibra proviene del ratio de la intensidad de la luz en las componentes Stokes y Anti-Stokes, que se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{(n_0+n_k)^4}{(n_0-n_k)^4} e^{-hcn_k/kT} \quad (4)$$

donde I_a es la intensidad de la componente Anti-Stokes, n_0 es el número de onda, h es la constante de Planck, k es la constante de Boltzmann, I_s es la intensidad de la componente Stokes, n_k es el cambio en el número de onda, c es la velocidad de la luz en la fibra óptica y T es la temperatura absoluta [17].

3.1.2.1.2 Principio de operación

Para un sistema de medida Raman se necesita un controlador o DTS (Distributed Temperature Sensor), que hace de fuente y receptor, y una fibra multimodo, ya que el efecto Raman necesita una potencia de entrada más alta que otros sistemas. La medición se realiza mediante OTDR (Optical Time Domain Reflectometry).

El sistema DTS consta de un láser de alta potencia pulsado el cual se aplica a la fibra donde se produce el efecto Raman. El efecto Raman genera dos señales de vuelta a 13 THz por encima y por debajo de la frecuencia central. Estas señales se integran en función del tiempo y resultan en dos curvas de dispersión Raman, la Stokes y la Anti-Stokes. La temperatura a lo largo de la fibra es el resultado del ratio en amplitud de las dos curvas generadas [18][19].

3.1.2.1.3 Características generales

Estos datos han sido recogidos de diferentes modelos y diferentes marcas y sirven como orientación sobre las características principales de la tecnología [20][21]. Una tabla más extensa y completa se encuentra en el Anexo II.



Parámetro	Valor	Unidades
Rango Temperatura	-	-
Resolución Temperatura	<0.01	°C
Rango Deformación	-	-
Resolución Deformación	-	-
Longitud de Sensado	0 a 30	km
Resolución espacial	1	m

Tabla 2. Características generales sensores Raman.

Los sensores basados en Raman poseen las mejores resoluciones para medidas de temperatura, aunque no pueden medir deformación. Su resolución espacial es buena y sus aplicaciones están orientadas para longitudes de medida de distancia media y larga. Realizan mediciones totalmente distribuidas.

3.1.2.2 Sensores basados en dispersión Brillouin

Son utilizados en detección de fugas de gas en oleoductos y gaseoductos, túneles, cables de alta tensión y en geotecnia. Como ejemplo real de su aplicación está:

- Gaseoducto subterráneo de 55km en Berlín, la monitorización por medio de sistemas basados en Brillouin permite detectar fugas de gas [22].

Existen distintos tipos de sensores basados en la dispersión Brillouin, pero para comprender como funcionan se debe explicar primero en qué consiste la dispersión Brillouin estimulada (SBS).

3.1.2.2.1 Principio físico y método de medida

La dispersión Brillouin es un proceso no lineal que aparece en la fibra óptica cuando se aplican intensidades altas. Al introducirse una fuente de luz lo suficientemente potente en una fibra, se produce una compresión del núcleo de la fibra por medio de la electrostricción. El fenómeno de electrostricción produce fluctuaciones de densidad en la fibra. Estas fluctuaciones de densidad desordenan el material creando una modulación del índice de refracción a lo largo de la fibra. Los fotones que viajan a través de la fibra se dispersan formando fotones en la componente Stokes y fonones acústicos. Esta luz dispersada es desplazada una frecuencia igual a la energía del fonón acústico generado (a esa frecuencia desplazada se le denomina frecuencia de Brillouin). El desplazamiento de los fotones puede producirse a frecuencias más bajas (Stokes) o frecuencias más altas (Anti-Stokes). Este proceso se denomina dispersión Brillouin



estimulada. Si, por el contrario, la potencia introducida en la fibra por medio de la señal de bombeo no es lo suficientemente potente, se produce la dispersión Brillouin espontánea, donde los fonones acústicos son generados por las fluctuaciones térmicas, pero con unos niveles de energía muy por debajo de los niveles en el proceso estimulado.

La relación que describe la propagación de la luz y la señal Brillouin a lo largo de la fibra está formada por una pareja de ecuaciones interrelacionadas en estado estacionario:

$$\begin{aligned}\frac{dI_p}{dz} &= -g_B I_p I_S - \alpha I_p \\ \frac{dI_S}{dz} &= -g_B I_p I_S + \alpha I_S\end{aligned}\quad (5)$$

donde I_p es la intensidad de la luz bombeada, I_S es la intensidad de Stokes, g_B es el coeficiente de ganancia de Brillouin y α es la atenuación de las intensidades.

Por último, el desplazamiento de la frecuencia de Brillouin y la velocidad de las ondas acústicas se describen mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}v_b &= \frac{2nV_A}{\lambda_0}; \\ V_A &= \left(\frac{E_0}{\rho}\right)^{1/2}\end{aligned}\quad (6)$$

donde v_b es el desplazamiento de la frecuencia de Brillouin, V_A es la velocidad de las ondas acústicas en la fibra, n es el índice efectivo de refracción en la fibra, λ_0 es la longitud de onda de la luz que se propaga a través de la fibra, E_0 es el módulo de Young y ρ es la densidad del material. El índice de refracción efectivo en la fibra y la velocidad de las ondas acústicas dependen de variaciones locales de fenómenos físicos tales como los cambios de temperatura y las deformaciones, lo que establece la relación necesaria para efectuar las medidas de estos efectos [23][24][25].



3.1.2.3 Sensores BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analysis*)

Están siendo muy estudiados hoy en día, ya que poseen muy buenas características para medir temperatura y deformaciones en largas distancias. Este sensor se basa en SBS.

3.1.2.3.1 Principio de operación

En un extremo de la fibra se aplica una fuente de luz pulsada mientras que por el otro extremo de la fibra se introduce una señal continua (sonda). Con esta configuración, la luz pulsada genera la dispersión Brillouin, que viaja en la misma dirección que la sonda. Si la sonda está desplazada en frecuencia respecto a la luz pulsada en la misma medida en que lo está la frecuencia de Brillouin, la señal de la sonda es amplificada. Cuando se produce un evento en la fibra (deformación o cambio de temperatura), la frecuencia de Brillouin cambia y la señal de la sonda no se amplifica en esa zona, mostrando un perfil a lo largo de toda la fibra [26].

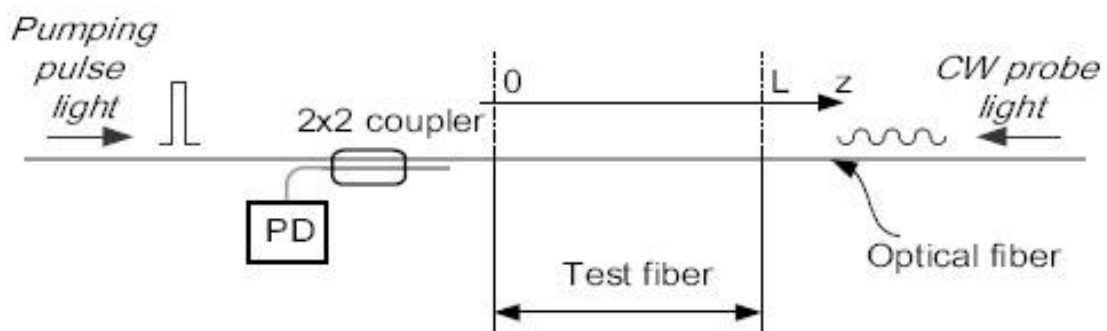


Figura 10. Sensor BOTDA.

De: Nanjing University, Fiber Optic Monitoring Research Group. (2014). The great sensing technology: Brillouin optical time domain analysis. Retrieved 2/5, 2014, from <http://www.botda.com>.

3.1.2.3.2 Características generales

Estos datos han sido recogidos de diferentes modelos y diferentes marcas y sirven como orientación sobre las características principales de la tecnología [27][28][29]. Una tabla más extensa y completa se encuentra en el Anexo II.



Parámetro	Valor	Unidades
Rango Temperatura	-	-
Resolución Temperatura	0.1	°C
Rango Deformación	± 3	%
Resolución Deformación	2	$\mu\epsilon$
Longitud de Sensado	0 a 100	km
Resolución espacial	1	m

Tabla 3. Características generales sensores BOTDA.

Los sensores BOTDA poseen buenas resoluciones tanto en las medidas de temperatura como en las de deformación, con una resolución espacial correcta. Su aplicación está orientada para longitudes de medida de larga distancia. Realiza medidas totalmente distribuidas.

3.1.2.4 Sensores BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry)

Es de los sistemas menos extendidos. Pueden medir deformaciones y temperatura a grandes distancias, aunque suelen encontrarse para medidas de deformación. Se basa en SBS y la reflectometría en el dominio del tiempo óptico (OTDR).

3.1.2.4.1 Principio de operación

Para medir la deformación o el cambio de temperatura a lo largo de la fibra, se introduce una fuente de luz pulsada en un extremo de la fibra y se recibe la luz dispersada por el efecto Brillouin en el mismo extremo de la fibra mediante un detector coherente. Para obtener el espectro de señal de Brillouin se realizan diferentes medidas cambiando la frecuencia alrededor de la frecuencia de Brillouin. Con el espectro de la señal Brillouin en función del tiempo, se puede ver en qué puntos de la fibra hay cambios en la frecuencia de Brillouin y relacionarlos con la deformación o el cambio de temperatura sufrido [30][31].

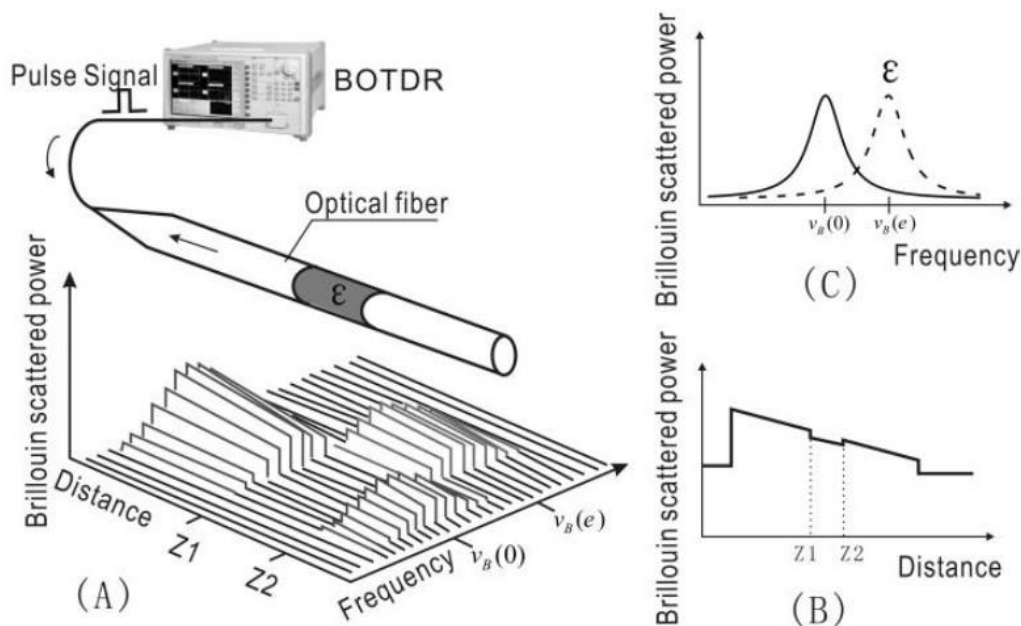


Figura 11. Sensor BOTDR.

De: NTT Access Network Service System Laboratories, "Strain measurement technology for the ground and constructions using an optical fiber", 1997.

3.1.2.4.2 Características generales

Estos datos han sido recogidos de diferentes modelos y diferentes marcas y sirven como orientación sobre las características principales de la tecnología [32]. Una tabla más extensa y completa se encuentra en el Anexo II.

Parámetro	Valor	Unidades
Rango Temperatura	-	-
Resolución Temperatura	-	-
Rango Deformación	± 3	%
Resolución Deformación	1	$\mu\epsilon$
Longitud de Sensado	0 a 160	km
Resolución espacial	1	m

Tabla 4. Características generales sensores BOTDR.

Los sensores BOTDR poseen resoluciones parecidas a los sensores BOTDA, aunque no miden temperatura. Sus longitudes de medida también son de muy larga distancia y realiza medidas totalmente distribuidas.

3.1.2.5 Sensores BOFDA (Brillouin Optical Frequency Domain Analysis)

Al igual que los sensores BOTDR no están tan extendidos como los otros, aunque ofrecen buenas prestaciones para las medidas de temperatura y deformación.



Estos sensores también se basan en el SBS, pero el análisis se hace en el dominio de la frecuencia.

3.1.2.5.1 Principio de operación

En estos sistemas, ninguna de las fuentes de luz es pulsada, las dos son continuas pero una de ellas es modulada en intensidad. La fuente modulada y la luz dispersada por el efecto Brillouin viajan en la misma dirección y son detectadas a través de un analizador de red vectorial. El analizador calcula la función de transferencia comparando la fase y la amplitud de ambas señales. A esta función se le aplica una IFFT y el resultado es una medida distribuida de temperatura y deformación a lo largo de la fibra [33].

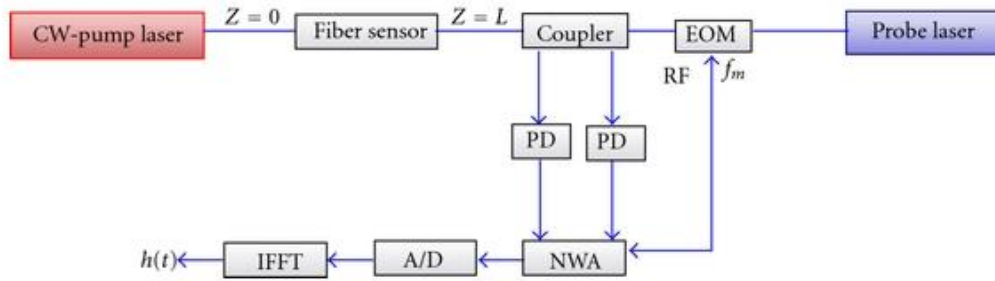


Figura 12. Sensor BOFDA.

De: Galindez-Jamioy, C. A., & López-Higuera, J. M. (2012). Brillouin distributed fiber sensors: An overview and applications. *Journal of Sensors*, 2012

3.1.2.5.2 Características generales

Estos datos han sido recogidos de diferentes modelos y diferentes marcas y sirven como orientación sobre las características principales de la tecnología [34]. Una tabla más extensa y completa se encuentra en el Anexo II.

Parámetro	Valor	Unidades
Rango Temperatura	-	-
Resolución Temperatura	0.1	°C
Rango Deformación	±3	%
Resolución Deformación	2	με
Longitud de Sensado	0 a 25	km
Resolución espacial	0.5	m

Tabla 5. Características generales sensores BOFDA.



Los sensores BOFDA poseen una resolución para las medidas de temperatura parecida a las de los sensores BOTDA, aunque su resolución para las deformaciones sea algo peor. Su longitud de medida es media y su resolución espacial es la mejor dentro de los sistemas basados en Brillouin. Realiza una medida totalmente distribuida.

3.2 Justificación de la solución adoptada

Se puede hacer un pequeño resumen de las características principales de cada tecnología para que se puedan comparar mejor:

FBG

- Buena resolución tanto en temperatura como en deformación
- La mejor resolución espacial
- Longitud de medida aceptable
- No realiza una medida distribuida, se considera cuasi-distribuida.
- Es la más asequible en términos económicos

Raman

- La mejor resolución en temperatura, pero no mide deformación
- Buena resolución espacial
- Longitud de medida buena
- Medida distribuida
- Precio del sistema elevado

Brillouin

- Resolución en las medidas de temperatura y deformación aceptables
- Buena resolución espacial
- Su longitud de medida es la más alta de todas
- Medida distribuida
- El precio de su sistema es el más elevado

Se ha realizado una tabla con un estudio de Valor Medio Ponderado, donde se aprecia que la tecnología de sensores FBG es la que obtiene mejor puntuación:



Características	Pesos	Tecnologías		
		FBG	Raman	Brillouin
Medida Temperatura	0,1	2	3	2
Medida Deformación	0,1	2	0	2
Tipo de Medida	0,1	3	2	2
Tecnología madura	0,2	3	1	1
Precio	0,5	3	1	1
Resultado		2,8	1,2	1,3

Tabla 6. Valor Medio Ponderado Tecnologías Sensores Fibra Óptica.

El sistema basado en Raman se descarta por la imposibilidad de realizar medidas de deformación, lo que impide poder detectar la arena eólica. Entre el sistema basado en Brillouin y el sistema basado en FBG, la solución final es usar sensores de medida basados en FBG, las razones son las siguientes:

En primer lugar, el sistema basado en FBG se adecúa mejor a las necesidades del proyecto, ya que no se trata de realizar una monitorización a lo largo de toda la vía, donde el sistema Brillouin sería más adecuado, sino de vigilar zonas sensibles en las que se ha identificado que hay más probabilidades de que se produzcan los fenómenos de arena acumulada y arena eólica. Así, el sistema basado en FBG responde mejor, ya que podemos colocar los sensores de manera no uniforme, ajustándolos a las zonas más problemáticas. Por otro lado, el sistema de medida basado en FBG está más maduro y estudiado que los demás, existiendo una mayor oferta de estos sistemas en el mercado. Los sistemas Brillouin son más modernos y más complicados de encontrar, por ejemplo, para el sistema BOFDA solo se ha encontrado un único dispositivo comercial. También hay que comentar que se disponía de un interrogador para sistemas de medida FBG, lo que ha ahorrado costes. Por último, y no menos importante, los sistemas basados en FBG son bastante más económicos que los sistemas basados en Brillouin.

Habiendo escogido la tecnología a utilizar para el desarrollo del sistema de medida, el siguiente paso es desarrollar el aparato de medida y el método de medida. En el método de medida se tiene, como hipótesis de partida, que, por un lado, la medida de cambios de temperatura por parte del sensor de temperatura se asocia y correlaciona a la detección del fenómeno de arena acumulada porque se entiende que cuando la arena cubra al sensor de temperatura se va a apreciar un cambio significativo en la dinámica de la medida de temperatura. Por otro lado, la medida de deformaciones del sensor de



deformación se asocia y correlaciona a la detección de arena eólica porque se entiende que cuando la arena golpea al sensor de deformación se van a observar cambios rápidos y constantes en la lectura del sensor de deformación.





CAPÍTULO IV





4 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS E INSTALACIONES

El Sistema de Medida presentado en este proyecto consta de un Aparato de Medida y un Método de Medida.

4.1 Aparato de Medida

El Aparato de Medida consta de un interrogador de FBG y de sensores FBG.

Los sensores, capaces de medir temperatura y deformación, se conectarán en serie mediante fibra óptica y, a su vez, serán conectados al interrogador. El interrogador, conectado a la fibra óptica donde se encuentran los sensores, se compone de una fuente de luz de espectro ancho y un receptor. La luz emitida viaja a través de la fibra y es reflejada por los sensores a las frecuencias nominales de cada uno de ellos. Cuando la frecuencia reflejada varía, el interrogador relaciona esa variación de frecuencia con cambios de temperatura y deformación, relación proporcionado por el fabricante de los sensores.

4.1.1 Esquema

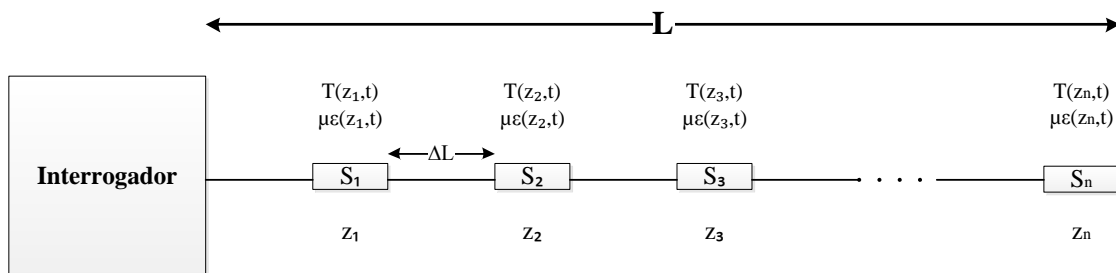


Figura 13. Esquema Aparato de Medida.

Un número “n” de sensores “S” se colocan en posiciones “z” a lo largo de una distancia “L” y separados entre sí una longitud “ ΔL ”. Cada sensor proporciona una medida de temperatura “T” y de deformación “ $\mu\epsilon$ ”, respecto al tiempo “t” y a las posiciones “z”. De esta manera se obtienen unos mapas de valores de temperatura y de deformación. Hay que aclarar que el interrogador es incapaz de discriminar si la variación en la frecuencia reflejada se debe a cambios de temperatura o a deformaciones, por lo que se colocarán dos sensores por cada posición “z”, uno de temperatura y otro de deformación.

4.1.2 Planificación de frecuencias



El interrogador posee una fuente de luz de anchura espectral limitada y los sensores ocupan unos rangos de frecuencia alrededor de su frecuencia nominal para la medida de temperatura y deformación, por lo que se entiende que existe una limitación en cuanto al número máximo de sensores que pueden ser conectados a un interrogador a lo largo de cierta distancia. Además, en nuestro caso, se necesitan dos sensores por cada punto de medida, por lo que se reduce a la mitad el número de sensores que podemos utilizar para una misma distancia de medida.

		Valores (nm)	
Ancho de banda Interrogador		100	
Ancho de banda sensor		0,2	
Rango frecuencia sensor	Temperatura	1	
	Deformación	7,5	
Número de puntos de medida		11,23595506	11

Tabla 7. Estudio de frecuencias.

A partir de aquí se debe llegar a un compromiso entre la resolución espacial y la distancia de monitorización. Por otro lado, la distancia máxima capaz de monitorizar un interrogador es de 10 km debido exclusivamente a la atenuación de la señal, así pues, se presenta una tabla de distancias y resoluciones:

Número de puntos de medida máximo	11				
Distancia monitorización (km)	10	5	2	1	0,5
Separación sensores (Resolución espacial)(m)	909,09	454,55	181,82	90,91	45,45

Tabla 8. Distancia vs Resolución.

El caso donde se aprovecha la mayor longitud de medida posible sería el compuesto por 11 puntos de medida, equivalentes a 22 sensores, distribuidos a lo largo de 10 kilómetros con una separación entre ellos de aproximadamente 909 metros. A partir de aquí, se debe sacrificar distancia de monitorización para mejorar la resolución espacial.



4.2 Método de Medida

El Método de Medida de arena acumulada y arena eólica se basa en la respuesta de parejas de sensores de temperatura y deformación y se presenta de la siguiente manera:

Para la detección de arena acumulada se deben observar las respuestas de los sensores de temperatura. La arena acumulada provoca una variación en la temperatura respecto al tiempo medida por los sensores de temperatura y comparando las medidas de sensores de temperatura adyacentes podemos conocer donde se está produciendo el fenómeno de arena acumulada. Por lo tanto, se realizan mediciones respecto al tiempo y respecto a la posición.

Para la detección de arena eólica o arena en suspensión se debe comprobar las lecturas de los sensores de deformación. Cuando se produce el fenómeno de arena en suspensión, ésta golpea al sensor de deformación variando su lectura. Las medidas se realizarán respecto al tiempo y también respecto a los sensores de deformación adyacentes para localizar el evento.





CAPÍTULO V





5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

A partir del aparato de medida y el método de medida, y disponiendo del equipamiento necesario, se han realizado unas pruebas de concepto en laboratorio para comprobar el funcionamiento del sistema de medida propuesto.

5.1 Prueba de concepto en laboratorio

Sólo se ha podido disponer de dos sensores FBG, uno de temperatura y otro de deformación, y un interrogador, por lo que sólo se puede realizar la medición respecto al tiempo y no respecto al tiempo y a la posición como se pretendía en un principio. El montaje queda como aparece en la Figura 14.

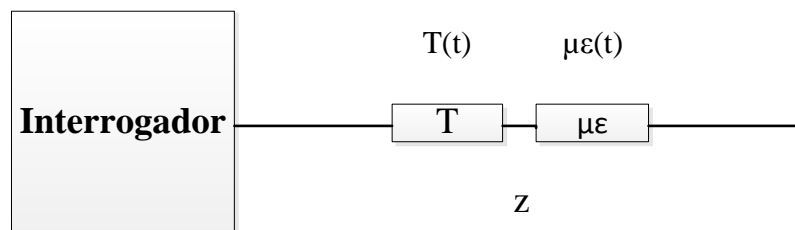


Figura 14. Esquema prueba de concepto.

El equipamiento que conforma el montaje para las pruebas de concepto en laboratorio consta de un sensor de temperatura de Fiber Sensing FS 6300, encargado de la detección de arena acumulada, un sensor de deformación de Fiber Sensing FS 6200, encargado de la detección de arena eólica, y un interrogador de Fiber Sensing FS 4200 Bragg Meter. En el Apartado 2 del Pliego de condiciones se encuentran las hojas técnicas de los equipos mencionados con sus especificaciones.

5.1.1 Pruebas de funcionamiento

Se realiza una primera prueba para comprobar el correcto funcionamiento de los sensores (Figura 15).

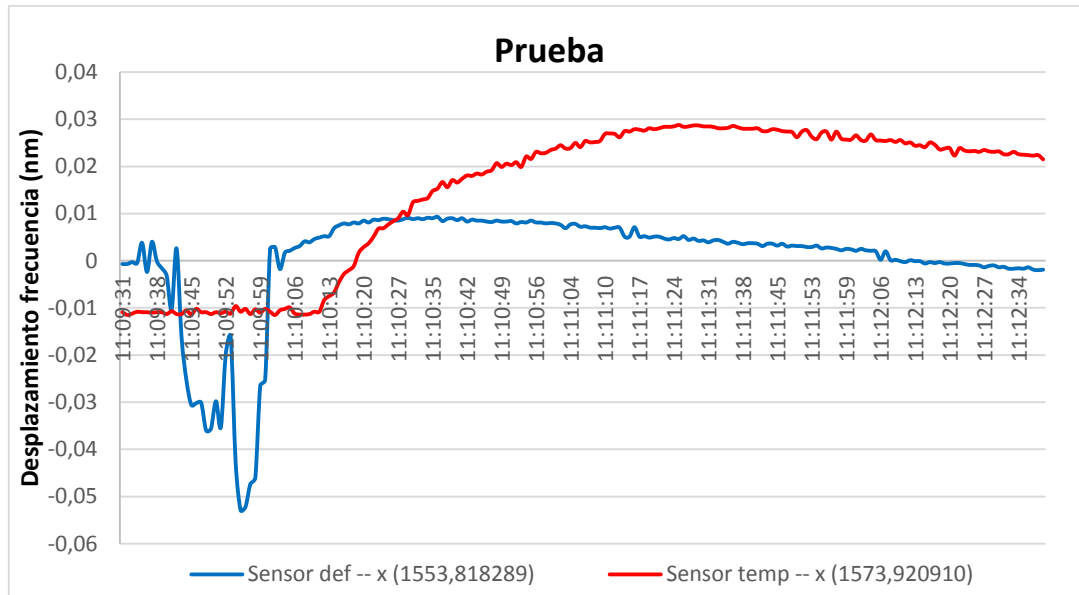


Figura 15. Gráfica Prueba.

En la prueba de la Figura 15 se conectan los dos sensores y se somete a un cambio de temperatura al sensor de temperatura y a varias deformaciones al sensor de deformación. Las respuestas son las esperadas teniendo en cuenta la calibración ofrecida por el fabricante (dichas calibraciones se adjuntan en el Anexo VI), aunque se aprecia que el sensor de deformación vuelve a sus valores iniciales con una dinámica muy lenta después de ser deformado.

El interrogador también ofrece la posibilidad de comprobar las variaciones mediante un OSA (Optical Spectrum Analyzer) que permite observar amplitud frente a frecuencia:

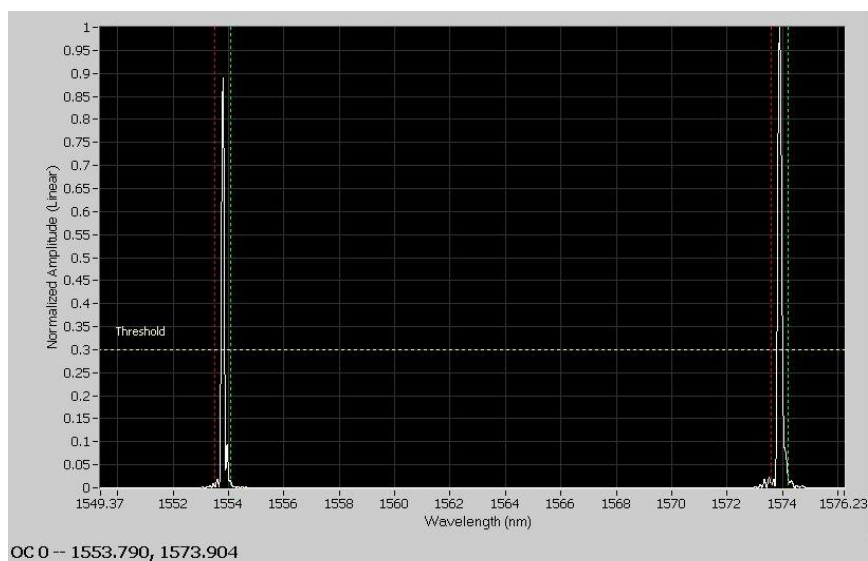


Figura 16. Sensores en OSA.

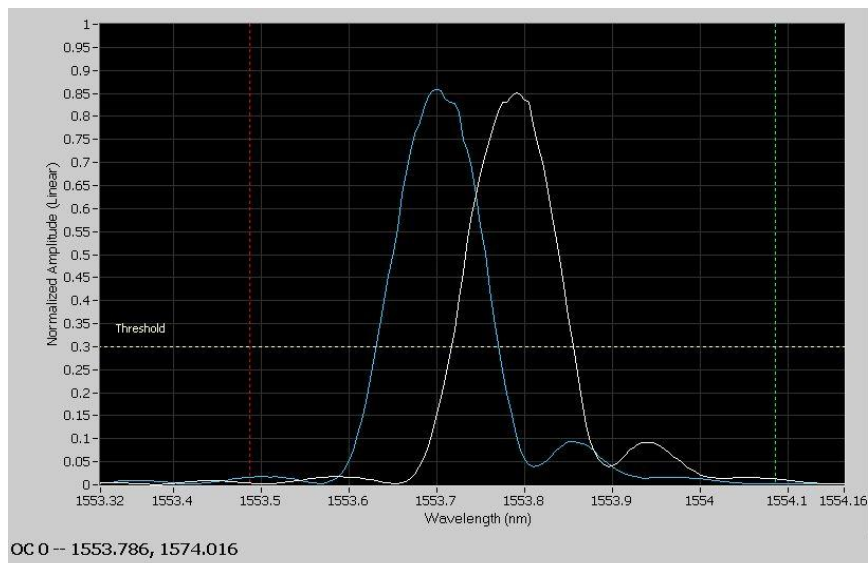


Figura 17. Sensor deformación en OSA.

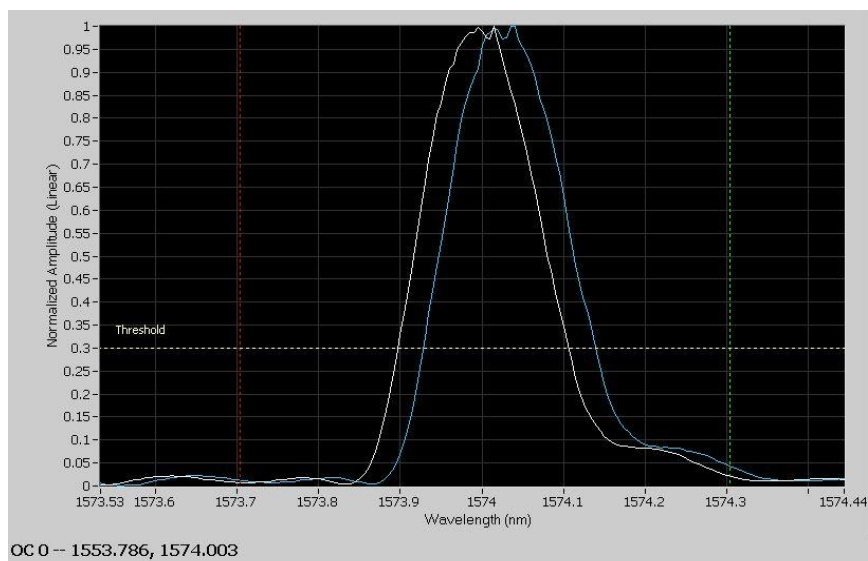


Figura 18. Sensor Temperatura en OSA.

En las Figuras 16, 17 y 18 aparecen instantes concretos del primer ensayo realizado, el referido en la Figura 15, pero en este caso en función de la intensidad y de la frecuencia.

A continuación se realizan pruebas de manera independiente a ambos sensores (Figuras 19 y 20).

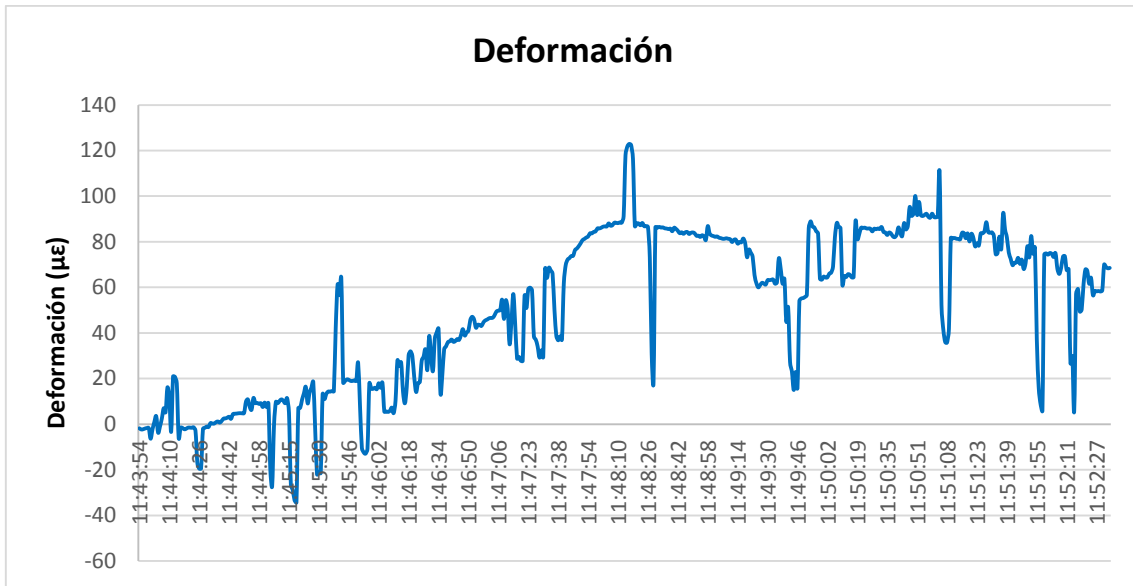


Figura 19. Gráfica Deformación.

En la prueba que aparece en la Figura 19, se somete al sensor de deformación a todo tipo de deformaciones y se observa que responde mejor a las deformaciones de tracción y compresión, pero no tan bien a las de flexión, probablemente debido al encapsulado del sensor, que está orientado a otro tipo de aplicaciones. Por otro lado, se vuelve a observar que después de las deformaciones el sensor no vuelve a su posición inicial con una dinámica rápida.

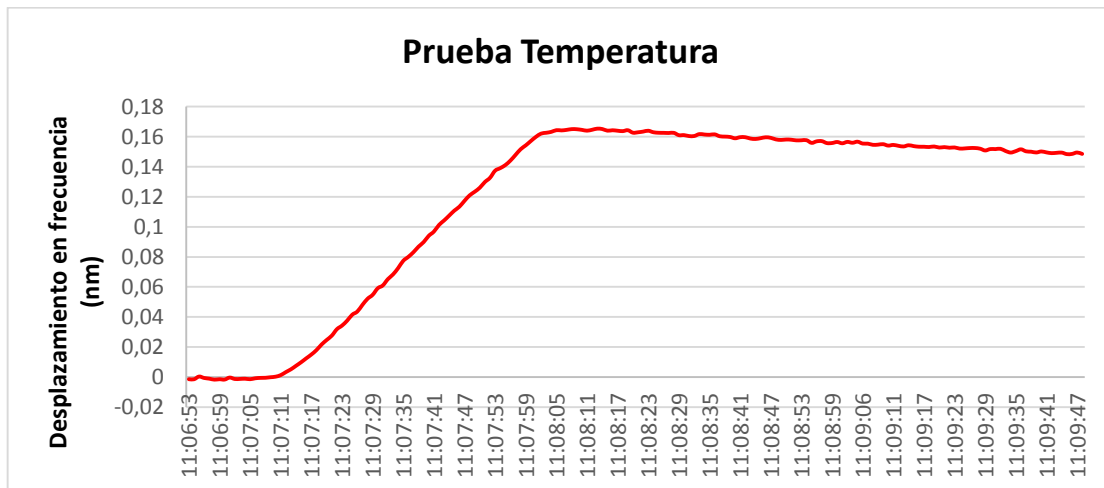


Figura 20. Gráfica Temperatura.

En la prueba reflejada en la Figura 20, al sensor de temperatura se le aplica calor y después se deja enfriar. Los resultados concuerdan con los datos ofrecidos por el fabricante en la hoja de calibración (Anexo VI).



A partir de aquí se comienzan a realizar pruebas acercándose lo más posible al sistema de medida y se somete al sensor de deformación, el cual genera más dudas, a una prueba usando un ventilador y en posición de voladizo, es decir, con un extremo fijo y el otro al aire (Figura 21).

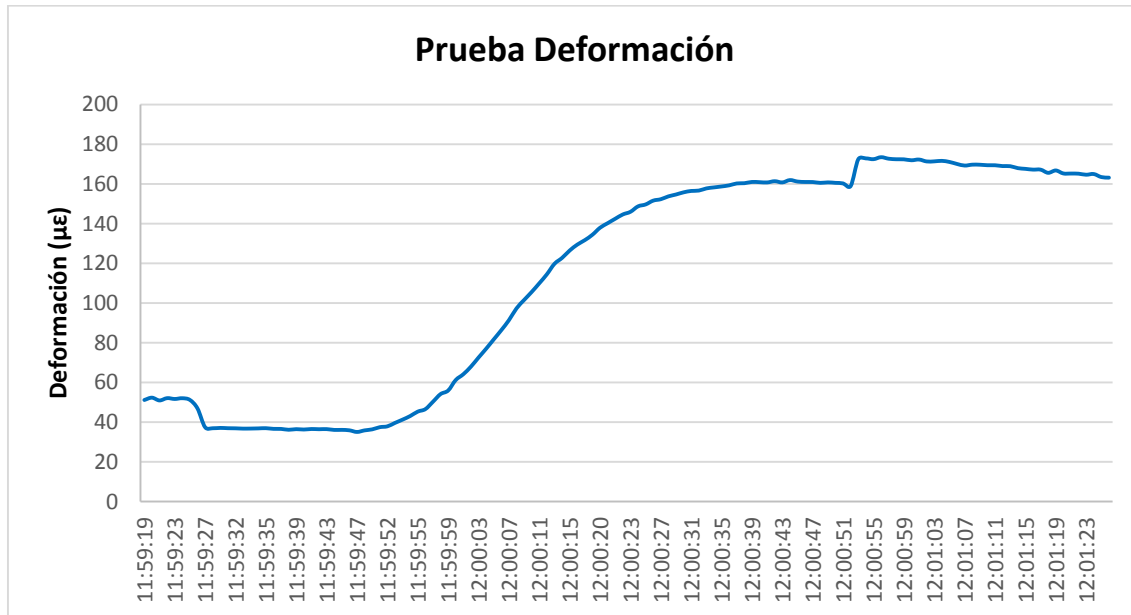


Figura 21. Gráfica Deformación con ventilador y en voladizo.

En la Figura 21 se confirma lo que se venía intuyendo en las anteriores, el sensor de deformación es sensible a los cambios de temperatura, además de manera muy acusada, lo que va a complicar mucho la medida de arena eólica, de la cual se debía encargar el sensor de deformación.

5.1.2 Compensación

Teniendo en cuenta el inconveniente de la sensibilidad del sensor de deformación a los cambios de temperatura se intenta hacer una compensación, utilizando, para ello, el sensor de temperatura como referencia. El primer paso para realizar una correcta compensación es conocer el comportamiento del sensor de deformación a los cambios de temperatura, por lo que se somete a ambos sensores a un mismo cambio de temperatura (Figura 22).

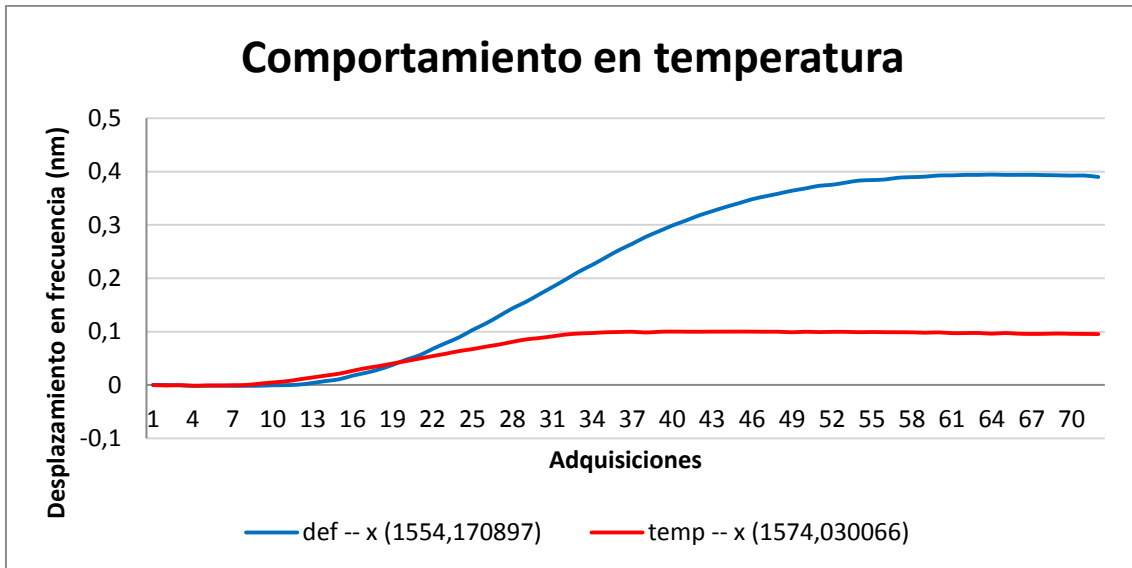


Figura 22. Gráfica de comportamiento en temperatura.

En la Figura 22 se aprecia que el sensor de deformación no solo es sensible a la temperatura, sino que es más sensible a la temperatura que el propio sensor de temperatura.

A partir de estos datos se genera una gráfica (Figura 23) con los valores del sensor de deformación frente a los cambios de temperatura a los que ha sido sometido.

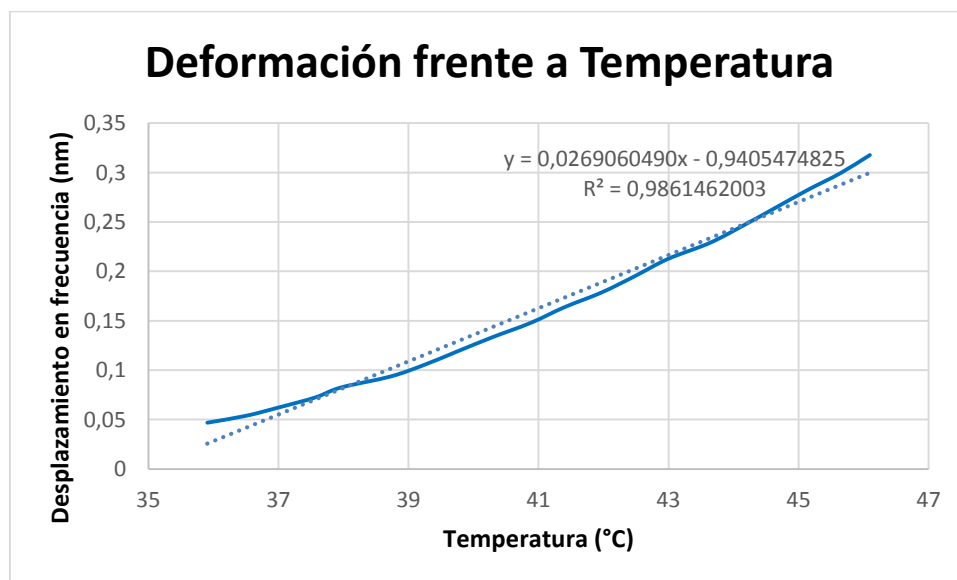


Figura 23. Gráfica Deformación frente a Temperatura.

Con la pendiente de la recta se obtiene la sensibilidad del sensor de deformación a los cambios de temperatura, dato necesario para poder realizar la compensación.



Para la compensación se ha utilizado el método que aparece en el artículo “*Simultaneous strain and temperature measurement using a single fibre Bragg grating*” de Bai-Ou Guan [35]. Para ello se parte de la ecuación (3) y se simplifica de tal manera que quede:

$$\Delta\lambda_i = k_{\mu\epsilon i}\Delta\mu\epsilon + k_{T_i}\Delta T \quad i = 1,2 \quad (7)$$

donde $k_{\mu\epsilon}$ es la sensibilidad del sensor a las deformaciones y k_T la sensibilidad del sensor a la temperatura. El subíndice $i = 1$ corresponde al sensor de temperatura y el $i = 2$ al sensor de deformación.

Los valores k_{T1} y $k_{\mu\epsilon 2}$ vienen dados por el fabricante de los sensores en las hojas de calibración (Anexo VI) y los valores $k_{\mu\epsilon 1}$ y k_{T2} han sido obtenidos experimentalmente (se comprobó que $k_{\epsilon 1}$, la sensibilidad del sensor de temperatura a las deformaciones, era nula). De esta manera, y con los datos de los desplazamientos en frecuencia $\Delta\lambda_i$ obtenidos en el interrogador, se puede realizar la compensación del sensor de deformación.

Las ecuaciones de compensación quedan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_1 &= 0,00976 \times \Delta T \\ \Delta\lambda_2 &= 0,00110936 \times \Delta\mu\epsilon + 0,02691 \times \Delta T \end{aligned} \quad (8)$$

Tan solo queda ajustar, restar y se obtiene el valor real de deformación independientemente de la temperatura.

5.1.3 Pruebas de larga duración

Con el problema de la compensación ya superado, se continúa con unas pruebas de larga duración, una de 24 horas al aire libre de ambos sensores y otra de 48 horas (Figuras 24 y 25).

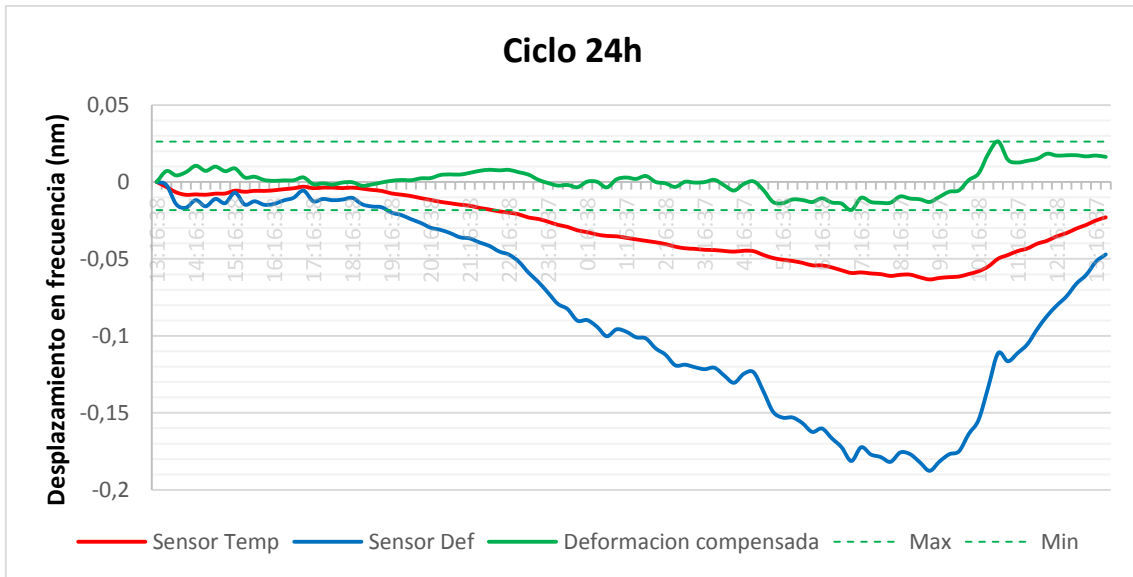


Figura 24. Gráfica 24 horas.

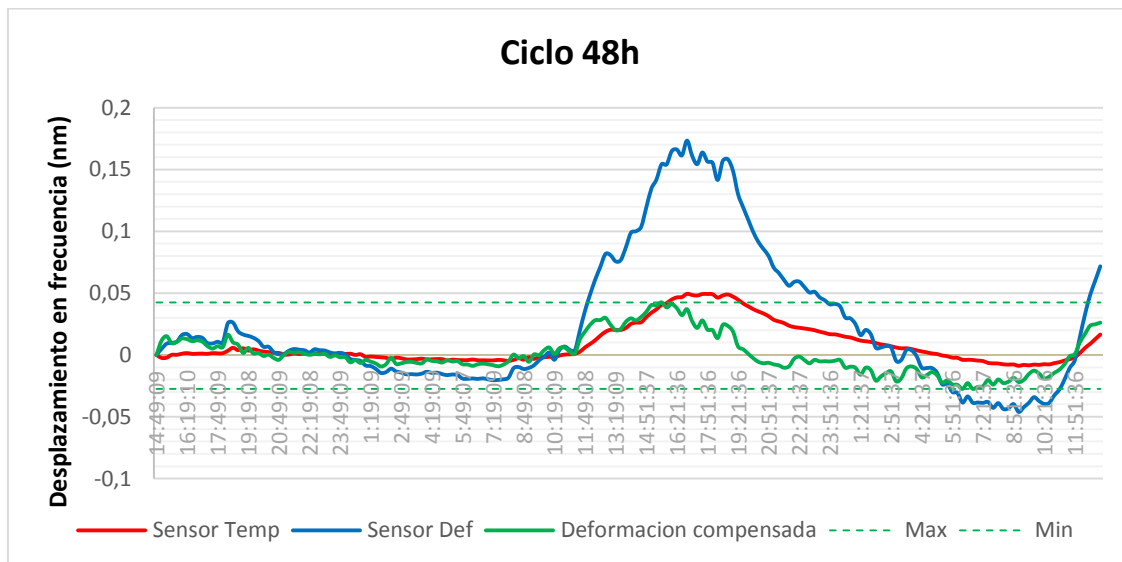


Figura 25. Gráfica 48 horas.

En la Figura 24 se observa cómo evolucionan las temperaturas a lo largo del día y como bajan durante la noche. También se puede ver cómo el sensor de deformación es compensado mediante el método comentado anteriormente, intentando que sus lecturas sean más estables, limitándolas entre un máximo y un mínimo.

En la Figura 25 se aprecian dos zonas en la gráfica bien diferenciadas, en la primera de ellas, que corresponde a las primeras 24 horas, las variaciones de temperatura son muy suaves, mientras que en las segundas 24 horas las variaciones son más acentuadas. Esto indica que, probablemente, el primer día fue un día nublado pero sin precipitaciones (circunstancia en la que las temperaturas son más suaves y estables),



mientras que el segundo día fue un día soleado. Al sensor de deformación se le ha aplicado también en este ensayo la compensación para limitar sus variaciones.

5.1.4 Pruebas montaje definitivo

Las siguientes pruebas (Figuras 29 y 30) se realizan con un montaje más cercano al real (Figuras 26, 27 y 28).

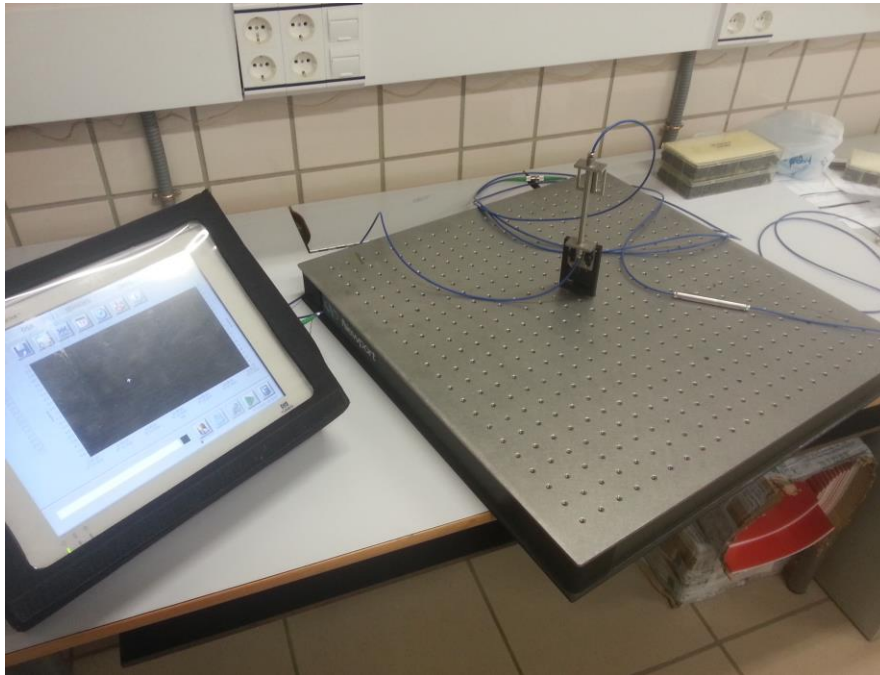


Figura 26. Montaje laboratorio.

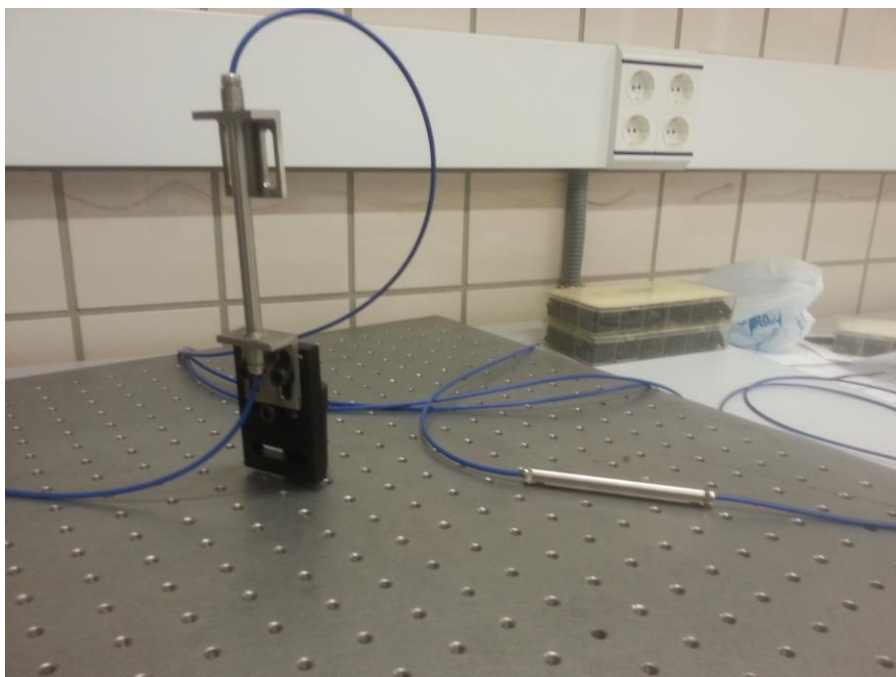


Figura 27. Sensores montaje.

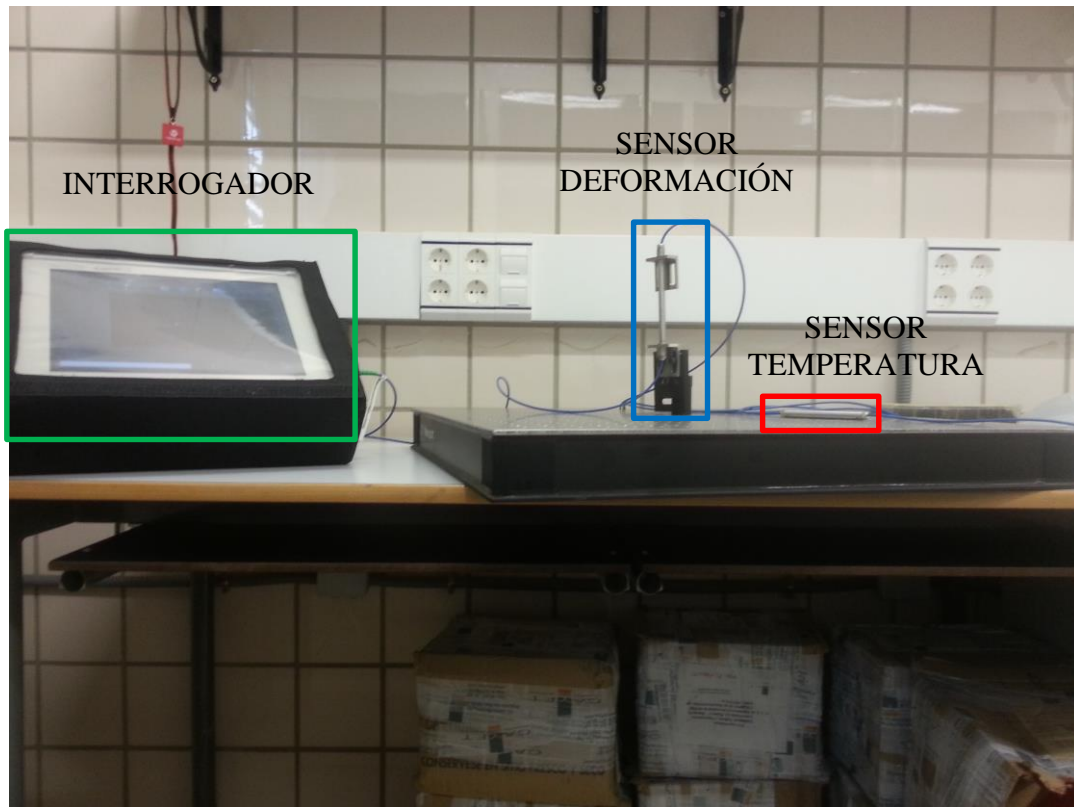


Figura 28. Montaje.

Tras la realización de las pruebas anteriores (Apartados 5.1.1 y 5.1.3 de la Memoria), se ha pensado en modificar el primer montaje que aparece en la Figura 14 por el que aparece en las Figuras 26, 27 y 28. El sensor de deformación se ha colocado en posición vertical, sujeto por uno de sus extremos y con el otro libre, mientras que el sensor de temperatura se ha colocado en posición horizontal junto al sensor de deformación. La intención que hay tras esta disposición es, por un lado, la de maximizar la sensibilidad del sensor de deformación ante el fenómeno de arena eólica y, por otro lado, que el sensor de temperatura cumpla la doble función de detectar arena acumulada y poder ser utilizado como sensor de referencia de temperatura para la compensación.

En las Figuras 29 y 30 se ha procedido a realizar las simulaciones de los fenómenos de arena acumulada y arena eólica.

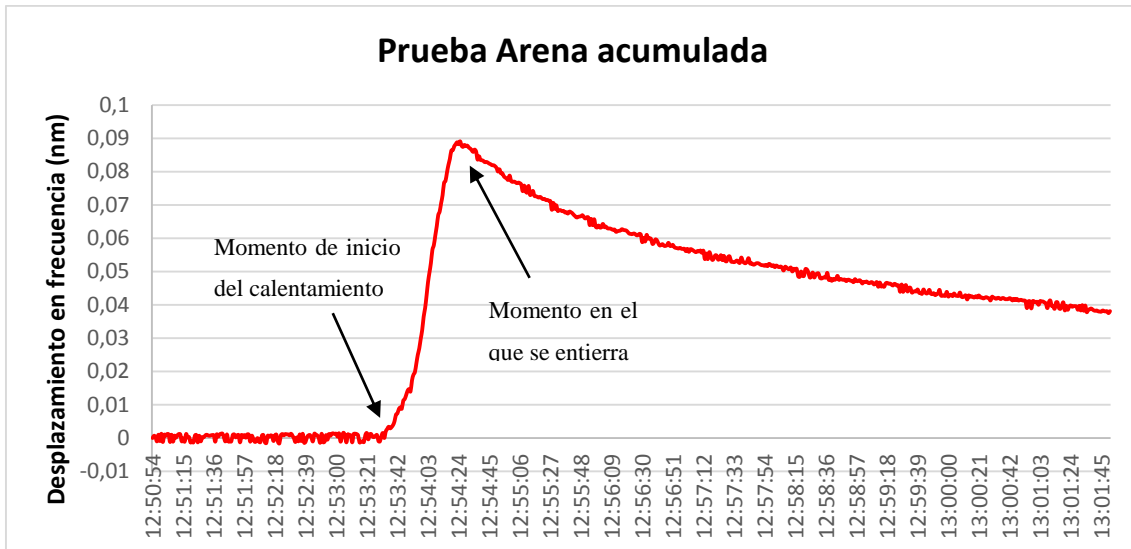


Figura 29. Gráfica prueba arena acumulada.

En la prueba de arena acumulada (Figura 29) el sensor de temperatura permanece en reposo hasta que se le aplica calor. En un momento posterior, mientras se sigue calentando, se entierra el sensor con la idea de simular el efecto de la arena acumulada. A partir de ese momento se observa que hay un cambio brusco de temperatura y que, tras un periodo de enfriamiento, tiende a estabilizarse.

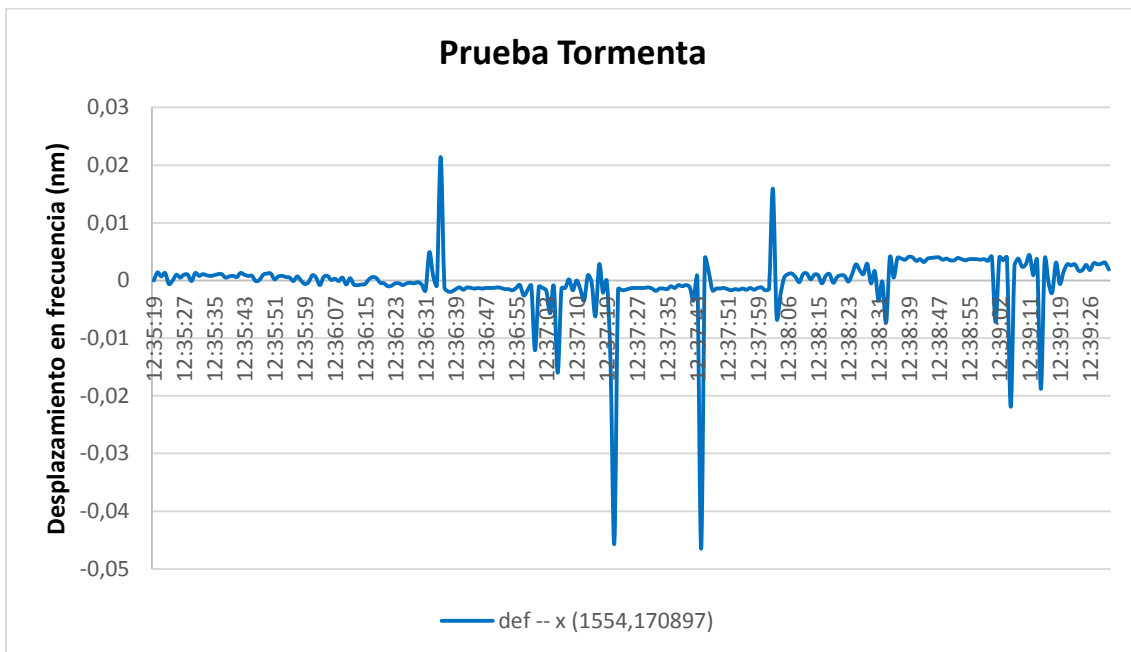


Figura 30. Gráfica prueba arena eólica.

En la prueba de arena eólica (Figura 30) se somete al sensor de deformación a un viento variante y a una serie de pequeños impactos con la intención de simular el efecto



de arena eólica. Se observa que el fenómeno es fácil de detectar, con la aparición de una serie de picos en la lectura del sensor cuando se producen los impactos.

El siguiente paso, el cual queda fuera del presente proyecto, es el de realizar las pruebas de campo para obtener resultados más veraces y, a partir de ahí, desarrollar, en última instancia, un algoritmo de control que sea capaz de activar las alarmas cuando se produzcan los fenómenos de arena acumulada y/o arena eólica.



CAPÍTULO VI





6 PROGRAMACIÓN DE TAREAS Y PLAZOS

6.1 Prueba de concepto en laboratorio

Los ensayos de laboratorio para las pruebas de concepto de detección y monitorización de arena acumulada y arena eólica mediante sensores de fibra óptica basados en FBGs se han llevado a cabo en una serie de tareas a realizar durante cuatro meses desde la propuesta de la idea.

Las tareas se llevarán a cabo en los laboratorios del grupo de investigación formado por dos ingenieros.

En la Figura 31 se representa un diagrama de Gantt con la planificación temporal de las tareas que conforman el desarrollo de las pruebas de laboratorio.



Proyecto Fin de Máster: Programación y Plazos

Tareas

- T01: Gestión de los Ensayos de Laboratorio
- T02: Recepción del equipamiento
 - T02.1: Familiarización con los equipos
 - T02.2: Realización de pruebas y ensayos de comprobación
- T03: Montaje del Sistema de Medida
 - T03.1: Montaje en Laboratorio
 - T03.2: Montaje al Aire Libre
- T04: Realización de medidas tensión y temperatura
 - T04.1: Medidas de tensión mediante sensores FBGs
 - T04.2: Medidas de temperatura mediante sensores FBGs
 - T04.3: Validación y verificación de resultados
- T05: Correlación de medidas con detección de arena acumulada y eólica
 - T05.1: Detección de arena acumulada
 - T05.2: Detección de arena eólica
 - T05.3: Validación y verificación de resultados
- T06: Análisis de propuestas para la optimización del montaje
 - T06.1: Propuesta de desarrollo de sensor a medida
- T07: Elaboración del Informe Final de Ensayos de Laboratorio
 - T07.1: Redacción de documentación
 - T07.2: Patentes y publicaciones (si procede)

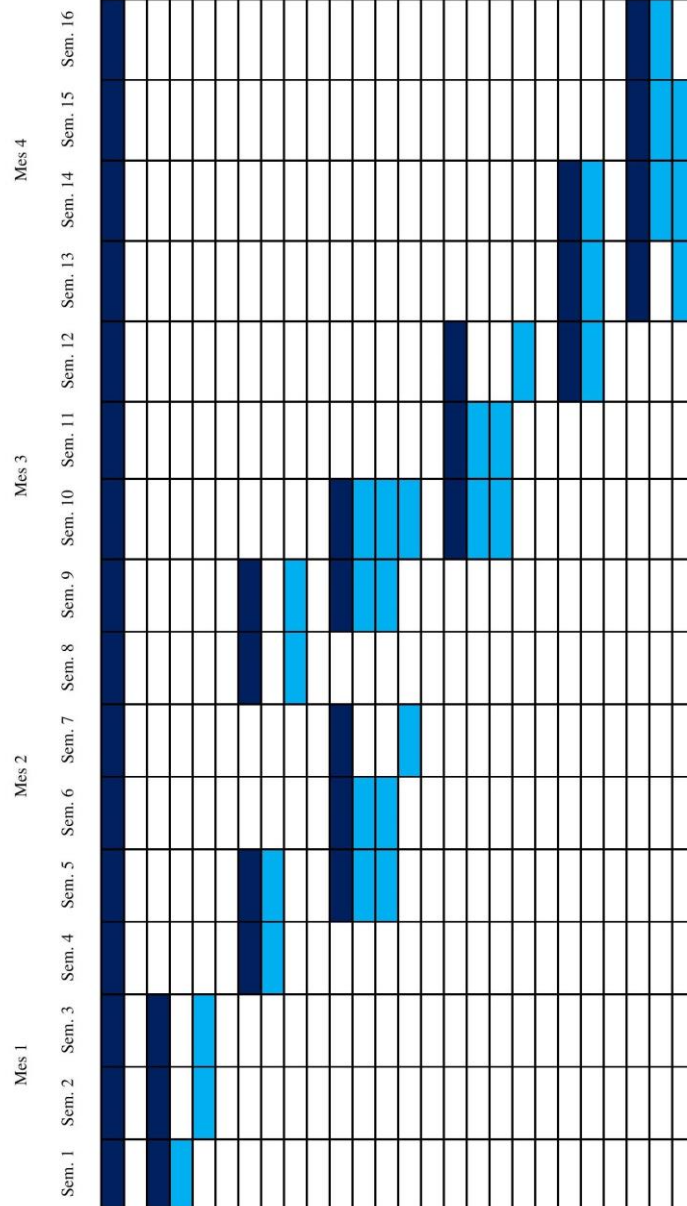


Figura 31. GANTT Prueba de Laboratorio.



En primer lugar, tras la recepción de los equipos, se procede a la familiarización de los mismos a través de los manuales y se realizan unas pruebas para comprobar su correcto funcionamiento.

Tras comprobar el correcto funcionamiento del equipo se propone un montaje adecuado del interrogador y los sensores para realizar las pruebas de laboratorio.

Con el sistema de medida montado, se comienzan a realizar las pruebas. Se realizan pruebas de deformación y de temperatura en diferentes condiciones y circunstancias. Las medidas son validadas y verificadas.

Las medidas de deformación y temperatura son correlacionadas con las medidas de arena eólica y arena acumulada a partir del método de medida propuesto. Los resultados son validados y verificados.

A partir del conocimiento adquirido a lo largo de las pruebas de laboratorio se propone una mejora del montaje teniendo en cuenta los condicionantes y los resultados obtenidos. También se plantea el diseño de un sensor FBG específico para la aplicación objeto.

Por último, se procede a realizar la documentación relativa a los ensayos de laboratorio, que engloban tanto el Informe Final como la redacción de posibles patentes a las que pueda dar lugar el trabajo realizado.

En el Anexo V se adjuntan las tablas detalladas con las unidades de trabajo.

6.2 Pruebas de campo

Las pruebas de campo para detección y monitorización de arena acumulada y arena eólica mediante sensores de fibra óptica basados en FBGs no entran dentro del presente proyecto pero, debido a su importancia y a su más que probable realización, se plantea una programación en una serie de tareas a realizar durante cuatro meses posteriores a la realización de las pruebas de concepto en laboratorio.

Las tareas se llevarán a cabo en el campo de pruebas destinado a tal efecto.

En la Figura 32 se representa un diagrama de Gantt con la planificación temporal de las tareas que conforman el desarrollo de las pruebas de campo.



Proyecto Fin de Máster: Programación y Plazos

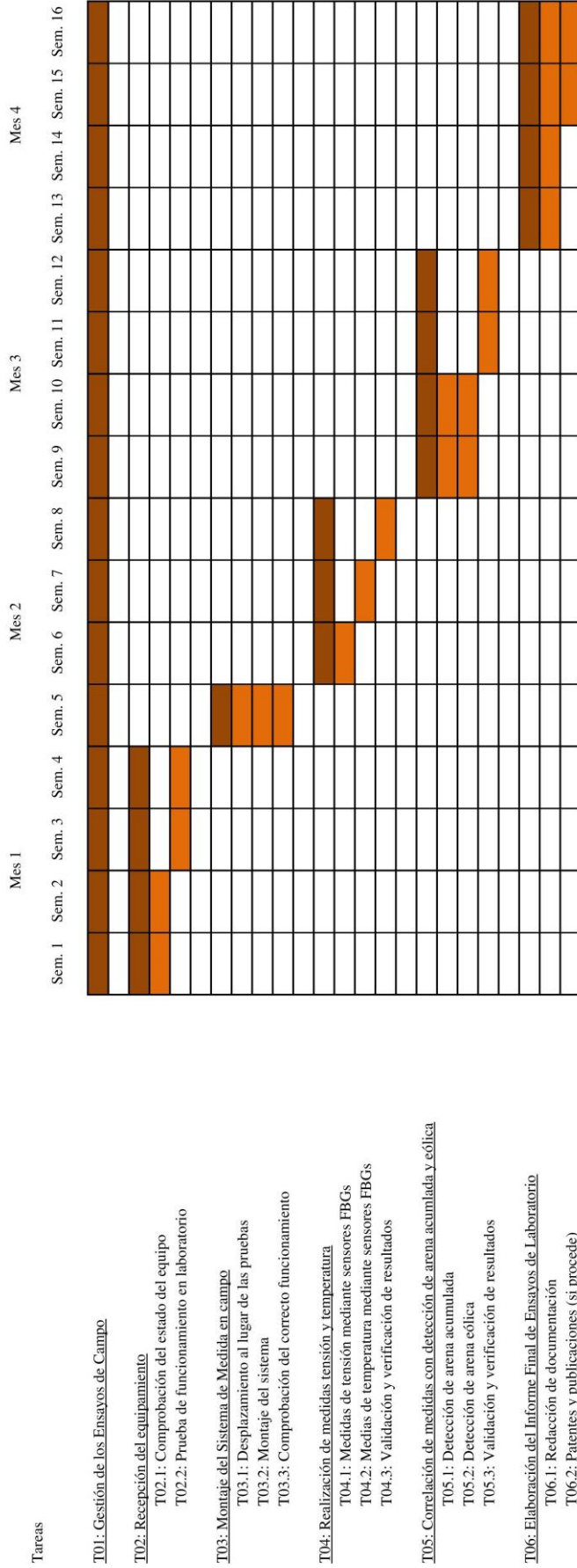


Figura 32. GANTT Prueba de Campo.



Para la realización de las pruebas de campo se necesitan más sensores, al menos diez, para abarcar una mayor distancia de medida, por lo tanto, en primer lugar, se procede a la recepción del nuevo equipamiento y se familiariza con él mediante los manuales de los mismos.

Tras la recepción del nuevo equipamiento se realiza un nuevo montaje parecido al utilizado en las pruebas de laboratorio pero con un mayor número de sensores.

Se continúa con la realización de diferentes ensayos para las medidas de deformación y temperatura, las cuales son validadas y verificadas.

A partir de las medidas de deformación y temperatura a lo largo de la red de sensores, se procede a correlacionarlas con las medidas de arena eólica y arena acumulada mediante el método de medida propuesto. Los datos son validados y verificados.

Por último, se procede a elaborar la documentación relativa a las pruebas de campo en las que se incluye tanto el Informe Final como la redacción de posibles patentes a las que pueda dar lugar el trabajo realizado.

En el Anexo V se adjuntan las tablas detalladas con las unidades de trabajo.





CAPÍTULO VII





7 EQUIPO REDACTOR DEL PROYECTO

El presente proyecto ha sido desarrollado completamente por el Ingeniero Adrián Lara Pérez.





CAPÍTULO VIII





8 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

El presente proyecto se proponía, como meta final, el diseño, sin ningún precedente hasta la fecha, de un sistema de medida para la detección de arena acumulada y arena eólica mediante sensores basados en fibra óptica. Para ello, se han realizado varios pasos, donde se incluyen el estudio del arte de los sensores basados en fibra óptica, el análisis de las distintas tecnologías existentes y la elección de una de ellas en base a lo adecuado de sus características y de la inversión necesaria, el diseño del aparato de medida y el método de medida y la realización de las pruebas de laboratorio una vez se estaba en posesión del equipamiento necesario.

Las pruebas de concepto en laboratorio no se pudieron realizar tal y como se pretendía en un principio debido a la falta de más equipamiento (solo se pudo disponer de una pareja de sensores de deformación y temperatura cuando lo ideal era una red de parejas de sensores o, al menos, tres parejas de sensores para poder realizar las medidas conforme al tiempo y a la posición) pero, aun así, se procedió a la realización de las pruebas de concepto en laboratorio con el material disponible. Los primeros resultados arrojaron varios problemas, como la necesidad de compensación en el sensor de deformación, pero los últimos resultados demostraron, en primer lugar, la correlación de las medidas de temperatura y deformación con los fenómenos de arena acumulada y arena eólica y, en segundo lugar, que es posible identificar y detectar dichos fenómenos con sensores basados en fibra óptica, culminando el presente proyecto con un resultado muy satisfactorio y habiendo alcanzado el objetivo propuesto inicialmente.

A partir de todo lo desarrollado en el presente proyecto se abren varias líneas de trabajo:

La primera de ellas, y la más inmediata, es la realización de las pruebas de campo, donde se someterá al sistema de medida propuesto a un entorno real. En estas pruebas deberá comprobarse el funcionamiento del sistema de medida en todas las situaciones posibles, asegurándose de su correcto funcionamiento en cada una de ellas o, por el contrario, ajustando los detalles que sean necesarios para el correcto funcionamiento del sistema.



En segundo lugar, sería interesante que, a partir del método de medida propuesto en el presente proyecto, se desarrollase un algoritmo capaz de detectar de manera automática los eventos de arena eólica y arena acumulada.

Otras líneas de trabajo futuras podrían ser el diseño de un sensor FBG específico para la detección de arena acumulada y arena eólica; ajustar el sistema de medida para funcionar en ambientes helados, ya que los fenómenos de nieve acumulada y las tormentas de nieve se asemejan mucho a los fenómenos estudiados en el presente proyecto; o el desarrollo de un sistema similar pero utilizando otra de las tecnologías basadas en fibra óptica existentes.



ANEXOS MEMORIA

Desarrollo de un sistema de monitorización y/o
detección de arena acumulada y arena eólica en
vías de tren de altas prestaciones mediante
sensores basados en fibra óptica

Adrián Lara Pérez

Trabajo Fin de Máster





ANEXO I





A.I BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/fotonica/instrumentacion-optica-y-electronica/medida-con-fibra-optica/>.
- [2] Olson, L. E., Roop, S. S., & Transportation Research Board. (2003). An Investigation into the Use of Buried Fiber Optic Filament to Detect Trains and Broken Rail. *High-Speed Rail IDEA Program Project Final Report*, (HSR-IDEA Project 18).
- [3] Filograno, M., Rodriguez-Barrios, A., Corredera, P., Martin-Lopez, S., Rodriguez-Plaza, M., Andres-Alguacil, A., et al. (2010). Real-time monitoring of railway traffic using fiber bragg gratings. (*EWOFs'10*) *Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, pp. 76533M-76533M-4.
- [4] http://www.tendencias21.net/Solucionan-los-retrasos-por-acumulacion-de-hojas-y-nieve-en-las-vias-de-tren_a7810.html.
- [5] Yin, S., Ruffin, P. B., & Francis, T. S. (Eds.). (2010). *Fiber Optic Sensors*. CRC Press.
- [6] Li, H., Li, D., & Song, G. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures*, 26(11), 1647-1657.
- [7] López-Higuera, J. M. (2002). Handbook of optical fibre sensing technology.
- [8] Udd, E., & Spillman Jr, W. B. (Eds.). (2011). *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. John Empresa colaboradoraley & Sons.
- [9] Inaudi, D., & Glisic, B. (2006). Distributed fiber optic strain and temperature sensing for structural health monitoring. *Proceedings of the IABMAS*, 6
- [10] <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/fotonica/instrumentacion-optica-y-electronica/medida-con-fibra-optica/fibra-optica---redes-de-bragg/>.
- [11] Rao, Y. (1999). Recent progress in applications of in-fibre bragg grating sensors. *Optics and Lasers in Engineering*, 31(4), 297-324.
- [12] Yun, S. H., Richardson, D., & Kim, B. Y. (1998). Interrogation of fiber grating sensor arrays Empresa colaboradorath a wavelength-swept fiber laser. *Optics Letters*, 23(11), 843-845.
- [13] Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., & Bhattacharya, D. K. (2008). Fibre bragg gratings in structural health



- monitoring—present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 150-164.
- [14] Singh, S. P., Gangwar, R., & Singh, N. (2007). Nonlinear scattering effects in optical fibers. *Progress In Electromagnetics Research*, 74, 379-405.
- [15] Guano Hidalgo, H. A., & Molina Avalos, P. C. (2013). Estudio y Simulación de los efectos no lineales-Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS) (Doctoral dissertation, QUITO/EPN/2013).
- [16] <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/fotonica/instrumentacion-optica-y-electronica/medida-con-fibra-optica/fibra-optica---efecto-raman/>.
- [17] Berberoglu, h. (2007). Numerical simulations on stimulated raman scattering for fiber raman amplifiers and lasers using spectral methods.
- [18] Bolognini, G., Park, J., Soto, M. A., Park, N., & Di Pasquale, F. (2007). Analysis of distributed temperature sensing based on raman scattering using OTDR coding and discrete raman amplification. *Measurement Science and Technology*, 18(10), 3211.
- [19] Filograno, M. L., González-Herráez, M., Corredera, P., Martín López, S., Esteban, Ó., Hernanz Sanjuan, M., ... & Sanchez-Urán, M. A. (2009). Medida de la distribución de temperatura en un transformador mediante Raman distribuido en fibra óptica.
- [20] Kee, H. H., Lees, G. P., & Newson, T. P. (1999). 1.65 μm raman-based distributed temperature sensor. *Electronics Letters*, 35(21), 1869-1871.
- [21] Signorini, A., Faralli, S., Soto, M. A., Sacchi, G., Baronti, F., Barsacchi, R., et al. (2010). 40 km long-range raman-based distributed temperature sensor Empresa colaboradorath meter-scale spatial resolution. *Optical Fiber Communication (OFC), Collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010 Conference on (OFC/NFOEC)*, pp. 1-3.
- [22] <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/fotonica/instrumentacion-optica-y-electronica/medida-con-fibra-optica/fibra-optica---dispersion-estimulada-de-brillouin/>.
- [23] Galindez-Jamioy, C. A., & López-Higuera, J. M. (2012). Brillouin distributed fiber sensors: An overview and applications. *Journal of Sensors*, 2012
- [24] Ruffin, A. B. (2004). Stimulated brillouin scattering: An overview of measurements, system impairments, and applications. *Proc. Symp. Opt. Fiber Meas*, pp. 23-28.



- [25] Azizan, S., Shahimin, M. M., & Murad, S. A. (2012, September). Simple distributed Brillouin scattering modeling for temperature and strain sensing. *InBusiness, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA), 2012 IEEE Symposium on* (pp. 45-49). IEEE.
- [26] Horiguchi, T., & Tateda, M. (1989). BOTDA-Non destructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory. *Journal of lightwave technology*, 7(8), 1170-1176.
- [27] Angulo-Vinuesa, X., Martín-Lopez, S., Nuño, J., Corredera, P., Ania-Castañón, J. D., Thévenaz, L., et al. (2012). Raman-assisted Brillouin distributed temperature sensor over 100 km featuring 2 m resolution and 1.2 C uncertainty. *Journal of Lightwave Technology*, 30(8), 1060-1065.
- [28] Dong, Y., Chen, L., & Bao, X. (2011). Time-division multiplexing-based BOTDA over 100km sensing length. *Optics Letters*, 36(2), 277-279.
- [29] Hernangómez-Pérez, D., Martín López, S., Rodríguez Barrios, F., Corredera Guillén, P., González Herráez, M., & Ania Castañón, J. D. (2010). Sensado óptico distribuido Brillouin asistido por amplificación Raman de primer orden.
- [30] Kurashima, T., Horiguchi, T., Izumita, H., Furukawa, S., & Koyamada, Y. (1993). Brillouin optical-fiber time domain reflectometry. *IEICE Transactions on Communications*, 76(4), 382-390.
- [31] Ohno, H., Naruse, H., Kihara, M., & Shimada, A. (2001). Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor. *Optical Fiber Technology*, 7(1), 45-64.
- [32] Xiaofei, Z., Wenjie, H., Qing, Z., Yanxin, S., Xianwei, M., & Yongwen, H. (2011). Development of optical fiber strain monitoring system based on BOTDR. *Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2011 10th International Conference on*, 4. pp. 38-41.
- [33] Garcus, D., Gogolla, T., Krebber, K., & Schliep, F. (1997). Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis for distributed temperature and strain measurements. *Lightwave Technology, Journal of*, 15(4), 654-662.
- [34] Bernini, R., Minardo, A., & Zeni, L. (2012). Distributed sensing at centimeter-scale spatial resolution by BOFDA: Measurements and signal processing. *Photonics Journal, IEEE*, 4(1), 48-56.



- [35] Guan, B. O., Tam, H. Y., Ho, S. L., Chung, W. H., & Dong, X. Y. (2000). Simultaneous strain and temperature measurement using a single fibre Bragg grating. *Electronics Letters*, 36(12), 1018-1019.



ANEXO II





A.II TABLA ESTADO DEL ARTE

	Modelo	Rango Temperatura	Resolución Temperatura	Rango Deformación	Resolución Deformación	Longitud de Sensado	Resolución Espacial	Rango Longitud de Onda	Resolución Longitud de Onda	Rango Dinámico	Frecuencia de Muestreo	Fabricante	Precio	
FBG	Temperatura	TC-PROBE	-20 - 110 °C	0,1 °C	-	-	-	-	-	-	-	FBGS	-	
		TC-03	0 - 200 °C	0,1 °C	-	-	-	-	-	-	-	-	FBGS	-
		FS 6300	-20 - 80	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	FiberSensing	≈250 €
		Os 4100	-40 - 120	28,9 pm/C	-	-	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-
		Os 4200	-40 - 250	10 pm/C	-	-	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-
		Os 4300	-40 - 250	10 pm/C	-	-	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-
	Os 4400	-40 - 100	10 pm/C	-	-	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-	
	Deformación	SG-01	-	-	±5%	0,85 με	-	-	-	-	-	-	FBGS	-
		MSS-1700	-	-	-0,05% - 0,5%	1,2	-	-	-	-	-	-	Fiberpro	-
		FS 6200	-	-	±0,25%	1	-	-	-	-	-	-	FiberSensing	≈250 €
		Os 3100	-	-	±0,25%	1,4 pm/με	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-
		Os 3150	-	-	±0,25%	1,4 pm/με	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-
		Os 3155	-	-	±0,25%	1,2 pm/με	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-
		Os 3200	-	-	±0,5%	1,2 pm/με	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-
		Os 3600	-	-	±0,25%	1,2 pm/με	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-
	Os 3610	-	-	±0,5%	1,2 pm/με	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-	
	T/D	Os 1100	-40 - 120	-	±0,5%	1,2 pm/με	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-
		Os 1200	-40 - 120	-	±0,5%	1,2 pm/με	-	-	-	-	-	-	MicronOptics	-
	Interrogadores dinámicos	FBG SCAN 700	-	-	-	-	-	-	1525 - 1565 nm	1 pm	30 dB	2000 Hz	FBGS	-
		FBG SCAN 704D	-	-	-	-	-	-	1525 - 1565 nm	1 pm	30 dB	500 Hz	FBGS	-
		FBG SCAN 708D	-	-	-	-	-	-	1525 - 1565 nm	1 pm	30 dB	500 Hz	FBGS	-
		FBG SCAN 800	-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	1 pm	30 dB	2000 Hz	FBGS	-
		FBG SCAN 804D	-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	1 pm	30 dB	500 Hz	FBGS	-
		FBG SCAN 808D	-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	1 pm	30 dB	500 Hz	FBGS	-
		RTS 150	-	-	-	-	0 - 5 km	0,1 - 10 cm	-	-	-	-	4DSP	-
		IFIS 100	-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	1 pm	>20 dB	200 Hz	Fiberpro	-
		SFI 710	-	-	-	-	-	-	1532 - 1558 nm	<40 pm	>5 dB	40000 Hz	Fiberpro	-
		Fast FBG Interrogator	-	-	-	-	-	-	1040 - 1080 nm	0,4 pm	33 dB	250 Hz	Idil	-
		SI-230	-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	-	25 dB	100, 500, 250 Hz	MicronOptics	-
		SI-730	-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	-	25 dB	1000, 250 Hz	MicronOptics	-
		SI-920	-	-	±1%	2	-	-	1530 - 1560 nm	-	-	500000 Hz	MicronOptics	-
		SM-130	-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	-	25 dB	100, 500, 1000 Hz	MicronOptics	-
		SM-230	-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	-	25 dB	100, 500, 250 Hz	MicronOptics	-
NI-PXIe 4844		-	-	-	-	0 - 10 km	-	-	-	-	100 Hz	National Instruments	17100 €	
FBGuard 850		-	-	-	-	-	-	810 - 860 nm	<1 pm	25 dB	<250 Hz	Safibra	-	
FBGuard 1550		-	-	-	-	-	-	1520 - 1570 nm	<1 pm	25 dB	<250 Hz	Safibra	-	
FBGuard 1550 FAST		-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	<1 pm	25 dB	<3000 Hz	Safibra	-	
SmartScan		-	-	-	-	-	-	1528 - 1568 nm	<1 pm	27 dB	<25000 Hz	SmartFibres	-	
Interrogadores estáticos	FBG SCAN X16	-	-	-	-	-	-	1515 - 1590 nm	1 pm	30 dB	1 Hz	FBGS	-	
	FBG SCAN X08	-	-	-	-	-	-	1515 - 1590 nm	1 pm	30 dB	1 Hz	FBGS	-	
	SFI 700	-	-	-	-	-	-	1510 - 1545 nm	10 pm	>5 dB	10 Hz	Fiberpro	-	
	FS 4200	-	-	-	-	-	-	1500 - 1600 nm	2 pm	>50 dB	1 Hz	FiberSensing	-	
	DSS 4300	-	0,1	±1,5%	1 με	0 - 70 m	1 cm	1525 - 1605 nm	0,02 pm	-	0,3 Hz	Luna	-	
	SI-225	-	-	-	-	-	-	1520 - 1570, 1510 - 1590 nm	10, 1 pm	40, 50 dB	1, 2, 0,5 Hz	MicronOptics	-	
	SI-325	-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	1 pm	50 dB	1 Hz	MicronOptics	-	
	SI-725	-	-	-	-	-	-	1510 - 1590 nm	1 pm	50, 40 dB	2, 0,5 Hz	MicronOptics	-	
	SM-125	-	-	-	-	-	-	1520 - 1570, 1510 - 1590 nm	10, 1, 2,5 pm	40, 50, 30 dB	1, 2, 5 Hz	MicronOptics	-	
	SM-225	-	-	-	-	-	-	1520 - 1570, 1510 - 1590 nm	10, 1 pm	40, 50 dB	1, 2, 0,5 Hz	MicronOptics	-	
SmartScope	-	-	-	-	-	-	1528 - 1568 nm	<1 pm	27 dB	5 Hz	SmartFibres	-		



	Modelo	Rango Temperatura	Resolución Temperatura	Rango Deformación	Resolución Deformación	Longitud de Sensado	Resolución Espacial	Rango Longitud de Onda	Resolución Longitud de Onda	Rango Dinámico	Frecuencia de Muestreo	Fabricante	Precio	
Raman	Sentinel DTS	-	<0,01	-	-	0 - 30 km	1 m	-	-	-	-	Sensornet	-	
	Halo DTS	-	0,05	-	-	0 - 4 km	2 m	-	-	-	-	Sensornet	-	
	Oryx DTS	-	0,1	-	-	0 - 15 km	1 m	-	-	-	-	Sensornet	-	
	Astra	-	1	-	-	0 - 15 km	1 m	-	-	-	-	Sensortran	-	
	Gemini	-	1	-	-	0 - 10 km	1 m	-	-	-	-	Sensortran	-	
	Centaurus	-	1	-	-	0 - 5 km	1 m	-	-	-	-	Sensortran	-	
	Ultima 200	-	0,01	-	-	0 - 35 km	2 m	-	-	-	-	Silixa	-	
	Ultima 200 SM	-	0,01	-	-	0 - 35 km	2 m	-	-	-	-	Silixa	-	
	Ultima 25	-	0,01	-	-	0 - 5 km	25 cm	-	-	-	-	Silixa	-	
	Ultima 100	-	0,01	-	-	0 - 10 km	1m	-	-	-	-	Silixa	-	
Ultima S	-	0,01	-	-	0 - 5 km	25 cm	-	-	-	-	Silixa	67278 €		
BOTDA		NBX 6020A	-	0,35	-3% - 4%	7,5	0 - 10 km	2 cm	1550 ± 2 nm	-	<3 dB	-	Neubrex	-
		NBX 6050	-	0,35	-3% - 4%	7,5	0 - 25 km	5 cm	1550 ± 2 nm	-	<6 dB	-	Neubrex	-
		NBX 6050PM	-	0,35	-3% - 4%	7,5	0 - 25 km	5 cm	1550 ± 2 nm	-	<7 dB	-	Neubrex	-
		NBX 6055	-	0,3	-3% - 4%	7,5	0 - 25 km	5 cm	1550 ± 2 nm	-	<6 dB	-	Neubrex	-
	BOTDR	NBX 6065	-	0,75	-3% - 4%	15	0 - 25 km	20 cm	1550 ± 2 nm	-	<10 dB	-	Neubrex	-
	COTDR	NBX 7000	-	0,35, 0,05	-3% - 4%, -1,5% - 2%	7,5, 0,5	0 - 25 km	5 cm	1550 ± 2, 1530 - 1560 nm	-	<6 dB	-	Neubrex	-
		NBX 7020	-	0,35, 0,05	-3% - 4%, -1,5% - 2%	7,5, 0,5	0 - 25 km	2 cm	1550 ± 2, 1530 - 1560 nm	-	<6 dB	-	Neubrex	-
		DITEST DSM	-	-	±2%	25	0 - 10 km	2 m	1550 nm	-	<6 dB	1 Hz	Omnisens	-
		DITEST STA-R	-	0,1	±3%	2	0 - 50 km	1 m	1550 nm	-	<20 dB	-	Omnisens	-
BOTDR		DSTS	-	0,1	-3% - 4%	2	0 - 100 km	1 , 0,1 m	1550 nm	-	30, 25 dB	1 Hz	OZOptics	-
BOTDR		AV 6419	-	-	±1,5%	10 - 50 με	0 - 80 km	1 m	1550 ± 5 nm	-	15 dB	-	CETC	-
		NBX 5000	-	1,5	-3% - 4%	30	0 - 27 km	1 m	1550 ± 2 nm	-	<13 dB	-	Neubrex	-
		DTSS	-	1	-	10	0 - 24 km	-	-	-	-	-	Sensornet	-
	COTDR	AQ8602	-	-	±3%	0,01, 0,005	0 - 80, 0 - 55 km	2, 1 m	1550 ± 20 nm	-	8, 4 dB	-	Yokogawa	-
BOFDA	ftB 2505	-	<0,1	±3%	2 με	0 - 25 km	0,5 m	-	-	>10 dB	-	fibrisTerre	-	



ANEXO III





A.III ESTUDIO ECONÓMICO

En el caso del presente proyecto, no se trata de realizar una inversión para obtener beneficios, sino de realizar una inversión para solventar un problema. Dentro de este marco, se trata de encontrar una solución positiva con la menor inversión posible. En el Apartado 3.2 de la Memoria del presente proyecto, se ha realizado una comparativa técnica de las distintas soluciones posibles, aquí se presenta una comparativa económica de estas soluciones.

Se ha realizado una comparativa económica entre las tecnologías de FBG y de Brillouin, ya que la tecnología basada en Raman se descarta por la imposibilidad de medir deformaciones.

Debido a que las tecnologías FBG y Brillouin realizan tipos de medida diferentes (las FBG realizan medidas cuasi-distribuidas mientras que la tecnología Brillouin es totalmente distribuida), se deben asumir ciertas consideraciones antes de poder compararlas.

La primera consideración aparece en el ámbito de la resolución espacial (longitud mínima a la que el sensor es capaz de detectar un cambio de temperatura o deformación), en el caso de los sistemas basados en Brillouin es fija y puede llegar al metro, mientras que en los sistemas basados en FBG depende de la distancia de separación entre sensores.

La segunda consideración es que el sistema basado en FBG necesita de un interrogador cada 10 km, mientras que el sistema basado en Brillouin necesita de un único sistema DTSS (Distributed Temperature and Strain Sensor) para 100 km.

En el primer caso estudiado, la distancia a monitorizar es de 100 km, con una distancia entre parejas de sensores para el sistema basado en FBG de 2 km:

Tecnología FBG		Tecnología Brillouin	
Dispositivo	Precio Unitario (orientativos)	Dispositivo	Precio Unitario (orientativo)
Interrogador	20.000 €	DTSS	70.000 €
Sensor T/D	250 €		

Tabla 9. Precios FBG y Brillouin.

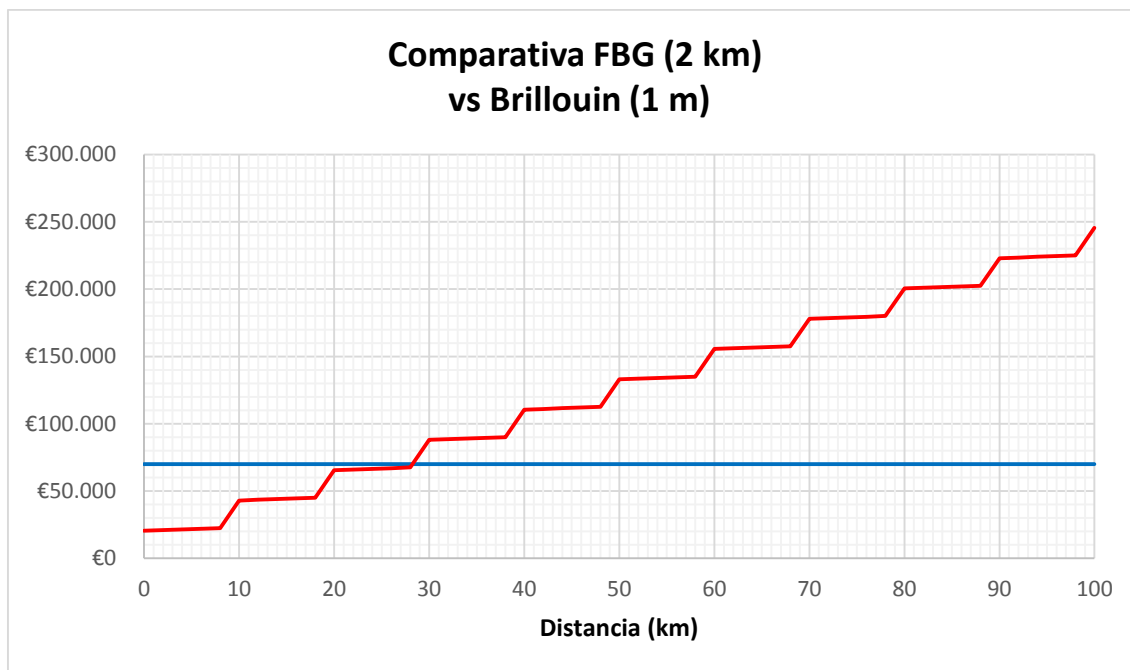


Figura 33. Gráfica FBG (2 km) vs Brillouin (1 m).

De la gráfica se obtiene que a partir de los 30 km de distancia de medida, el sistema basado en Brillouin es más rentable que el sistema basado en FBG.

Se podría pensar en plantear un caso en el que las dos tecnologías tuvieran la misma resolución espacial de un metro, la mínima permitida por el sistema basado en Brillouin, aunque, como se estudió en el Apartado 4.1.2 de la Memoria, el número máximo de puntos de medida que pueden ser colocados en un único interrogador FBG es de 11, por lo tanto, para conseguir 1 m de resolución espacial, se necesitaría colocar un interrogador de FBG cada 11 m. Para este caso, se ha realizado la comparativa:

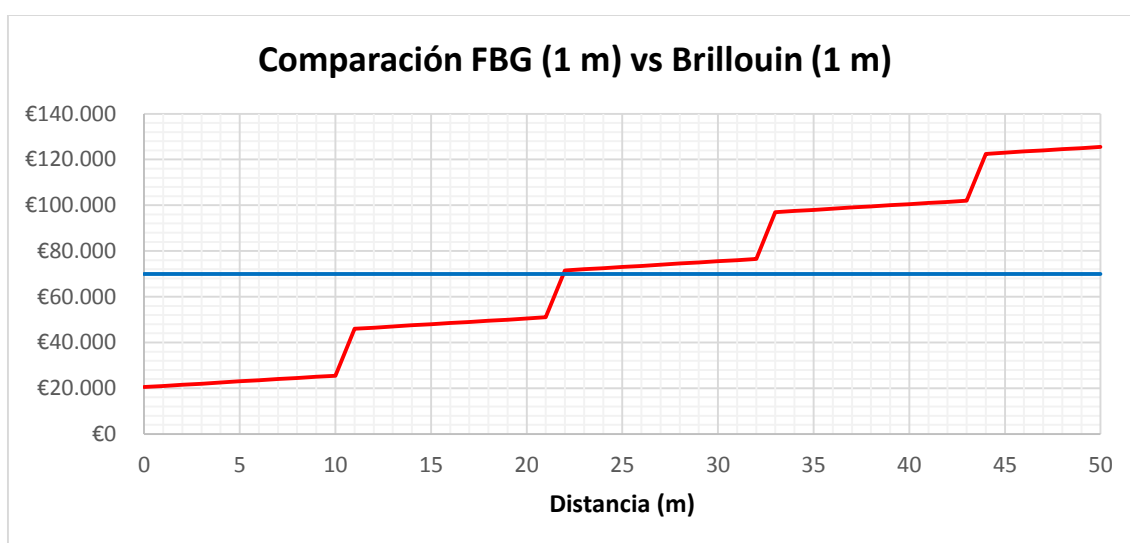


Figura 34. Gráfica FBG (1 m) vs Brillouin (1 m).



Se aprecia que a partir de los 22 m, el sistema basado en FBG es menos rentable.

Se puede concluir que para distancias de medida medias-largas, el sistema basado en Brillouin es más rentable, mientras que el sistema basado en FBG es más indicado para distancias cortas-medias, siempre que los requisitos de resolución espacial no sean muy exigentes.





ANEXO IV





A.IV CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

A.IV.1 Conversión Longitud de Onda – Medida Física

Las ecuaciones que rigen la conversión de longitud de onda a medidas físicas (temperatura y deformación) en los sensores vienen dadas por pruebas experimentales realizadas por los propios fabricantes de los sensores.

- Deformación:

$$\mu\varepsilon = 901,42 \times \Delta\lambda \quad (\text{A.1})$$

donde $\mu\varepsilon$ es la deformación inducida y $\Delta\lambda$ la variación de longitud de onda medida.

- Temperatura:

$$T = -13,6 \times \Delta\lambda^2 + 101,1 \times \Delta\lambda + T_0 \quad (\text{A.2})$$

donde T es la temperatura, T_0 la temperatura de referencia y $\Delta\lambda$ la variación de longitud de onda medida.

Para convertir los valores de longitud de onda en medidas físicas solo es necesario aplicar las ecuaciones descritas.

A.IV.2 Compensación

Para realizar la compensación se realizaron los siguientes pasos matemáticos:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial L} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \right) \Delta L + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T; \quad (\text{A.3})$$

$$\Delta\lambda_i = k_{\mu\varepsilon i} \Delta\varepsilon + k_{T_i} \Delta T \quad i = 1,2 \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} k_{\varepsilon 1} &= 0; k_{T_1} = 0,00976 \\ k_{\varepsilon 2} &= 0,00110936; k_{T_2} = 0,02691 \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$



$$\begin{aligned}\Delta\lambda_1 &= k_{\mu\varepsilon 1}\Delta\mu\varepsilon + k_{T1}\Delta T \quad \times \quad -k_{T2}/k_{T1} \\ &+ \\ \Delta\lambda_2 &= k_{\mu\varepsilon 2}\Delta\mu\varepsilon + k_{T2}\Delta T\end{aligned}\tag{A.6}$$

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_1 &= 0,00976 \times \Delta T \quad \times \quad -2,7572 \\ &+ \\ \Delta\lambda_2 &= 0,00110936 \times \Delta\mu\varepsilon + 0,02691 \times \Delta T\end{aligned}\tag{A.7}$$

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_2 - 2,7572 \times \Delta\lambda_1 &= 0,00110936 \times \Delta\mu\varepsilon \\ \Delta\mu\varepsilon &= \frac{\Delta\lambda_2 - 2,7572 \times \Delta\lambda_1}{0,00110936}\end{aligned}\tag{A.8}$$

De esta manera obtenemos la deformación compensada con la temperatura.



ANEXO V





A.V PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN

A.V.1 Pruebas de concepto en laboratorio

La planificación y programación temporal de las tareas llevadas a cabo por el Grupo de Investigación (GI) formado por el Ingeniero 1 y el Ingeniero 2 a lo largo de los cuatro meses de duración del desarrollo de las pruebas de concepto en laboratorio se detallan a continuación:

- ◆ **TAREA T01** **Gestión de los Ensayos de Laboratorio** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 16 semanas
Equipamiento necesario: Equipamiento Informático
Descripción: Actividades de comunicación entre GI y empresa colaboradora para la gestión de la obtención del equipamiento necesario del sistema de medida.
Hitos y Resultados previsibles:
· Préstamo de equipamiento de la empresa FiberSensing por parte de ADIF
- ◆ **TAREA T02** **Recepción de equipamiento** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 3 semanas
Equipamiento necesario: Material de laboratorio + Equipamiento de FiberSensing (Interrogador + Sensores FBGs)
Descripción: Recepción de los equipos de FiberSensing enviados por ADIF, familiarización con los mismos a través de sus manuales, y realización de pruebas y ensayos de comprobación para la verificación de su correcto funcionamiento.
Hitos y Resultados previsibles:
· Recepción y verificación de equipamiento
- ◆ **TAREA T03** **Montaje del Sistema de Medida** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 4 semanas
Equipamiento necesario: Material de laboratorio + Equipamiento de FiberSensing (Interrogador + Sensores FBGs)
Descripción: Montaje del sistema de medida consistente en el Interrogador más la red de sensores FBGs basado en el equipamiento de FiberSensing. Se contemplan dos montajes: un primer montaje en laboratorio y un segundo montaje al aire libre (o planta externa).
Hitos y Resultados previsibles:
· Sistema de medida de tensión y temperatura basado en sensores FBGs
- ◆ **TAREA T04** **Realización de medidas de tensión y temperatura** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 5 semanas
Equipamiento necesario: Material de laboratorio + Equipamiento de FiberSensing (Interrogador + Sensores FBGs)
Descripción: Una vez instalado el montaje del sistema de la red de sensores se llevará a cabo la medida de las magnitudes de tensión y temperatura, tanto en laboratorio como en planta externa. Dichas medidas habrán de ser validadas y verificadas.
Hitos y Resultados previsibles:
· Medidas correctas de tensión y temperatura basadas en sensores FBGs



- ◆ **TAREA T05** **Correlación de medidas con detección de arena acumulada y arena eólica** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 3 semanas
Equipamiento necesario: Material de laboratorio + Equipamiento de FiberSensing (Interrogador + Sensores FBGs)
Descripción: A partir del análisis y correlación de las medidas de tensión y temperatura a lo largo de toda la red de sensores se realizará la estimación para la detección de arena acumulada y eólica. Dichas medidas habrán de ser validadas y verificadas.
Hitos y Resultados previsibles:
· Detección de arena acumulada y arena eólica mediante sensores FBGs
- ◆ **TAREA T06** **Análisis de propuesta para la optimización del montaje** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 3 semanas
Equipamiento necesario: Equipamiento informático
Descripción: En base al conocimiento adquirido con los ensayos de laboratorio, se llevará a cabo una propuesta para la mejora del montaje teniendo en cuenta los condicionantes de instalación, así como los resultados obtenidos. Asimismo, se contempla la posibilidad del diseño de un sensor FBG a medida para la aplicación objeto.
Hitos y Resultados previsibles:
· Desarrollo de sensor a medida
- ◆ **TAREA T07** **Elaboración del Informe Final de Ensayos de Laboratorio** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 4 semanas
Equipamiento necesario: Equipamiento informático
Descripción: Elaboración de la documentación relativa a los Ensayos de Laboratorio que engloba tanto el Informe Final como la redacción de posibles patentes a las que dé lugar el trabajo desarrollado.
Hitos y Resultados previsibles:
· Elaboración de Informe Final
· Patentes (si procede)

A.V.2 Pruebas de campo

La planificación y programación temporal de las tareas llevadas a cabo por el Grupo de Investigación (GI) formado por el Ingeniero 1 y el Ingeniero 2 a lo largo de los cuatro meses de duración del desarrollo de las pruebas de campo se detallan a continuación:

- ◆ **TAREA T01** **Gestión de los Ensayos de Campo** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 16 semanas
Equipamiento necesario: Equipamiento Informático
Descripción: Actividades de comunicación entre GI y empresa colaboradora para la gestión de la obtención del equipamiento necesario del sistema de medida.
Hitos y Resultados previsibles:
· Préstamo de equipamiento de la empresa FiberSensing por parte de ADIF



- ◆ **TAREA T02** **Recepción de equipamiento** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 4 semanas
Equipamiento necesario: Material de laboratorio + Equipamiento de FiberSensing (Interrogador + Sensores FBGs)
Descripción: Recepción de los equipos de FiberSensing enviados por ADIF, familiarización con los mismos a través de sus manuales, y realización de pruebas y ensayos de comprobación para la verificación de su correcto funcionamiento.
Hitos y Resultados previsibles:
· Recepción y verificación de equipamiento
- ◆ **TAREA T03** **Montaje del Sistema de Medida en campo** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 1 semana
Equipamiento necesario: Material de montaje + Equipamiento de FiberSensing (Interrogador + Sensores FBGs)
Descripción: Desplazamiento al Campo de pruebas, montaje del sistema de medida consistente en el Interrogador más la red de sensores FBGs basado en el equipamiento de FiberSensing y comprobación del correcto funcionamiento.
Hitos y Resultados previsibles:
· Sistema de medida de tensión y temperatura basado en sensores FBGs en campo
- ◆ **TAREA T04** **Realización de medidas de tensión y temperatura** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 3 semanas
Equipamiento necesario: Equipamiento de FiberSensing (Interrogador + Sensores FBGs)
Descripción: Una vez instalado el montaje del sistema de la red de sensores se llevará a cabo la medida de las magnitudes de tensión y temperatura en campo. Dichas medidas habrán de ser validadas y verificadas.
Hitos y Resultados previsibles:
· Medidas correctas de tensión y temperatura basadas en sensores FBGs
- ◆ **TAREA T05** **Correlación de medidas con detección de arena acumulada y arena eólica** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 4 semanas
Equipamiento necesario: Material de laboratorio + Equipamiento de FiberSensing (Interrogador + Sensores FBGs)
Descripción: A partir del análisis y correlación de las medidas de tensión y temperatura a lo largo de toda la red de sensores se realizará la estimación para la detección de arena acumulada y eólica. Dichas medidas habrán de ser validadas y verificadas.
Hitos y Resultados previsibles:
· Detección de arena acumulada y arena eólica mediante sensores FBGs
- ◆ **TAREA T07** **Elaboración del Informe Final de Ensayos de Laboratorio** Responsable: Ingeniero 1
Centro ejecutor: GI Participantes: Ingeniero 1, Ingeniero 2
Duración: 4 semanas
Equipamiento necesario: Equipamiento informático
Descripción: Elaboración de la documentación relativa a los Ensayos de Campo que engloba tanto el Informe Final como la redacción de posibles patentes a las que dé lugar el trabajo desarrollado.
Hitos y Resultados previsibles:
· Elaboración de Informe Final
· Patentes (si procede)





ANEXO VI





A.VI DATASHEET

A.VI.1 Hoja de calibración del sensor de deformación

Esta es la hoja técnica entregada por el fabricante de los sensores, Fiber Sensing, en la cual se encuentran los detalles de la calibración del sensor de deformación realizada por ellos mismos. A partir de los datos que aparecen en esta hoja se puede realizar la conversión de variaciones de longitud de onda a medidas de deformación ($\mu\epsilon$).



FiberSensing bringing light to measurement

**SURFACE STRAIN SENSOR
CALIBRATION SHEET**

FS 6300

General Information

Type	FS 6300 - Surface Strain Sensor
Part Number	006 230 110 302-ST
Serial Number	046 840 615 978-E
FBG Name Id	B1435176

Technical Information

CWL (nm) @ room temperature	1554.303
1 st order sensitivity, S ₁ (μS/nm)	901.42
Maximum FOS error (%)	2.0

S = S₁*x = 901.42*x

Legend: S - Strain (μS)
x - Wavelength Shift (nm)
S₁ - 1st order sensitivity (μS/nm)

Load (μS)	Wavelength Shift (nm)
0.00	0.000
-0.02	-0.001
59.50	0.062
119.05	0.122
178.59	0.179
238.10	0.242
297.61	0.307
357.15	0.375
416.65	0.442
476.18	0.510
535.73	0.578
595.24	0.647
654.80	0.716
714.31	0.785
773.81	0.856
833.33	0.928
892.84	1.002
952.39	1.078
1011.87	1.157

CERTIFICATION SHEET

Reference (μS)	Reference (μS)	Tolerance (μS)	Maximum Error (μS)
395.8	379.0	+/- 50	-32.4
931.5	956.9		
47.0	41.9		
128.0	119.0		
803.0	835.4		

Sensor installation guide available for download in www.fibersensing.com website.

Tested by Miguel Monteiro @ 2014.09.11 Technical Supervisor *Ricardo Vial*

FiberSensing - Sistemas Avanzados de Monitorización, S.A. T +351 229 613 010 F +351 229 613 020 www.fibersensing.com info@fibersensing.com



A.VI.2 Hoja de calibración del sensor de temperatura

Esta es la hoja técnica entregada por el fabricante de los sensores, Fiber Sensing, en la cual se encuentran los detalles de la calibración del sensor de temperatura realizada por ellos mismos. A partir de los datos que aparecen en esta hoja se puede realizar la conversión de variaciones de longitud de onda a medidas de temperatura (°C).



FiberSensing

bringing light to measurement

**EMBEDDED TEMPERATURE SENSOR
CALIBRATION SHEET**

FS 6300

General Information

Type	FS 6300 - Embedded Temperature Sensor Ø3mm
Part Number	006 350 110 302
Serial Number	046 840 615 977-H
FBG Name Id	W34_M58

Technical Information

Reference Wavelength, CWL (nm) @ 30 °C	1573.919
Zero order sensitivity, S ₀ (°C)	30.0
1 st order sensitivity, S ₁ (°C/nm)	101.1
2 nd order sensitivity, S ₂ (°C/nm ²)	-13.6
Maximum hysteresis error (%)	0.2
Maximum FOS error (%)	0.4

T = S₂*x²+S₁*x+S₀ = -13.6*x²+101.1*x+30

Legend: T - Temperature (°C)
x - Wavelength Shift (nm)
S₀ - Reference Temperature (°C)

Temperature (°C)	Wavelength Shift (nm)
30.6	0.008
40.6	0.107
50.5	0.210
70.9	0.426
60.8	0.318
45.8	0.161
20.5	-0.093
0.0	-0.286
-25.6	-0.513
-10.4	-0.381
10.1	-0.196
30.3	0.003

CERTIFICATION SHEET

Reference Temperature (°C)
5, 25, 45

Calibration Tolerance (°C)
0.5

Maximum Error (°C)
0.21

Sensor installation guide available for download in www.fibersensing.com website.

Tested by Tiago @ 2014.09.09

Technical Supervisor *Ricardo Vidal*

FiberSensing - Sistemas Avanzados de Monitorización, S.A. T. +351 229 613 010 F. +351 229 613 020 www.fibersensing.com info@fibersensing.com



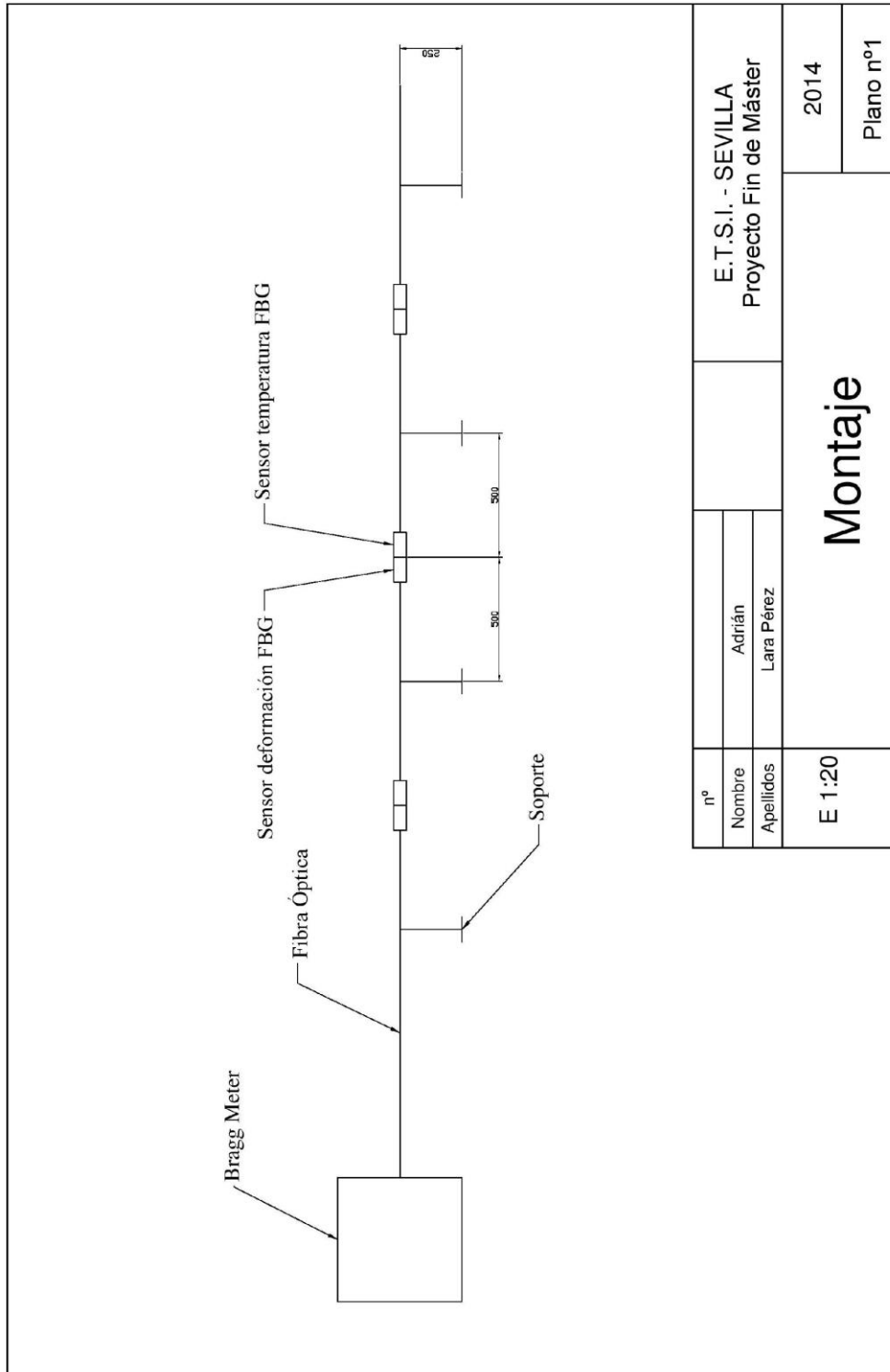
Documento 2 PLANOS

Desarrollo de un sistema de monitorización y/o
detección de arena acumulada y arena eólica en
vías de tren de altas prestaciones mediante
sensores basados en fibra óptica

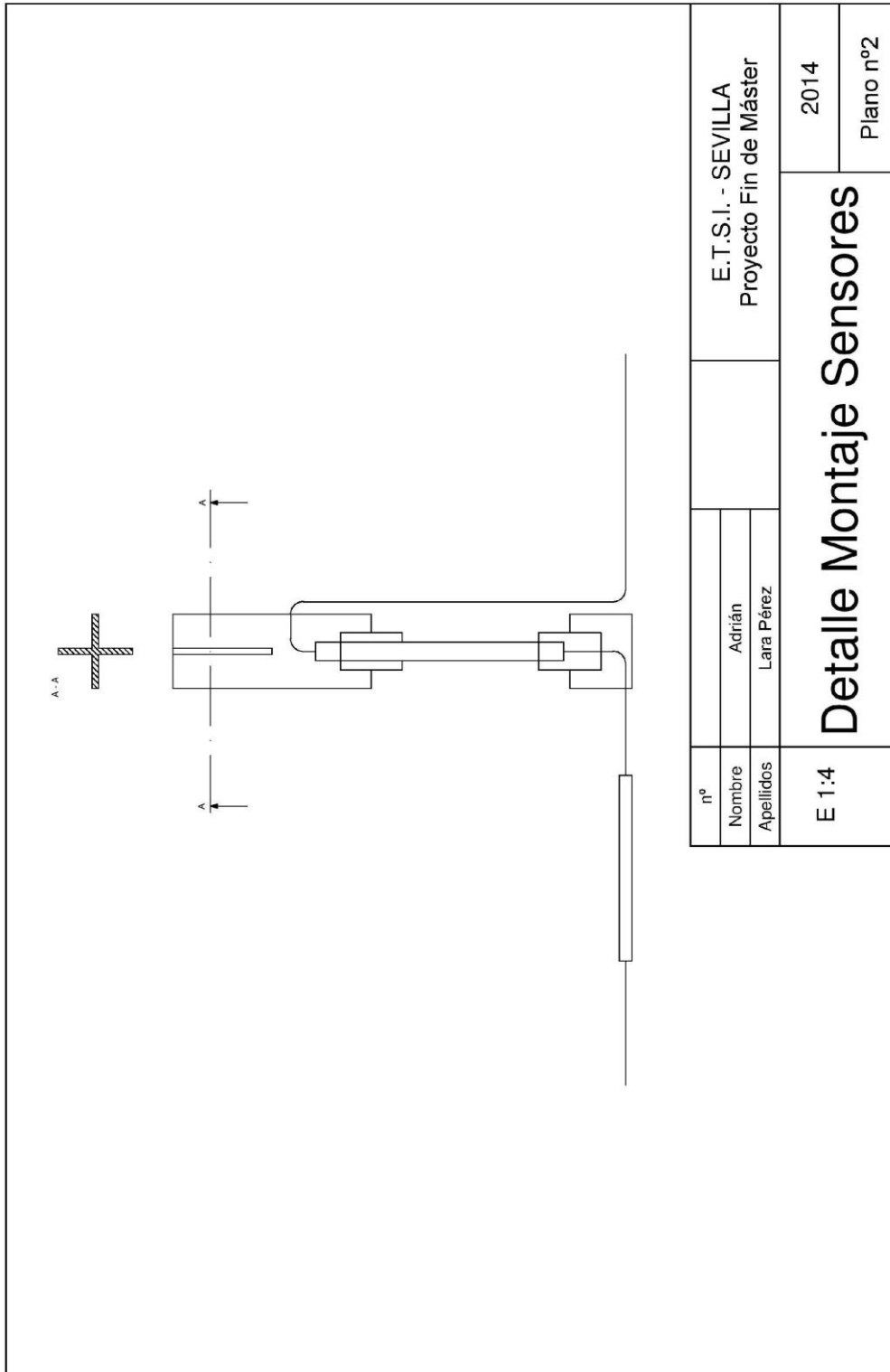
Adrián Lara Pérez

Trabajo Fin de Máster





nº	E.T.S.I. - SEVILLA	
Nombre	Proyecto Fin de Máster	
Apellidos	Adrián	
	Lara Pérez	
E 1:20	Montaje	
	2014	
	Plano nº1	





Documento 3 PLIEGO DE CONDICIONES

Desarrollo de un sistema de monitorización y/o
detección de arena acumulada y arena eólica en
vías de tren de altas prestaciones mediante
sensores basados en fibra óptica

Adrián Lara Pérez
Trabajo Fin de Máster





CAPÍTULO I





1 CONDICIONES GENERALES

El objeto del presente proyecto es el desarrollo de un Sistema de Medida de arena acumulada y arena eólica en vías de tren de altas prestaciones mediante sensores basados en fibra óptica. El Sistema de Medida se conforma de un Aparato de Medida y un Método de Medida. El Aparato de Medida consta de un interrogador de redes de Bragg, sensores de deformación de redes de Bragg, sensores de temperatura de redes de Bragg y una fibra óptica. El interrogador emite una luz de espectro ancho a través de la fibra que es reflejada por las redes de Bragg a distintas frecuencias. Esta frecuencia depende de las condiciones ambientales (temperatura y deformación). Cuando la luz reflejada vuelve al interrogador, identifica cada sensor por la frecuencia reflejada y traduce la variación en la frecuencia con cambios de temperatura o deformación. El Método de Medida se basa en la comparación de las lecturas de parejas de sensores de temperatura-deformación respecto a sus adyacentes y su respuesta en el tiempo. Si hay variación en la lectura del sensor de temperatura, se está produciendo el fenómeno de arena acumulada, si, por el contrario, se produce una variación en la lectura del sensor de deformación, se está produciendo el fenómeno de arena eólica.





CAPÍTULO II





2 ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS

2.1 Equipos y dispositivos

Los equipos necesarios para la realización del presente proyecto se dividen en:

- Interrogador
- Sensores
- Fibra óptica

2.1.1 Interrogador

FS4200 Portable BraggMeter de Fiber Sensing

El equipo BraggMeter FS4200 es una unidad de medida específicamente diseñada para interrogar sensores basados en redes de difracción de Bragg.

Emplea la contrastada tecnología de escaneo por barrido continuo de láser. Incluye el método de rastreo de longitud de onda de referencia del NIST, que proporciona una calibración continua para asegurar la precisión en operaciones de larga duración. Su alto rango dinámico y potencia de salida permiten altas resoluciones para fibras largas y conexiones con pérdidas.

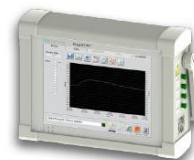


FiberSensing bringing light to measurement

FS4200 • PORTABLE BraggMETER
MULTIPURPOSE MEASUREMENT UNIT FOR FBG SENSORS

BraggMETER

- : fiber optic technology
- : up to 3h autonomy
- : possibility of using spare batteries
- : high dynamic range
- : 12" touch screen
- : intuitive user interface
- : software with full data logger capability
- : optical spectrum analyzer



OVERVIEW

The FS4200 Portable BraggMETER is a measurement unit specifically designed to interrogate Fiber Bragg Grating (FBG) based sensors on field.

BraggMETER measurement units employ proven continuous swept laser scanning technology. They include a NIST traceable wavelength reference that provides continuous calibration to ensure system accuracy over long term operation. The high dynamic range and output power allow high resolution to be attained even for long fiber leads and lossy connections.

CHARACTERISTICS

- : **robustness**
24/7 operation ensured by clever design, careful selection of components (electronic, optical, mechanical) and compact assembling.
- : **high interrogation capacity**
broadband tuning range and 4 parallel optical channels allowing the simultaneous measurement of a large number of sensors.
- : **iLog software**
full data logging capacity with an intuitive graphical user interface for data saving, managing and exporting, optical spectrum analysis and sensor configuration.
- : **portability**
true portability thanks to battery operation and rugged carrying case optimized for field operation.
- : **autonomy**
long operation time due to optimized design enhanced with the possibility of using spare batteries.

CONTROL

The intuitive and easy-to-use graphical user interface via touchscreen provides the user with datalogging functions for automated sampling and archiving. Configuring sensors is easy and straightforward. Each FiberSensing sensor is provided with a complete calibration sheet, allowing its easy and accurate configuration. The Optical Spectrum Analyzer tool helps to optimize the sensing network in field applications. A high-performance local database manages multiple sensor configurations and large datasets. Acquired data can be exported via USB to analysis tools through Excel™ compatible files.

APPLICATIONS

FiberSensing portable measurement units meet the required reliability and versatility to be used in both laboratory testing and field deployment in Civil, Aeronautics, Energy and R&D.

QUALITY

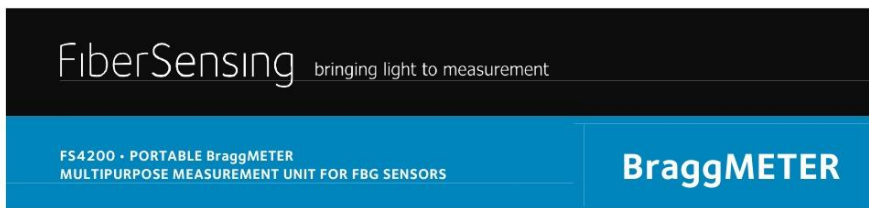
FiberSensing's technical team is fully committed to promote the excellence of its products and services. All processes are strictly controlled from development to production. Measurement units, sensors and other accessories are subjected to high standard performance and endurance tests, being continuously improved. Each product is individually calibrated and checked before shipping. FiberSensing is an ISO 9001:2008 certified company.

13.Feb.2013

measurement units Specifications may change without notice

FiberSensing – Sistemas Avançados de Monitorização, S.A. | T. +351 229 613 010 | F. +351 229 613 020 | www.fibersensing.com | info@fibersensing.com





SPECIFICATIONS

Wavelength Measurement	
range	100 nm (1500 to 1600 nm)
resolution ¹	1.0 pm
absolute accuracy ²	±2.0 pm
sensors per channel	25 (maximum recommended) ³
optical channels ⁴	4
sample rate	1 S/s
optical detection	logarithmic
dynamic range ⁵	> 50 dB
Laser Source	
optical output power ⁶	-3 dBm
linewidth	< 500 MHz
Connectors	
optical	FC/APC or SC/APC
electrical	2.5 x 5.5 DC Socket panel mount
communication	RJ45 Ethernet; USB
Control	
interface	12" touchscreen GUI; Ethernet (TCP/IP); USB
Features	
OSA trace	continuous ⁷ (wavelength, absolute power)
data logging	
functions	sampling; archiving
data format	mysql database; Excel™ compatible files
Environmental	
operation temperature	10 to 40 °C
relative humidity	< 90% at 40 °C
Mechanical	
dimensions (w x h x d)	360 x 275 x 100 mm
mounting	available with handle and transportation bag
enclosure	aluminum
weight	7.3 kg
Power	
voltage	18-20 VDC
nominal consumption ⁸	
charging, not running	45 W
charging, running	90 W
not charging, running	45 W
autonomy ^{6,9}	3 hours

ORDERING INFORMATION

FS4200 – Portable BraggMETER
Quad channel

P/N
004 XXX 001 420

201 – FC/APC
203 – SC/APC

Extra battery pack

P/N
004 200 600 002

¹ σ value from an error histogram with +0.25 M samples

² $\pm(|x_i|+2\sigma)$ value from an error histogram with +8.4 M samples obtained over full temperature range

³ considering sensor wavelengths equally spaced over the operating range and maximum measurement range of ± 2 nm per sensor

⁴ with simultaneous acquisition

⁵ considered as the ratio between the optical power emitted at an optical channel and the minimum detectable optical power reflected by a fiber Bragg grating

⁶ typical value

⁷ full spectrum trace with 0.2 M points acquired over the 100 nm range (5 pm resolution)

⁸ peak consumption may reach 90 W

⁹ with one battery pack. Extra battery packs available upon request

13.Feb.2013



FiberSensing – Sistemas Avançados de Monitorização, S.A. | T. +351 229 613 010 | F. +351 229 613 020 | www.fibersensing.com | info@fibersensing.com

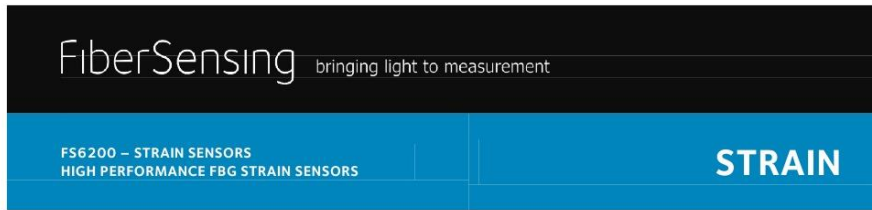




2.1.2 Sensores

FS6200 Strain Sensor de Fiber Sensing

El dispositivo FS6200 es un sensor de deformación basado en redes de difracción de Bragg y se puede configurar con distintos encapsulados y sujeciones.



- : fiber optic technology
- : high resolution
- : polyimide, stainless steel or composite packaging
- : IP68 for embedded and surface sensors
- : long-term reliability



Miniature polyimide, composite, weldable, surface, embedded

OVERVIEW

The FS6200 strain sensors are Fiber Bragg Grating (FBG) based sensors, designed to be bonded to surfaces and materials, spot welded to structures and components, attached or directly cast into concrete wet mix.

Strain sensors are available in the following configurations:

- : Miniature Polyimide Strain Sensor
- : Composite Strain Sensor
- : Weldable Strain Sensor
- : Surface Strain Sensor
- : Surface Long Gage
- : Embedded Strain Sensor
- : Embedded Long Gage

CHARACTERISTICS

- : **robustness**
long-term reliability ensured by innovative sensor design, careful selection of materials and IP68 packaging.
- : **completely passive**
inherent immunity to all electromagnetic effects (EMI, RFI, sparks, etc.) and safe operation in hazardous environments.
- : **high multiplexing capability**
connection of a large number of sensors to a single optical fiber, reducing network and installation complexity.
- : **remote sensing**
large distance between sensors and measurement unit (several kilometers).
- : **compatible with most measurement units**
provided with calibration sheet, allowing easy and accurate configuration.
- : **self-referenced**
based on the measurement of an absolute parameter - the Bragg wavelength - independent of power fluctuations.

APPLICATIONS

FiberSensing strain sensors can be used in several strain measuring applications. They are particularly suited for structural health monitoring in large structures (SHM).

- : Civil Engineering
- : Transportation
- : Energy
- : Aeronautics
- : R&D

QUALITY

FiberSensing's technical team is fully committed to promote the excellence of its products and services. All processes are strictly controlled from development to production. Measurement units, sensors and other accessories are subjected to high standard performance and endurance tests, being continuously improved. Each product is individually calibrated and checked before shipping. FiberSensing is an ISO 9001:2008 certified company.

ACCESSORIES

The implementation of complex sensing networks in large structures is made simpler with FiberSensing accessories. These include cables especially designed to resist harsh environments as in civil engineering, not only during construction, but also during the lifetime of the structure (humidity, corrosion, etc.).

For the installation of FiberSensing FS6200 strain sensors in severe environments, an optional metallic protection cover is available. It must be used in combination with 3 mm armor protection cables.

17-Jan-2012



FiberSensing - Sistemas Avançados de Monitorização, S.A. | T. +351 229 613 010 | F. +351 229 613 020 | www.fibersensing.com | info@fibersensing.com





FiberSensing bringing light to measurement

FS6200 – STRAIN SENSORS
HIGH PERFORMANCE FBG STRAIN SENSORS
STRAIN

SPECIFICATIONS

Sensor	
material	polyimide 1.2 pm/με composite 1.2 pm/με weldable 1.2 pm/με
sensitivity ¹	surface ST 1.5 pm/με surface LG 1.2 pm/με embedded ST 1.5 pm/με embedded LG 1.2 pm/με
measurement range	±2500 με
gauge length	polyimide <10 mm composite 92 mm weldable 25 mm surface ST 107 mm surface LG 1005 mm embedded ST 104 mm embedded LG 1002 mm
resolution ²	1 με
Optical	
central wavelength	1500 to 1600 nm
spectral width (FWHM)	< 0.2 nm
reflectivity	> 65%
side lobe suppression	> 10 dB
Inputs / Outputs	
cable type	Ø 0.9 mm laboratory (hytrel) Ø 3 mm indoor (kevlar) Ø 3 mm outdoor (armor)
cable length	2 m each side (±5 cm)
connectors	FC/APC SC/APC NC (No Connectors)
Environmental	
operation temperature	-20 to 80 °C
protection class	surface IP68 embedded IP68
Mechanical	
materials	polyimide film composite GFRP and polyurethane weldable stainless steel surface stainless steel embedded stainless steel
dimensions	polyimide 40 x 12 x 0.2 mm composite 130 x 20 x 6 mm weldable 45 x 15 x 0.3 mm surface ST 163 x 35 x 20 mm surface LG 1065 x 35 x 20 mm embedded ST 140 x Ø 30 mm embedded LG 1040 x Ø 30 mm
weight	polyimide 1 g composite 21 g weldable 3 g surface ST 122 g surface LG 241 g embedded ST 60 g embedded LG 141 g

ORDERING INFORMATION

P/N		Type ³	WL
006	2XX XXX XXX	YY	Z
			N - 1503.3 nm O - 1509.7 nm K - 1516.1 nm L - 1522.5 nm A - 1528.9 nm B - 1535.1 nm C - 1541.5 nm D - 1547.9 nm E - 1554.3 nm F - 1560.8 nm G - 1567.2 nm H - 1573.8 nm I - 1580.2 nm J - 1586.6 nm M - 1593.0 nm
			ST - Standard Strain LG - Long Gage
			102 - Ø 0.9 mm cable Laboratory 202 - Ø 3 mm cable Indoor 302 - Ø 3 mm cable Outdoor
			110 - FC/APC 130 - SC/APC 100 - NC (No Connectors)
			16 - miniature polyimide 40 mm 17 - composite 100 mm 20 - weldable 50 mm 30 - surface (IP68) 50 - embedded (IP68)

¹ typical values
² for 1 pm resolution in wavelength measurement
³ for embedded and surface sensors only

17.Jan.2012



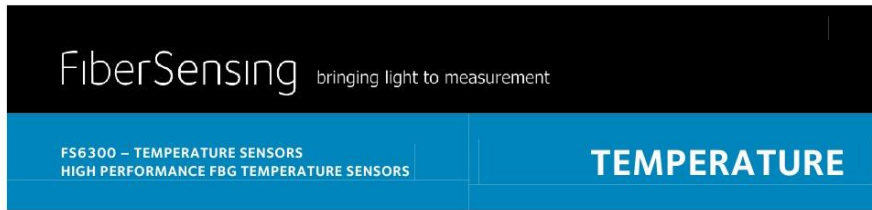
FiberSensing – Sistemas Avançados de Monitorização, S.A. | T. +351 229 613 010 | F. +351 229 613 020 | www.fibersensing.com | info@fibersensing.com





FS6300 Temperature Sensor de Fiber Sensing

El dispositivo FS6300 es un sensor de temperatura basado en redes de difracción de Bragg y se puede configurar con distintos encapsulados y sujeciones.



- : fiber optic technology
- : immunity to strain
- : stainless steel packaging
- : IP68 for embedded sensors
- : long-term reliability



Weldable, embedded

OVERVIEW

The FS6300 temperature sensors are Fiber Bragg Grating (FBG) based sensors, designed to be bonded to surfaces and materials, spot welded to structures and components, attached or directly cast into concrete wet mix.

Temperature sensors are available in the following configurations:

- : Weldable Temperature Sensor
- : Embedded Temperature Sensor

CHARACTERISTICS

- : **robustness**
long-term reliability ensured by innovative sensor design, careful selection of materials and IP68 packaging.
- : **completely passive**
inherent immunity to all electromagnetic effects (EMI, RFI, sparks, etc.) and safe operation in hazardous environments.
- : **high multiplexing capability**
connection of a large number of sensors to a single optical fiber, reducing network and installation complexity.
- : **remote sensing**
large distance between sensors and measurement unit (several kilometers).
- : **compatible with most measurement units**
provided with calibration sheet, allowing easy and accurate configuration.
- : **self-referenced**
based on the measurement of an absolute parameter – the Bragg wavelength – independent of power fluctuations.

APPLICATIONS

FiberSensing temperature sensors can be used in several temperature measuring applications. They are particularly suited for temperature mapping in large structures (SHM).

- : Industry
- : Civil Engineering
- : Energy
- : R&D

QUALITY

FiberSensing's technical team is fully committed to promote the excellence of its products and services. All processes are strictly controlled from development to production. Measurement units, sensors and other accessories are subjected to high standard performance and endurance tests, being continuously improved. Each product is individually calibrated and checked before shipping. FiberSensing is an ISO 9001:2008 certified company.

ACCESSORIES

The implementation of complex sensing networks in large structures is made simpler with FiberSensing accessories. These include cables especially designed to resist harsh environments as in civil engineering, not only during construction, but also during the lifetime of the structure (humidity, corrosion, etc.).

For the installation of weldable temperature sensors in severe environments, an optional metallic protection cover is available.

08.Mar.2013



FiberSensing – Sistemas Avançados de Monitorização, S.A. | T. +351 229 613 010 | F. +351 229 613 020 | www.fibersensing.com | info@fibersensing.com





FiberSensing bringing light to measurement

FS6300 – TEMPERATURE SENSORS
HIGH PERFORMANCE FBG TEMPERATURE SENSORS

TEMPERATURE

SPECIFICATIONS

Sensor	
sensitivity ¹	10 pm/°C
measurement range	-20 to 80 °C
resolution ²	0.1 °C
maximum calib. error	0.5 °C
Optical	
central wavelength	1500 to 1600 nm
spectral width (FWHM)	< 0.2 nm
reflectivity	> 65%
side lobe suppression	> 10 dB
Inputs / Outputs	
cable type	Ø 3 mm indoor (kevlar) Ø 3 mm outdoor (armor)
cable length	2 m each side (±5 cm)
connectors	FC/APC SC/APC NC (No Connectors)
Environmental	
operation temperature	-20 to 80 °C
protection class	embedded IP68
Mechanical	
materials	stainless steel
dimensions	weldable 45 x 15 x 0.6 mm embedded 100 x Ø 10 mm
weight	weldable 5 g embedded 55 g

ORDERING INFORMATION

P/N		WL	
006 3XX XXX XXX		Z	
			N - 1503.3 nm O - 1509.7 nm K - 1516.1 nm L - 1522.5 nm A - 1528.9 nm B - 1535.1 nm C - 1541.5 nm D - 1547.9 nm E - 1554.3 nm F - 1560.8 nm G - 1567.2 nm H - 1573.8 nm I - 1580.2 nm J - 1586.6 nm M - 1593.0 nm
		202 - Ø 3 mm cable Indoor ³ 302 - Ø 3 mm cable Outdoor	
		110 - FC/APC 130 - SC/APC 100 - NC (No Connectors)	
		20 - weldable 50 - embedded (IP68)	

¹typical values

²for 1 pm resolution in wavelength measurement

³only available for weldable sensors

08.Mar.2013



FiberSensing – Sistemas Avançados de Monitorização, S.A. | T. +351 229 613 010 | F. +351 229 613 020 | www.fibersensing.com | info@fibersensing.com





2.1.3 Fibra óptica

SMF-28 Optical Fiber de Corning

Se trata de una fibra óptica monomodo que ha establecido un estándar de rendimiento y valores para una amplia gama de aplicaciones.



Corning® SMF-28® Optical Fiber Product Information



PI1036

Issued: August 2002
Supersedes: April 2002
ISO 9001 Registered

Corning® Single-Mode Optical Fiber

The Standard For Performance

Corning® SMF-28® single-mode optical fiber has set the standard for value and performance for telephony, cable television, submarine, and utility network applications. Widely used in the transmission of voice, data, and/or video services, SMF-28 fiber is manufactured to the most demanding specifications in the industry. SMF-28 fiber meets or exceeds ITU-T Recommendation G.652, TIA/EIA-492CAAA, IEC Publication 60793-2 and GR-20-CORE requirements.

Taking advantage of today's high-capacity, low-cost transmission components developed for the 1310 nm window, SMF-28 fiber features low dispersion and is optimized for use in the 1310 nm wavelength region. SMF-28 fiber also can be used effectively with TDM and WDM systems operating in the 1550 nm wavelength region.

Features And Benefits

- Versatility in 1310 nm and 1550 nm applications
- Enhanced optical properties that optimize transmission performance
- Outstanding geometrical properties for low splice loss and high splice yield
- OVD manufacturing reliability and product consistency
- Optimized for use in loose tube, ribbon, and other common cable design

The Sales Leader

Corning SMF-28 fiber is the world's best selling fiber. In 2001, SMF-28 fiber was deployed in over 45 countries around the world. All types of network providers count on this fiber to support network expansion into the 21st Century.



Protection And Versatility

SMF-28 fiber is protected for long-term performance and reliability by the CPC® coating system. Corning's enhanced, dual acrylate CPC coatings provide excellent fiber protection and are easy to work with. CPC coatings are designed to be mechanically stripped and have an outside diameter of 245 µm. They are optimized for use in many single- and multi-fiber cable designs including loose tube, ribbon, slotted core, and tight buffer cables.

Patented Quality Process

SMF-28 fiber is manufactured using the Outside Vapor Deposition (OVD) process, which produces a totally synthetic ultra-pure fiber. As a result, Corning SMF-28 fiber has consistent geometric properties, high strength, and low attenuation. Corning SMF-28 fiber can be counted on to deliver excellent performance and high reliability, reel after reel. Measurement methods comply with ITU recommendations G.650, IEC 60793-1, and Bellcore GR-20-CORE.

Optical Specifications

Attenuation

Wavelength (nm)	Attenuation* (dB/km)	
	Premium	Standard
1310	≤0.34	≤0.35
1550	≤0.20	≤0.22

*Alternate attenuation values available upon request

Point Discontinuity

No point discontinuity greater than 0.10 dB at either 1310 nm or 1550 nm.

Attenuation at the Water Peak

The attenuation at 1383 ± 3 nm shall not exceed 2.1 dB/km.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 - 1330	1310	0.05
1525 - 1575	1550	0.05

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α.

Attenuation with Bending

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤0.50
50	100	1310	≤0.05
50	100	1550	≤0.10
60	100	1550	≤0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Cable Cutoff Wavelength (λ_{cct})

$$\lambda_{cct} \leq 1260 \text{ nm}$$

Mode-Field Diameter

9.2 ± 0.4 µm at 1310 nm
10.4 ± 0.8 µm at 1550 nm

Dispersion

Zero Dispersion Wavelength (λ₀):
1302 nm ≤ λ₀ ≤ 1322 nm

Zero Dispersion Slope (S₀):
≤ 0.092 ps/(nm²•km)

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ ps/(nm} \cdot \text{km)},$$

for 1200 nm ≤ λ ≤ 1600 nm

λ = Operating Wavelength

Polarization Mode Dispersion

Fiber Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/√km)
PMD Link Value	≤ 0.1*
Maximum Individual Fiber	≤ 0.2

* Complies with IEC 60794-3:2001, section 5.5, Method 1, September 2001.

The PMD link value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as the link quadrature average). This value is used to determine a statistical upper limit for system PMD performance.

Individual PMD values may change when cabled. Corning's fiber specification supports network design requirements for a 0.5 ps/√km maximum PMD.



Environmental Specifications

Environmental Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm/1550 nm (dB/km)
Temperature Dependence -60°C to +85°C*	≤0.05
Temperature-Humidity Cycling -10°C to +85°C*, up to 98% RH	≤0.05
Water Immersion, 23±2°C*	≤0.05
Heat Aging, 85±2°C*	≤0.05

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range

-60°C to +85°C

Dimensional Specifications

Length (km/reel): fiber lengths available up to 50.4*

* Longer spliced lengths available at a premium.

Glass Geometry

Fiber Curl: ≥ 4.0 m radius of curvature
Cladding Diameter: 125.0 ± 0.7 μm
Core-Clad Concentricity: ≤ 0.5 μm
Cladding Non-Circularity: ≤ 1.0%

Defined as: $\left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}}\right] \times 100$

Coating Geometry

Coating Diameter: 245 ± 5 μm
Coating-Cladding Concentricity: <12 μm

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile proof stress ≥ 100 kpsi (0.7 GN/m²)*.

* Higher proof test levels available at a premium.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter: 8.2 μm

Numerical Aperture: 0.14

NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.

Zero Dispersion Wavelength (λ₀): 1313 nm

Zero Dispersion Slope (S₀): 0.086 ps²/(nm²·km)

Refractive Index Difference: 0.36%

Effective Group Index of Refraction,

(N_{eff} @ nominal MFD):

1.4677 at 1310 nm

1.4682 at 1550 nm

Fatigue Resistance Parameter (n_d): 20

Coating Strip Force:

Dry: 0.6 lbs. (3N)

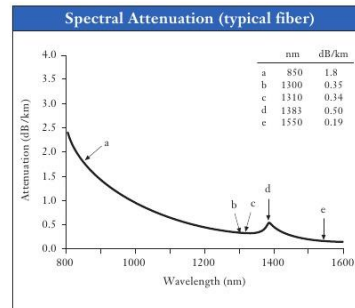
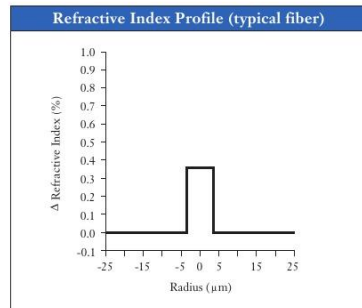
Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)

Rayleigh Backscatter Coefficient

(for 1 ns pulse width):

1310 nm: -77 dB

1550 nm: -82 dB





Ordering Information

To order Corning® SMF-28® fiber, contact your sales representative, or call the Optical Fiber Customer Service Department at **607-248-2000** or **+44-1244-287-437** in Europe. Please specify the following parameters when ordering.

Fiber Type: Corning® SMF-28® Fiber
Fiber Attenuation: dB/km
Fiber Quantity: km
Other: (Requested ship date, etc.)



Corning Incorporated
www.corning.com/opticalfiber

One Riverfront Plaza
Corning, NY 14831
U.S.A.

Phone: 800-525-2524 (U.S. and Canada)
607-786-8125 (International)

Fax: 800-539-3632 (U.S. and Canada)
607-786-8344 (International)

Email: cofic@corning.com

Europe

Phone: 00 800 6620 6621 (U.K., Ireland, Italy, France, Germany, The Netherlands, Spain and Sweden)

+1 607 786 8125 (All other countries)

Fax: +1 607 786 8344

Asia Pacific

Australia
Phone: 1-800-148-690
Fax: 1-800-148-568

Indonesia
Phone: 001-803-015-721-1261
Fax: 001-803-015-721-1262

Malaysia
Phone: 1-800-80-3156
Fax: 1-800-80-3155

Philippines
Phone: 1-800-1-116-0338
Fax: 1-800-1-116-0339

Singapore
Phone: 800-1300-955
Fax: 800-1300-956

Thailand
Phone: 001-800-1-3-721-1263
Fax: 001-800-1-3-721-1264

Latin America

Brazil
Phone: 000817-762-4732
Fax: 000817-762-4996

Mexico
Phone: 001-800-235-1719
Fax: 001-800-339-1472

Venezuela
Phone: 800-1-4418
Fax: 800-1-4419

Greater China

Beijing
Phone: (86) 10-6505-5066
Fax: (86) 10-6505-5077

Hong Kong
Phone: (852) 2807-2723
Fax: (852) 2807-2152

Shanghai
Phone: (86) 21-3222-4668
Fax: (86) 21-6288-1575

Taiwan
Phone: (886) 2-2716-0338
Fax: (886) 2-2716-0339

E-mail: GCCofic@corning.com

Corning, SMF-28 and CPC are registered trademarks of Corning Incorporated, Corning, N.Y.

Any warranty of any nature relating to any Corning optical fiber is only contained in the written agreement between Corning Incorporated and the direct purchaser of such fiber.

©2002, Corning Incorporated



2.2 Materiales y herramientas

Así mismo, durante la ejecución del presente proyecto se hará uso de los materiales necesarios para el manejo e instalación de los distintos equipos previamente mencionados. Estos materiales y herramientas se usarán para cortar, empalmar o conectar la fibra óptica a los distintos dispositivos, así como para fijar la fibra óptica cuando sea necesario.





CAPÍTULO III





3 CONDICIONES DE EJECUCIÓN

El Método de Uso del Sistema de Medida presentado en el CAPÍTULO I, una vez montado el Sistema de Medida tal cómo aparece en el Documento Planos, consta de los siguientes pasos para realizar una correcta medición:

- Cargar la batería del interrogador o BraggMeter.
- Encender el BraggMeter.
- Conectar los sensores a un Canal Óptico del BraggMeter.
- Presionar el botón de “Auto Scan” en la pestaña de “SENSORS”.
- Presionar el botón “Run” en la pestaña de “DISPLAY” o en la de “OSA”.
- Observar las mediciones en la pantalla.

3.1 Conectores BraggMeter

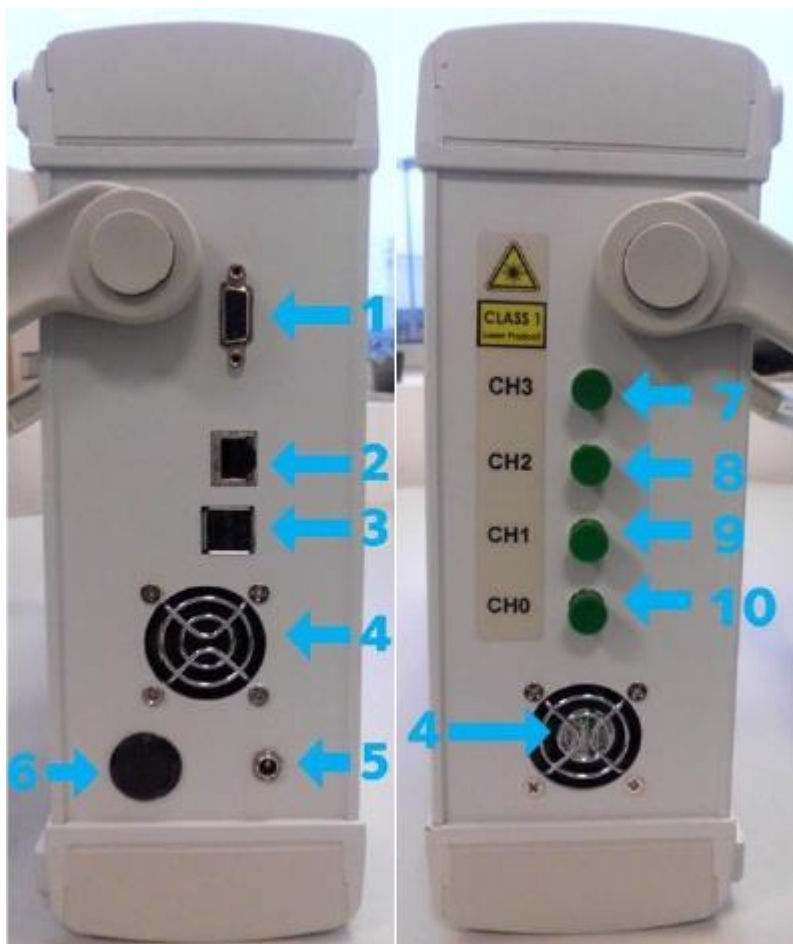


Figura 35. Conectores BraggMeter.
De: Manual BraggMeter, FiberSensing.



1. Conector VGA.
2. Conector LAN.
3. Conectores USB.
4. Ventiladores.
5. Conector de alimentación.
6. Botón de Encendido/Apagado.
7. Conector Canal Óptico 1.
8. Conector Canal Óptico 2.
9. Conector Canal Óptico 3.
10. Conector Canal Óptico 4.

3.2 Display iLog

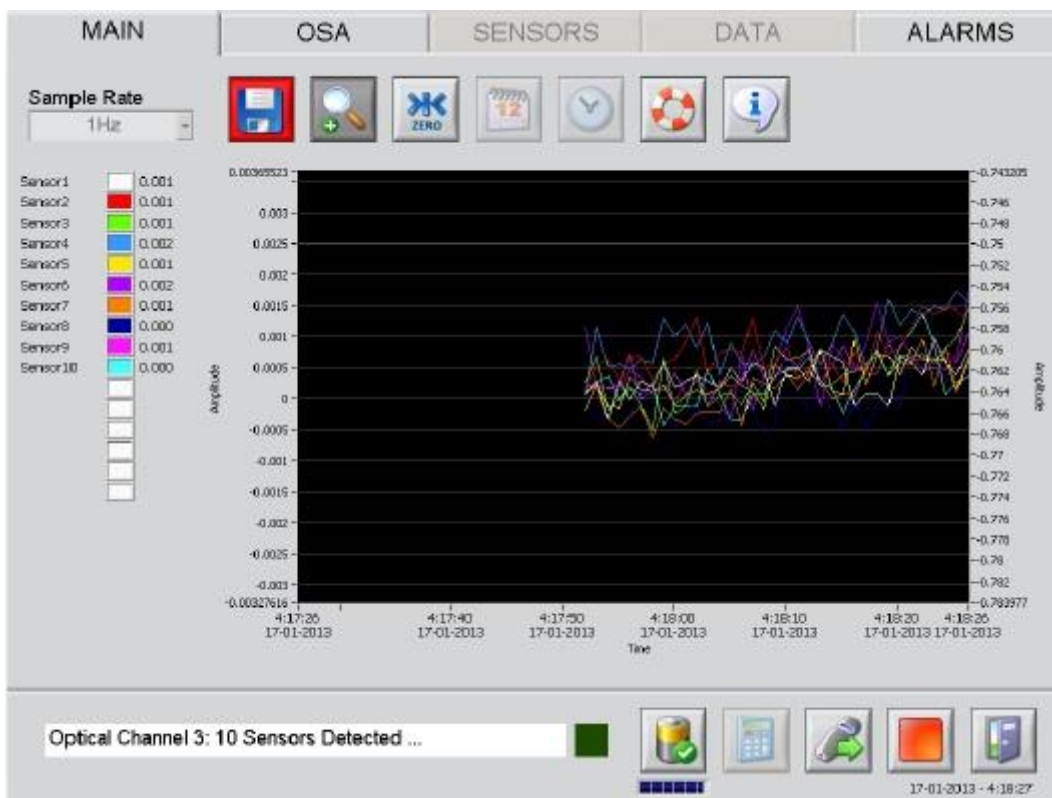


Figura 36. Display iLog.
De: Manual iLog, FiberSensing.



Documento 4

PRESUPUESTO

Desarrollo de un sistema de monitorización y/o
detección de arena acumulada y arena eólica en
vías de tren de altas prestaciones mediante
sensores basados en fibra óptica

Adrián Lara Pérez
Trabajo Fin de Máster





CAPÍTULO I





1 CUADROS DE PRECIO

1.1 Desarrollo del sistema de medida

Cantidad	UD	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
Desarrollo del sistema de medida					30.000,00 €
1000	h	Hora trabajo ingeniero técnico industrial	30,00 €	30.000,00 €	
		Costes indirectos (2%)			600,00 €
		Total partida			30.600,00 €

El importe total de la partida asciende a TREINTA MIL SEICESINTOS euros.

1.2 Pruebas experimentales

Cantidad	UD	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
Pruebas experimentales					4.800,00 €
160	h	Hora trabajo ingeniero técnico industrial	30,00 €	4.800,00 €	
		Costes indirectos (2%)			96,00 €
		Total partida			4.896,00 €

El importe total de la partida ascienda a CUATRO MIL OCHOCIENTOS NOVENTA Y SEIS euros.

1.3 Sistema de medida Laboratorio

Cantidad	UD	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
Sistema de medida Laboratorio					20.591,50 €
1	u	FS6200 - Surface Short Gage	345,00 €	345,00 €	
1	u	FS6300 - Embedded Temperature Sensor	245,00 €	245,00 €	
1	u	FS4200 - Portable Bragg Meter	20.000,00 €	20.000,00 €	
3	m	SMF-28 - Single Mode Fiber	0,50 €	1,50 €	
		Costes indirectos (2%)			411,83 €
		Total partida			21.003,33 €

El importe total de la partida ascienda a VEINTIÚN MIL TRES euros con TREINTA Y TRES céntimos.

1.4 Sistema de medida Campo

Aclarar que el desarrollo de las pruebas de campo no entra dentro del presente proyecto, de manera que lo reflejado en este cuadro de precios es una estimación:



Cantidad	UD	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
Sistema medida Campo					26.400,00 €
10	u	FS6200 - Surface Short Gage	345,00 €	3.450,00 €	
10	u	FS6300 - Embedded Temperature Sensor	245,00 €	2.450,00 €	
1	u	FS4200 - Portable Bragg Meter	20.000,00 €	20.000,00 €	
1000	m	SMF-28 - Single Mode Fiber	0,50 €	500,00 €	
Costes indirectos (2%)					528,00 €
Total partida					26.928,00 €

El importe total de la partida ascienda a VEINTISEIS MIL NOVECIENTOS VEINTIOCHO euros.

1.5 Resumen Presupuesto

Capítulo	Resumen	Euros	%
Capítulo I	Desarrollo del sistema de medida	30.600,00 €	36,68
Capítulo II	Pruebas experimentales	4.896,00 €	5,87
Capítulo III	Sistema de medida Laboratorio	21.003,33 €	25,18
Capítulo IV	Sistema de medida Campo	26.928,00 €	32,28
Total ejecución material		83.427,33 €	
Gastos generales (6%)		5.005,64 €	
Beneficio industrial (4%)		3.337,09 €	
Suma G.G y B.M.		8.342,73 €	
Total ejecución por contrata		91.770,06 €	
IVA (21%)		19.271,71 €	
TOTAL PRESUPUESTO GLOBAL		111.041,78 €	