

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
VALENCIA

Departamento de Comunicaciones



**Diseño de técnicas de interrogación y  
sensores en fibra para el sector de la  
construcción**

TESIS DOCTORAL

Antonio Bueno Martínez

Director: Salvador Sales Maicas  
Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Valencia, mayo de 2012



*A mis padres  
Antonio y María del Carmen  
y a Gracia.*



*“Cuando puedes medir aquello de lo que hablas y expresarlo con números, sabes algo acerca de ello; pero cuando no lo puedes medir, cuando no lo puedes expresar con números, tu conocimiento es pobre e insatisfactorio.”*

William Thomson Kelvin (1824-1907)

Matemático y físico escocés.



# Agradecimientos

Me gustaría agradecer al Dr. Salvador Sales por haber confiado en mí para desarrollar mi tesis doctoral bajo su supervisión en el Grupo de Comunicaciones ópticas y Cuánticas (GCOC). Mi agradecimiento también para mi compañero David Barrera que también supervisó en parte mis actividades, estando siempre disponible para ayudarme cuando ha hecho falta. Mi más sincera gratitud a todos los integrantes del GCOC por su apoyo y colaboración en todo momento y por sus palabras de ánimo y sus consejos, haciendo que la relación con ellos haya trascendido más allá del ámbito profesional, convirtiéndose en muchos casos en una buena amistad.

Mucha otra gente de entidades externas al GCOC ha colaborado para la consecución de este trabajo de tesis. Mención especial para el Dr. Koji Nonaka de la Universidad de Tecnología de Kochi (Japón) por haberme permitido desarrollar su técnica de correlación de pulsos para la aplicación al sensado, y sobre todo por haberme hecho descubrir las ventajas de la colaboración con personas de otras partes del mundo. Me gustaría agradecer también la colaboración de Benjamín Torres en el proyecto de monitorización de estructuras bajo el convenio con la empresa Sacyr-Vallehermoso. Tengo que agradecer también la colaboración y el apoyo prestado por Cristina Gamón y José Manuel Lloris del instituto de investigación AIDICO, y a Isaac Suárez y Rafael Abargues del ICMUV.

Por último, pero más importante de todo, muchas gracias a mis padres Antonio y María del Carmen y a toda mi familia, por su cariño, comprensión y apoyo incondicional en todo momento, y sobre todo en aquellos momentos en los que el ánimo flaqueaba y parecía que no había fuerzas para llegar al final de este camino. Es cierto que la familia no se elige, aunque de todas formas yo no hubiera podido elegir a unos padres ni a unos hermanos mejores. También mi más sentido agradecimiento a Gracia, que aunque ha sido testigo del último tramo de este trabajo de tesis, sin su amor y su apoyo no hubiera sido capaz de llegar a escribir estas líneas.





# Resumen

En esta tesis doctoral se presentan unos dispositivos ópticos capaces de medir varias magnitudes físicas útiles para los ingenieros en el ámbito de la construcción. Estos sensores ópticos son capaces de medir las variaciones de deformación, temperatura y pH en estructuras de ámbito civil tales como puentes, o incluso túneles o diques para monitorizar la salud estructural de las mismas. Así pues, se presentan los sensores de deformación y temperatura basados en FBG desarrollados y calibrados en el Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas (GCOC) del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) y se expone un caso de aplicación real de estos sensores en la construcción de un puente para tráfico rodado construido mediante la técnica de lanzamiento por incrementos sucesivos para la ronda sur metropolitana de Bilbao. También se presentan dos sensores ópticos de pH que utilizan hidrogeles con dos tecnologías diferentes. Uno de estos sensores está basado en la intensidad óptica y el otro en las propiedades frecuenciales de las resonancias en una cavidad Fabry-Pérot en fibra. Para que la monitorización de estos sensores ópticos sea autónoma, remota y programable, se ha diseñado un sistema de monitorización alimentado por energía fotovoltaica y se ha desarrollado un programa informático capaz de ser ajustado para realizar la adquisición de datos en periodos de tiempo determinados y con la posibilidad de implementar alarmas cuando las medidas superen unos umbrales definidos. Además, también se presenta un sistema de monitorización de sensores ópticos novedoso basado en la correlación de pulsos ópticos. Este sistema realiza medidas integradas y se ofrece la posibilidad de separación de la zona a monitorizar en regiones más pequeñas mediante el empleo de reflectores parciales. Se explicarán dos tipos de reflectores; los reflectores selectivos en longitud de onda y los reflectores parciales de intensidad, realizando ensayos para calibrar la respuesta de ambas tecnologías. Por último, se presenta un sensor en guía de onda para la medida de temperatura basado en las propiedades de fotoluminiscencia de puntos cuánticos coloidales embebidos en una matriz de PMMA. Se utilizan materiales diferentes para la fabricación de los puntos cuánticos, obteniendo sensibilidades diferentes entre sí.



# Abstract

In this Ph. D. thesis a variety of optical devices able to measure several physical magnitudes for application in the civil construction field are presented. These optical sensors are able to measure strain, temperature and pH variations in civil structures such as bridges, tunnels or even dikes in order to perform a structural health monitoring of that structures. Thus, strain and temperature sensors based on FBGs developed and tested in the Optical and Quantum Communications Group (GCOC) belonging to the Institute of Telecommunications and Multimedia Applications (iTEAM) are presented and real application of these sensors in the construction process of an incrementally launched bridge for the metropolitan highway in Bilbao (Spain) is showed. Moreover, two pH optical sensors based on hydrogels employing two different techniques are presented. One of them is based on the optical intensity and the other one is based on the frequency properties of the resonances created by an in-fiber Fabry-Pérot cavity. In order to achieve an autonomous, remote and programmable monitoring system, a photovoltaic power supply system is designed and acquisition software capable of saving data in programmed time periods with alarm feature whenever the measurements exceed a defined threshold is developed. In addition, a novel monitoring system for optical sensors based on the correlation of optical pulses is also presented. This kind of system performs integrated measurements offering the possibility of divide the whole monitoring area into smaller regions employing partial reflectors. Two types of partial reflectors are explained; the wavelength selective reflectors and the partial intensity reflectors, and laboratory tests are carried out in order to obtain the calibrated response using both technologies. Finally, a waveguide temperature sensor based on the photoluminescence properties of colloidal quantum dots embedded in a PMMA matrix is presented. In order to fabricate the quantum dots, different materials are used, obtaining different sensitivities one from each other.



# Resum

En aquesta tesi doctoral es presenten uns dispositius òptics capaços de mesurar varies magnituds físiques útils per als enginyers dins l'àmbit de la construcció. Aquestos sensors òptics són capaços de mesurar les variacions de deformació, temperatura i pH en estructures d'àmbit civils com són ponts, o inclús túnels o dics pel monitoratge de la seua salut estructural. Així doncs, es presenten els sensors de deformació i temperatura basats en FBG desenvolupats i calibrats en el Grup de Comunicacions Òptiques i Quàntiques (GCOC) de l'Institut de Telecomunicacions i Aplicacions Multimèdia (iTEAM) i s'exposa un cas d'aplicació real d'aquestos sensors en la construcció d'un pont per a trànsit rodat construït mitjançant la tècnica de llançament per increments successius per a la ronda sud metropolitana de Bilbao. També es presenten dos sensors òptics de pH que utilitzen hidrogels amb dues tecnologies diferents. Un d'aquestos sensors està basat en la intensitat òptica i l'altre en les propietats freqüencials de les ressonàncies en una cavitat Fabry-Pérot en fibra. Perquè el monitoratge d'aquestos sensors òptics siga autònom, remot i programable, s'ha dissenyat un sistema de monitoratge alimentat per energia fotovoltaica i s'ha desenvolupat un programa informàtic capaç de ser ajustat per realitzar l'adquisició de dades en períodes de temps determinats i amb la possibilitat d'implementar alarmes quan les mesures superen uns límits definits. A més, també es presenta un nou sistema de monitoratge de sensors òptics basat en la correlació de polsos òptics. Aquest sistema realitza mesures integrades i ofereix la possibilitat de separació de la zona a monitoritzar en regions més petites mitjançant l'ocupació de reflectors parcials. S'explicaran dos tipus de reflectors; els reflectors selectius en longitud d'ona i els reflectors parcials d'intensitat, realitzant assajos per calibrar la resposta d'ambdues tecnologies. Finalment, es presenta un sensor en guia d'ona per a la mesura de temperatura basat en les propietats de fotoluminescència de punts quàntics col·loïdals embeguts en una matriu de PMMA. S'utilitzen materials diferents per a la fabricació dels punts quàntics, obtenint sensibilitats diferents entre si.



# Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	1
1.2. Estado del arte en sensores ópticos para la aplicación a estructuras civiles .....	2
1.2.1. Sensores de deformación y temperatura .....	3
1.2.1.1. Sensores basados en FBG .....	3
1.2.1.2. Sensores basados en cavidades Fabry-Pérot .....	4
1.2.1.3. Sensores basados en SBS.....	5
1.2.1.4. Sensores basados en SRS.....	6
1.2.1.5. Sensores basados en dispersión de Rayleigh .....	7
1.2.1.6. Sensores basados en interferometría .....	8
1.2.1.7. Sensores basados en guías de onda ópticas.....	9
1.2.2. Sensores de pH.....	11
1.3. Objetivos .....	13
1.4. Estructura de la tesis .....	14
1.5. Referencias.....	16
<b>2. Sistema de interrogación basado en correlación de pulsos.....</b>	<b>23</b>
2.1. Introducción .....	23

2.2.	Explicación teórica del sistema .....	24
2.2.1.	Principio básico .....	24
2.2.2.	Separación en regiones .....	31
2.3.	Separación en regiones mediante WSR.....	32
2.3.1.	Principio .....	32
2.3.2.	Experimento .....	33
2.3.3.	Resultados experimentales .....	36
2.4.	Separación en regiones mediante IPR .....	43
2.4.1.	Principio .....	43
2.4.2.	Experimento .....	45
2.4.3.	Resultados .....	46
2.5.	Conclusiones .....	48
2.6.	Referencias .....	50

**3. Diseño y desarrollo de un sistema de monitorización estructural basado en FBG..... 53**

3.1.	Introducción .....	53
3.2.	Redes de difracción de Bragg (FBG) .....	54
3.2.1.	Principio de funcionamiento.....	54
3.2.2.	Compensación térmica .....	57
3.3.	Sensores puntuales basados en FBG .....	59
3.3.1.	Sensor de deformación .....	59
3.3.2.	Sensor de temperatura .....	62
3.4.	Sistema de interrogación de sensores programable, remoto y autónomo .....	62
3.4.1.	Software desarrollado.....	62
3.4.2.	Sistema inalámbrico .....	70
3.4.3.	Alimentación mediante energía solar .....	71
3.4.3.1.	Sistemas fotovoltaicos.....	72
3.4.3.2.	Sistema fotovoltaico adquirido.....	76
3.4.3.3.	Programación de tareas .....	83
3.5.	Monitorización de sensores en una obra real.....	84
3.5.1.	Introducción a los puentes construidos mediante la técnica de lanzamientos por incrementos sucesivos.....	84
3.5.2.	Instalación de los sensores ópticos .....	88
3.5.3.	Monitorización del puente durante la maniobra de lanzamiento .....	92
3.5.4.	Interpretación de los resultados .....	95
3.6.	Sensores de alta temperatura .....	100
3.6.1.	Introducción.....	100



3.6.2.	Ensayo con fuego real.....	102
3.6.2.1.	Fabricación de los sensores.....	103
3.6.2.2.	Instalación de los sensores.....	106
3.6.2.3.	Resultados.....	108
3.6.2.4.	Conclusiones.....	112
3.7.	Referencias.....	113
<b>4.</b>	<b>Sensores de pH basados en fibra óptica .....</b>	<b>115</b>
4.1.	Introducción .....	115
4.2.	Sensor de pH en fibra mediante hidrogeles.....	116
4.2.1.	Poli(N-isopropilacrilamida) .....	118
4.2.2.	Quitosano-g-poliacrilamida .....	119
4.2.3.	Quitosano-g-poli(ácido acrílico-co-acrilamida) .....	122
4.3.	Sensor de intensidad .....	123
4.3.1.	Materiales.....	124
4.3.2.	Calibración del dispositivo.....	125
4.3.3.	Ensayo en probetas de hormigón .....	128
4.3.4.	Análisis de los resultados.....	130
4.4.	Sensor de pH basado en cavidad Fabry-Pérot.....	131
4.4.1.	Cavidad Fabry-Pérot .....	132
4.4.2.	Cavidad Fabry-Pérot en fibra.....	133
4.4.3.	Tapers.....	134
4.4.4.	Diseño del sensor .....	139
4.4.5.	Ensayo.....	142
4.4.6.	Discusión de los resultados .....	146
4.5.	Conclusiones.....	148
4.6.	Referencias.....	149
<b>5.</b>	<b>Sensor de temperatura basado en puntos cuánticos coloidales embebidos en guías de onda de PMMA .....</b>	<b>151</b>
5.1.	Introducción .....	151
5.2.	Fabricación de las guías de onda.....	153
5.3.	Montaje experimental .....	155
5.4.	Resultados.....	156
5.5.	Conclusiones .....	159
5.6.	Referencias.....	160
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras .....</b>	<b>163</b>
6.1.	Conclusiones.....	163
6.2.	Líneas futuras.....	165

<b>Anexo 1. Publicaciones científicas del autor .....</b>	<b>167</b>
A1.1. Publicaciones científicas en revistas .....	167
A1.2. Contribuciones científicas en congresos .....	168
A1.3. Participación en proyectos de investigación .....	168
<b>Anexo 2. Publicación del autor en <i>IEEE Photonics Technology Letters</i> ...</b>	<b>171</b>
<b>Anexo 3. Publicación del autor en <i>Optical Engineering</i> .....</b>	<b>177</b>
<b>Anexo 4. Publicación del autor en <i>IEEE Sensors Journal</i> .....</b>	<b>188</b>

# Lista de figuras

Figura 1.1. Sensores ópticos para medida puntual basados en a) FBG y b) Cavity Fabry-Pérot.....	4
Figura 1.2. Espectro típico de luz retrodispersada inyectada por una fuente láser monocromática propagándose en una fibra óptica .....	5
Figura 1.3. Sensor y unidad de medida de un sistema interferométrico.....	9
Figura 1.4. a) Red de difracción integrada mediante técnica WIOS, b) anillos resonadores en guía, c) puntos cuánticos y su fotoluminiscencia guiada .....	11
Figura 1.5. a) FITC anclado sobre fibra óptica para la medida de pH basada en fluorescencia, b) Sensor de pH con FBG y mecanismo de transducción que provoca deformación, c) Sensor de pH basado en microcurvaturas .....	12
Figura 2.1. Principio básico de funcionamiento del sistema .....	25
Figura 2.2. Efecto en el solape entre pulsos debido a la variación de la separación temporal entre los pulsos de monitorización y referencia .....	26
Figura 2.3. Esquema interno del combinador de pulsos.....	26
Figura 2.4. Esquema interno de la Unidad Correladora de Pulsos .....	27
Figura 2.5. Implementación de detección diferencial a la salida de la unidad correladora de pulsos.....	28
Figura 2.6. Función de transferencia del cristal de niobato de litio.....	28
Figura 2.7. Caracterización de la etapa SHG/APD mediante la respuesta de amplitud frente a retardo .....	29
Figura 2.8. Respuesta de las dos etapas SHG/APD.....	29
Figura 2.9. Funcionamiento de la etapa SHG/APD con detección diferencial y curva característica del sistema .....	30
Figura 2.10. Imagen del interior de la unidad correladora de pulsos .....	31
Figura 2.11. Ejemplos de aplicación del sistema a estructuras reales .....	31
Figura 2.12. Principio de la separación en regiones mediante WSRs .....	32

Figura 2.13. Montaje realizado para el experimento .....	33
Figura 2.14. Foto del montaje experimental .....	34
Figura 2.15. Fibras ópticas usadas como regiones de monitorización instaladas sobre un sistema de posicionamiento milimétrico.....	35
Figura 2.16. Espectro de las FBG utilizadas en el experimento .....	36
Figura 2.17. Panel frontal del software desarrollado para la captura de datos.....	37
Figura 2.18. Pulso óptico medido a la salida de la fuente láser. Pulso real ensanchado por el osciloscopio de medida.....	38
Figura 2.19. Espectro de la fuente óptica sintonizada en 1548,9 nm para seleccionar la FBG número 1 .....	39
Figura 2.20. Forma característica de la señal eléctrica diferencial a la salida del sistema .....	39
Figura 2.21. Señal eléctrica diferencial de salida nula cuando aplicamos tensión a una región no seleccionada .....	40
Figura 2.22. Espectro de la fuente óptica sintonizada en 1545,8 nm para seleccionar la FBG 2 .....	41
Figura 2.23. Señal eléctrica diferencial de salida cuando aplicamos deformación a la región seleccionada número 2 .....	42
Figura 2.24. Respuesta lineal del sistema .....	42
Figura 2.25. Esquema de separación de regiones mediante IPR .....	44
Figura 2.26. Correlación medida por el sistema al realizar un barrido temporal con la línea de retardo .....	45
Figura 2.27. Esquema experimental para separación de regiones mediante IPR.....	45
Figura 2.28. Respuesta del sistema a la deformación de la Región 1 .....	47
Figura 2.29. Resultados de las medidas de deformación en la Región 1 y en la Región 2.....	48
Figura 3.1. Deformación unitaria de un objeto al aplicarle una fuerza de tracción .	55
Figura 3.2. a) Sensor de deformación presentado por Moyo et al. b) Sensor de deformación desarrollado por la UPV .....	60
Figura 3.3. Comparativa de espectros entre los sensores comerciales y el sensor UPV .....	61
Figura 3.4. Sensor de temperatura desarrollado por la UPV .....	62
Figura 3.5. Ventana principal de la aplicación .....	63
Figura 3.6. Fichero de datos generado por el software interrogador de sensores ....	64
Figura 3.7. Pestaña CONFIGURACIÓN AVANZADA .....	64
Figura 3.8. Pestaña MÓDULO GSM .....	66
Figura 3.9. Pestaña VISUALIZACIÓN DEL ESPECTRO .....	67
Figura 3.10. Pestaña CANAL 1 .....	68
Figura 3.11. Pestaña CANAL 1 utilizando umbrales y sensibilidad .....	69
Figura 3.12. Conexión de los equipos para una red inalámbrica local .....	70
Figura 3.13. Elementos de un sistema fotovoltaico .....	72
Figura 3.14 Tensiones y corrientes que proporcionan diferentes configuraciones de células fotovoltaicas .....	74
Figura 3.15. Voltaje de salida de paneles fotovoltaicos respecto de la temperatura. .....	75

Figura 3.16. Montaje del sistema fotovoltaico adquirido.....	80
Figura 3.17. Detalle de la cabina donde se hallan el regulador, el inversor y la batería.....	80
Figura 3.18. Archivo de datos obtenido con la programación de tareas.....	84
Figura 3.19. Fases del proceso constructivo de un puente empujado.....	85
Figura 3.20. Nariz de lanzamiento característica de un puente empujado .....	86
Figura 3.21. Parque de fabricación.....	87
Figura 3.22. Equipo hidráulico de empujado .....	88
Figura 3.23. Alzado del viaducto de la Variante Sur Metropolitana de Bilbao.....	88
Figura 3.24. Sección transversal del cajón metálico .....	89
Figura 3.25. Esquema de la conexión de las secciones a monitorizar.....	90
Figura 3.26. Preparación de la superficie e instalación de los sensores sobre la misma .....	92
Figura 3.27. Situación inicial y final correspondiente al lanzamiento monitorizado .....	92
Figura 3.28. Situación final del lanzamiento monitorizado. La nariz del cajón apoya sobre la pila P1-3. En color rojo se muestran la posición de las 5 secciones instrumentadas.....	93
Figura 3.29. Curvas de deformación de los sensores de la sección D61 .....	93
Figura 3.30. Curvas de deformación de los sensores de la sección D62 .....	94
Figura 3.31. Curvas de deformación de los sensores de la sección D63 .....	94
Figura 3.32. Curvas de deformación de los sensores de la sección D64 .....	95
Figura 3.33. Curvas de deformación de los sensores de la sección D65 .....	95
Figura 3.34. Ley de momentos flectores al inicio de la maniobra de lanzamiento ..	96
Figura 3.35. Voladizo y momentos flectores en una misma sección.....	98
Figura 3.36. Maniobra de recuperación de flecha, mediante el empleo de pórticos	99
Figura 3.37. Identificación de sucesos ocurridos durante la monitorización de la sección D61 .....	100
Figura 3.38. Ajuste cuadrático de la relación longitud de onda – temperatura .....	101
Figura 3.39. Temperatura medida por las FBGs .....	102
Figura 3.40. Potencia reflejada por las FBGs.....	102
Figura 3.41. Proceso de regeneración de las FBG inscritas en fibra codopada con germanio y boro .....	104
Figura 3.42. Proceso de regeneración de las FBG inscritas en fibra dopada con germanio.....	105
Figura 3.43. Grupo de sensores fabricado para facilitar la instalación.....	106
Figura 3.44. a) Localización de los sensores en el interior de las probetas de hormigón. b) Estructura de los sensores ópticos.....	106
Figura 3.45. Horno industrial de AIDICO. a) Vista frontal, b) vista interior del orificio de salida para la fibra óptica, c) vista exterior del orificio ....	107
Figura 3.46 Curva de temperatura descrita por la norma UNE-EN 1363-1 .....	109
Figura 3.47. Evolución temporal del espectro de los sensores Ge#1 (izquierda) y FBG#1 (derecha) durante el ensayo.....	109
Figura 3.48. Probeta 1, superficie lateral (L1) .....	110
Figura 3.49. Probeta 1, centro de gravedad (C1) .....	110
Figura 3.50. Probeta 2, superficie lateral (L2) .....	111

Figura 3.51. Probeta 2, centro de gravedad (C2) .....	111
Figura 4.1. Estructura química del PNIPAAm .....	118
Figura 4.2: Hinchado del hidrogel PNIPAAm a diferentes valores de pH.....	119
Figura 4.3. Hidrogel PNIPAAm hinchado a pH 13 (izquierda) y a pH 9 (derecha) .....	119
Figura 4.4. Estructura química del Ch-g-.PAAm. Copolimerización en injerto de acrilamida en quitosano en presencia de MBA.....	120
Figura 4.5. Hinchado del hidrogel Ch-g-pAAm a diferentes valores de pH.....	121
Figura 4.6. Hidrogel Ch-g-pAAm a pH 13 (izquierda) e hinchado a pH 9 (derecha) comparado con el mismo hidrogel en estado seco.....	121
Figura 4.7. Mecanismo para copolimerización de injerto de acrilamida (AAm) y ácido acrílico (AA) sobre quitosano en presencia de bisacrilamida de metileno (MBA) como entrecruzador.....	122
Figura 4.8. Hinchado del hidrogel Ch-g-p(AA-co-AAm) a diferentes valores de pH .....	122
Figura 4.9. Estructura del sensor de pH basado en intensidad óptica.....	123
Figura 4.10. Caracterización de los dispositivos con orificios de distinto diámetro .....	126
Figura 4.11. Evolución del hinchamiento del hidrogel (izquierda) y de la altura del émbolo debido al hinchamiento del hidrogel (derecha) .....	127
Figura 4.12. Evolución de la potencia óptica durante el ensayo de pH .....	128
Figura 4.13. Altura del émbolo durante el ensayo con fibra óptica.....	128
Figura 4.14. Instalación de los sensores ópticos de pH en las probetas de hormigón .....	129
Figura 4.15. Potencia óptica relativa registrada por los sensores ópticos durante las 24 primeras horas del hormigón.....	130
Figura 4.16. Cavidad Fabry-Pérot en fibra óptica.....	133
Figura 4.17. Partes de un taper en fibra óptica .....	135
Figura 4.18. Alzado y perfil de la estación de atacado con ácido fluorhídrico para fibra óptica.....	137
Figura 4.19. a) Transición del taper transcurridos 55 minutos. b) Cintura del taper transcurridos 100 minutos. c) Cintura del taper transcurridos 130 minutos .....	138
Figura 4.20. Evolución temporal del diámetro de cintura del taper durante el atacado químico con HF al 40 %.....	139
Figura 4.21. Diseño del sensor de pH basado en cavidad F-P para la medida del índice de refracción exterior.....	140
Figura 4.22: Coeficiente $\eta_p$ respecto del grosor de la cubierta en la zona del taper .....	141
Figura 4.23. Espectro en transmisión y en reflexión de las FBGs inscritas (izquierda) y cavidad Fabry-Pérot creada (derecha) .....	142
Figura 4.24. Montaje experimental para la medición de pH mediante una cavidad Fabry-Pérot .....	143
Figura 4.25. Espectros de la cavidad FP con el taper al aire y rodeado de agua destilada.....	144

Figura 4.26. Espectros de la cavidad FP con el hidrogel a pH 13 .....	145
Figura 4.27. Espectros de la cavidad FP con el hidrogel a pH 9.....	145
Figura 4.28. Capturas tomadas con el SEM de a) cintura del taper, b) transición del taper, c) hidrogel seco envolviendo la zona de cintura del taper .....	146
Figura 4.29. FSR teórico de la cavidad FP con los datos del ensayo real .....	146
Figura 4.30. Desplazamiento teórico de las resonancias con respecto al índice de refracción exterior.....	147
Figura 4.31. Espectro teórico de la cavidad FP para valores del índice de refracción exterior comprendidos entre 1 y 1.1 .....	147
Figura 5.1. Estructura de la guía de onda plana fabricada (no está en escala) .....	153
Figura 5.2. Espectros de absorción para los puntos cuánticos de CdSe y CdTe en la disolución coloidal .....	154
Figura 5.3. Espectro de PL de los QD de CdSe y CdTe en la disolución coloidal e incorporados en el nanocomposite de PMMA .....	155
Figura 5.4. Esquema del montaje experimental llevado a cabo para las medidas de temperatura.....	156
Figura 5.5. Espectros de PL capturados en las guías de CdSe-PMMA (izquierda) y CdTe-PMMA (derecha) para cada temperatura objetivo .....	157
Figura 5.6. Dependencia con la temperatura del desplazamiento en longitud de onda y del FWHM del espectro de PL .....	158
Figura 5.7. Datos experimentales y ajuste cuadrático para las guías de PMMA-CdSe y PMMA-CdTe.....	159





# Lista de tablas

Tabla 2.1. Comparativa entre técnicas de separación de regiones mediante WSR e IPR .....	50
Tabla 3.1. Características del sistema fotovoltaico adquirido en condiciones de luz .....	81
Tabla 3.2. Características del sistema fotovoltaico adquirido en condiciones de escasa luz.....	82
Tabla 3.3. Nomenclatura y posición de los sensores instalados .....	90
Tabla 3.4 Coeficientes de calibración de las FBG a altas temperaturas .....	101
Tabla 3.5 Pérdidas de potencia de pico reflejada por las FBGs regeneradas .....	105
Tabla 3.6 Sensores instalados y su ubicación en el interior de las probetas de hormigón .....	107
Tabla 3.7. Temperaturas máximas medidas por los sensores ópticos y eléctricos .	112
Tabla 3.8. Pérdidas de potencia óptica de los sensores ópticos tras el ensayo .....	112
Tabla 4.1. Comparación entre las diferentes técnicas de fabricación de tapers .....	136



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Las estructuras de ámbito civil tales como edificios, puentes, túneles, presas y muchas otras son elementos necesarios para el desarrollo de nuestra sociedad. Estas estructuras, por lo general basadas en hormigón, tienen un tiempo limitado de vida útil que va desde decenas a centenas de años, dependiendo de variados factores. Los factores más limitantes de la vida útil son las condiciones ambientales desfavorables (viento, lluvia, cambios continuos de temperatura) o un sobreesfuerzo de los elementos de la estructura debido a sobrecargas (debidos a procesos naturales o por la actividad humana). Un proceso de construcción realizado incorrectamente (por ejemplo, utilizar materiales de baja calidad o no respetar los tiempos necesarios en una fase concreta del proceso) también conlleva inevitablemente a una reducción del tiempo de vida útil de la estructura.

Se hace necesario por tanto conocer periódicamente el estado de una estructura y para ello hay que utilizar elementos sensores capaces de obtener esta información. Tradicionalmente, se ha venido utilizando sensores eléctricos tales como galgas extensiométricas, termopares, sensores inductivos, etc. Sin embargo, en las últimas décadas, los sensores ópticos han ido abriéndose paso en el mercado debido sobre todo a una serie de ventajas inherentes respecto de los sensores eléctricos tales como: son ligeros y de dimensiones reducidas, son inmunes a interferencias electromagnéticas, presentan bajas pérdidas posibilitando su utilización en aplicaciones remotas, son químicamente muy resistentes y permiten la multiplexación de varios sensores. El abaratamiento de los costes de los equipos ópticos así como la madurez que han adquirido las tecnologías ópticas han hecho que actualmente estén disponibles multitud de sensores ópticos comerciales y que cada día sean más utilizados por los ingenieros.

Centrándose en los sensores ópticos, existe una clara división entre técnicas de sensado atendiendo al tipo de medida que registran [Grattan00]. Según este criterio, existen cuatro tipos de sensores: sensores puntuales (obtienen medidas en un punto determinado), sensores distribuidos (obtienen medidas a lo largo de toda la fibra óptica con una resolución espacial determinada), sensores promediados (promedian una medida sobre una longitud de fibra determinada) y sensores cuasi-distribuidos (que obtienen medidas multipunto por medio de diferentes sensores puntuales distribuidos a lo largo de una fibra óptica).

Si atendemos a la magnitud de medida, existe una multitud de sensores tales como sensores de deformación, temperatura, pH, humedad relativa, inclinación, y tantos como magnitudes hay para medir. Este trabajo de tesis se centra en las magnitudes más representativas y útiles para un ingeniero civil en el ámbito de la construcción, esto es, deformación, temperatura y pH. La deformación es la magnitud más valiosa para comprender el comportamiento de una estructura ya que de este modo se puede saber, por ejemplo, si una estructura está soportando una carga excesiva o si la estructura no está bien compensada observando si sus elementos sufren deformaciones con distribuciones irregulares. La temperatura es indicativo de las dilataciones y compresiones de una estructura ya construida e incluso puede ayudar a comprender los procesos de curado y fraguado del hormigón en estructuras durante el proceso de construcción. La medición del pH sirve para conocer el estado de los materiales a nivel químico, por ejemplo durante el fraguado del hormigón una monitorización del pH puede ayudar a estimar la dureza final o durante la vida útil de una estructura basada en hormigón armado para conocer si existe corrosión en las barras de acero.

## **1.2. Estado del arte en sensores ópticos para la aplicación a estructuras civiles**

A continuación, se realiza una introducción a las tecnologías de sensado más desarrolladas en cuanto a investigación se refiere para la medida de las magnitudes de deformación y temperatura así como para la medida de pH.

---

## 1.2.1. Sensores de deformación y temperatura

### 1.2.1.1. Sensores basados en FBG

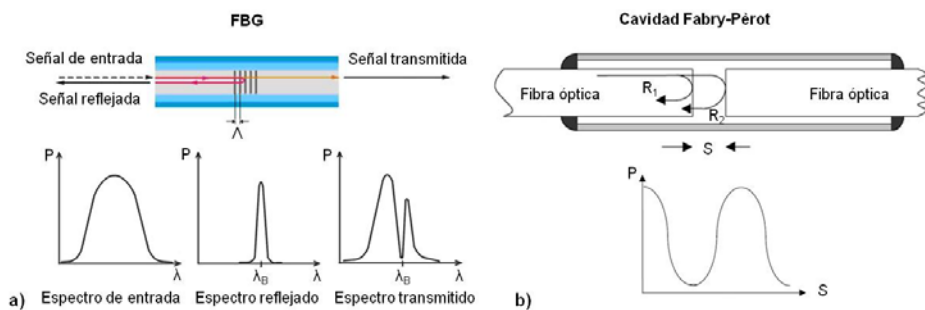
Dentro de los sensores puntuales, la técnica más desarrollada es la basada en FBG [Kersey97]. Estas estructuras están inscritas directamente sobre la fibra óptica, por lo que son de tamaño muy reducido (apenas 125  $\mu\text{m}$  de diámetro) [Hill78]. Una FBG consiste en una perturbación periódica (o cuasi-periódica) del índice de refracción efectivo en el núcleo de una fibra óptica. Estas estructuras se comportan como filtros elimina-banda de modo que si a la entrada de la FBG se inyecta una señal óptica con un espectro suficientemente ancho, cuando la señal llega a las perturbaciones parte de la luz se transmite y parte de ella se refleja (Figura 1.1.a). Mucho se ha investigado acerca de ellas desde el descubrimiento de su aplicación al sensado de deformación, centrándose gran parte de la investigación en el desarrollo de un encapsulado de la fibra adecuado a cada aplicación en concreto. El material sobre el que se instala el sensor de deformación influye en el diseño de la forma y los materiales del encapsulado. Especial cuidado se ha de tener también en el material utilizado en el encapsulado, ya que se pueden ver modificadas las propiedades de la FBG [Kuang01], teniendo que realizar una calibración previa del sensor antes de su instalación definitiva. Diferentes diseños se han desarrollado para instalar sensores ópticos de deformación en la superficie de estructuras hechas de hormigón [Zhou03] o acero [Barbosa08] e incluso embebidos en estructuras de hormigón durante la construcción de las mismas [Biswas10]. Una aplicación destacada de estos sensores en el ámbito de la construcción ha sido la de monitorización de retracción en edad temprana y de temperatura con sensores embebidos en el hormigón fresco durante el proceso de curado del mismo [Wong07].

Por otro lado, estos dispositivos son intrínsecamente sensibles a los cambios de temperatura por lo que son idóneas para su utilización directa como sensores para esta magnitud [Kersey97]. Debido a esta capacidad, los esfuerzos para realizar sensores de temperatura basados en FBG se han centrado en el desarrollo de un encapsulado idóneo de la fibra óptica para protegerla mecánicamente, ya que ésta resulta sumamente quebradiza. De este modo, se han utilizado materiales como capilares de sílice [Haran98] o tubos de acero [Lin04].

Mención aparte merece la medida de temperaturas muy altas, ya que la reflectividad de una FBG decrece muy rápido a partir de 600°C hasta que desaparece por completo la estructura de la red de difracción [Erdogan94]. Sin embargo, recientemente se ha descubierto un tratamiento especial para las FBG de modo que puedan soportar temperaturas superiores a los 1000°C sin una disminución notable de la reflectividad de la red de difracción [Fokine02]. El tratamiento consiste en una carga de hidrógeno en el interior de la fibra óptica durante varios días antes de la inscripción de la FBG [Liou97]. Después, se somete a la FBG a un templado a 1000°C de modo que la red de difracción se borra por completo y se regenera pasados unos minutos. Debido a este proceso de

regeneración, también se les denomina a estos dispositivos como RFBG (*Regenerated FBG*) [Canning09].

En la última década, se han aplicado con éxito sensores de deformación y temperatura basados en FBG a numerosas estructuras del ámbito civil. Como ejemplo, varios de estos sensores se instalaron en la Catedral de Como en Italia [Whelan02], en un puente sobre la autovía Wu-Zi en Taiwan [Lin05] y en el túnel Bai Ni-Jin en China [Li08].



**Figura 1.1. Sensores ópticos para medida puntual basados en a) FBG y b) Cavity Fabry-Pérot.**

### 1.2.1.2. Sensores basados en cavidades Fabry-Pérot

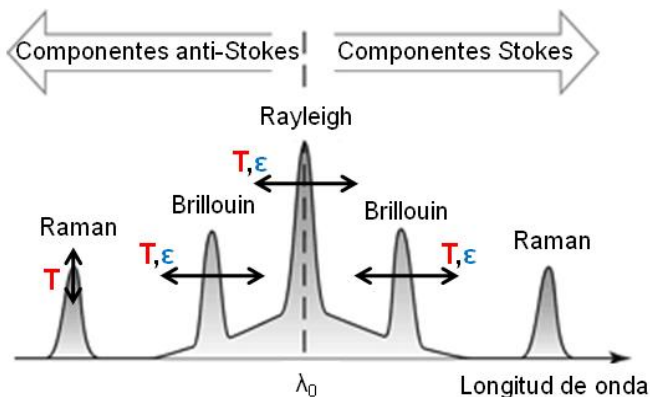
Otra de las técnicas más empleadas para el sensado puntual de deformación es la basada en cavidades Fabry-Pérot en fibra. Ésta a su vez se puede dividir en dos técnicas en función de la construcción de la cavidad, dando lugar a los sensores interferómetros Fabry-Pérot intrínsecos (IFPI, *Intrinsic Fabry-Pérot Interferometer*) y extrínsecos (EFPI, *Extrinsic Fabry-Pérot Interferometer*) [Grattan00]. En los sensores IFPI se crea la cavidad Fabry Pérot mediante el recubrimiento del extremo de una fibra óptica y su posterior fusión con otro tramo de fibra. Al crear dos de estos espejos separados una cierta distancia se crea la estructura interferométrica. En los sensores EFPI se enfrentan los extremos de dos fibras ópticas dejando una cierta separación de aire entre ellas, fijando las fibras en un encapsulado que realiza el mecanismo transductor [Murphy91]. Al traccionar o comprimir el encapsulado se alejan o acercan los extremos de las fibras, lo que provoca una variación de la longitud efectiva de la cavidad. La respuesta de estos sensores presenta una respuesta periódica (Figura 1.1.b), de modo que se puede relacionar la intensidad reflejada con la deformación [Huang10]. Los sensores EFPI se han desarrollado más que los sensores IFPI debido a una mayor facilidad de fabricación.

Entre algunas de las aplicaciones de los sensores basados en EFPI como sensores de deformación se encuentran la monitorización de la deformación en el nudo columna-viga de una estructura de hormigón reforzado [Vries97], el embebido en hormigón mediante técnicas de encapsulado adecuadas [Kesavan10] y la monitorización en tiempo real del curado de láminas reforzadas con fibras de carbono [Leng03]. Una aplicación en estructuras reales se encuentra en la

construcción de un puente de 312 metros de longitud sobre el río Yangtze en China [Feng07], donde se instalaron 8 sensores EFPI en un tramo del puente.

### 1.2.1.3. Sensores basados en SBS

La técnica de SBS se basa en un fenómeno de retro dispersión, conocido como dispersión de Brillouin, que tiene lugar en el interior de una fibra óptica. En concreto, esta técnica explota la interacción entre la luz y las ondas acústicas que se propagan en el núcleo de la fibra. La luz dispersada por este fenómeno tiene un desplazamiento en frecuencia proporcional a la velocidad local de los fonones de la onda acústica, denominado frecuencia de Brillouin, que depende de la temperatura y la deformación. El principio básico fue demostrado mediante la introducción en una fibra óptica de un pulso de bombeo de corta duración por un extremo, y de una luz de onda continua por el otro extremo [Horiguchi89]. En esta configuración, se produce un trasvase de potencia del pulso de bombeo a la onda continua cuando existe entre ellas una separación frecuencial igual a la frecuencia de Brillouin. De este modo, realizando un barrido frecuencial y con la relación que existe entre tiempo y distancia, se puede realizar un mapeado espacial del desplazamiento frecuencial que está relacionado con la deformación y temperatura. Este método de sensado por mapeo temporal se conoce como análisis óptico de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDA, *Brillouin Optical Time-Domain Analysis*).



**Figura 1.2. Espectro típico de luz retrodispersada inyectada por una fuente láser monocromática propagándose en una fibra óptica.**

Los primeros experimentos realizados para medir de manera distribuida deformación y temperatura obtenían resoluciones de  $20 \mu\epsilon$  en una longitud de 2 Km [Horiguchi90] y de  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  en una longitud de 1.2 Km [Kurashima90], ambas con una resolución espacial de 100 metros. En los siguientes años, la investigación en esta técnica se ha centrado en reducir la resolución espacial y en ampliar el rango de medida. Uno de los métodos desarrollados para mejorar la resolución espacial consiste en bombear previamente la onda acústica mediante una onda continua de bombeo (o un pulso de larga duración), inyectando por el otro extremo de la fibra

óptica una señal de onda continua. Una vez desarrollada la onda acústica se lanza un pulso de bombeo de muy corta duración que se encarga de muestrear a lo largo de toda la fibra óptica. Usando esta idea se desarrolló la técnica DPP-BOTDA (*Differential Pulse-width Pair BOTDA*) que utiliza dos pulsos de bombeo en vez de uno y detección diferencial, obteniendo una resolución de 2 cm en una longitud de 2 Km [Dong09]. La utilización de un esquema basado en el dominio de la frecuencia en lugar de en el tiempo propuesto por la técnica BOCDA (*Brillouin Optical Correlation-Domain Analysis*) mejora la resolución espacial hasta llegar a 1 cm, aunque en una longitud de tan solo 2.4 metros [Hotate02]. Para ampliar la longitud de medida, se utilizan esquemas de BOTDA con multiplexado en tiempo (TDM-BOTDA, *Time Domain Multiplexing BOTDA*) que consisten en introducir pulsos de bombeo y de señal en ambos extremos de la fibra óptica. La longitud de sensado depende de la anchura del pulso de bombeo, de modo que ajustando el retardo entre ambos pulsos se puede seleccionar la sección de la fibra óptica donde interactúan. Recientemente se ha desarrollado una técnica novedosa que consiste en la inscripción de una red de difracción de Brillouin [Song08] en la fibra óptica mediante dos pulsos de bombeo con una diferencia de frecuencia igual a la frecuencia de Brillouin que se propagan en direcciones opuestas de una fibra óptica. La región de solape de estos pulsos forma una red de difracción que puede ser creada en cualquier punto de la fibra con tan solo ajustar el retardo relativo entre ambos pulsos. Mediante esta técnica se ha conseguido resoluciones espaciales por debajo del centímetro [Chin12].

Un problema existente en las técnicas basadas en SBS es que la frecuencia de Brillouin es sensible tanto a deformación como a temperatura de forma simultánea. Para discriminar estos efectos de forma separada, se han desarrollado soluciones como utilizar dos fibras paralelas de manera que una de ellas está libre de deformación y mide tan solo la temperatura [Bao94], o como la de utilizar la ganancia de Brillouin [Smith99] o birrefringencia [Zou09] además del desplazamiento de la frecuencia Brillouin. Debido a la complejidad en el análisis de los datos obtenidos mediante los sensores basados en SBS, resulta complicado su uso en aplicaciones para medidas dinámicas. Aun así, se ha conseguido aplicar esta técnica para medidas distribuidas de deformación con una tasa de 13 Hz y una resolución espacial de 2 metros en una fibra óptica de 100 metros de longitud [Bao09]. Esta técnica está siendo utilizada ampliamente en monitorización estructural aplicada a elementos estructurales y a construcciones de ámbito civil, tales como vigas de hormigón armado [Deif10] y en pruebas de carga en un puente de hormigón de 44 metros de longitud [Minardo12]. Además, desde hace tiempo existen en el mercado dispositivos comerciales para la monitorización de sensores ópticos basados en SBS por parte de varias empresas especializadas.

### 1.2.1.4. Sensores basados en SRS

La técnica de SRS se basa en un fenómeno de retrodispersión (al igual que con SBS) conocido como dispersión de Raman. En este caso, se utiliza la interacción de



---

las ondas ópticas con las vibraciones moleculares del material de la fibra óptica. Las ondas incidentes se dispersan al chocar con las moléculas y experimentan una variación de su frecuencia óptica. Este desplazamiento de frecuencia coincide precisamente con la frecuencia de vibración de las moléculas (llamada frecuencia de Stokes). El principio elemental de SRS consiste en inyectar simultáneamente dos ondas ópticas separadas por la frecuencia de Stokes en un medio Raman activo. En este caso, la onda de menor frecuencia experimentará una ganancia óptica generada por, y a expensas, de la onda de mayor frecuencia (bombeo). Puesto que esta vibración de moléculas se produce por efecto de la temperatura, los sensores basados en SRS tan solo son capaces de medir esta magnitud.

Los primeros experimentos realizados por J. P. Dakin para la medida distribuida de temperatura mediante el empleo de dispersión de Raman arrojaban una resolución en temperatura por debajo de 10 °C y una resolución espacial de 3 metros [Dakin85]. En este trabajo se utilizaba por primera vez un láser de semiconductor y un fotodiodo de avalancha, evolucionando la idea original de esta técnica hasta un planteamiento más práctico. Con la técnica SRS existe el problema de que la intensidad de la señal retrodispersada depende de la atenuación de la fibra óptica y de las pérdidas por empalmes, conectores y curvaturas. Sin embargo, se pueden utilizar varios mecanismos de compensación, como medir la relación a la componente espectral de Rayleigh que es independiente de la temperatura [Kee99], o realizar una autocorrección mediante una muestra de la propia señal reflejada en un espejo situado en el extremo final de la fibra óptica para eliminar el efecto de de pérdidas ópticas por curvatura [Hwang10]. No obstante, el mecanismo más utilizado para la corrección de la señal retrodispersada es la de medir la relación entre las componentes Stokes y anti-Stokes de Raman [Babin10], ya que la componente Stokes no es dependiente de la temperatura, pero sí de los fenómenos de pérdidas a lo largo de la fibra óptica. Para mejorar la resolución espacial de la técnica SRS se han aplicado recientemente métodos como el de procesado de señal mediante transformada de Fourier [Bahrapour11].

La aplicación de la técnica SRS al campo de la ingeniería se ha realizado para medida de temperatura en diversas ubicaciones tales como el circuito de refrigeración primario en un reactor nuclear [Kimura01] o líneas de potencia entre torretas de alta tensión [Cirigliano09].

#### *1.2.1.5. Sensores basados en dispersión de Rayleigh*

Al igual que los sensores basados en SBS y en SRS, estos sensores aprovechan el fenómeno de retrodispersión que se produce en la fibra óptica, aunque utilizando la componente de mayor señal en el espectro, es decir, la componente Rayleigh. La dispersión de Rayleigh en una fibra óptica es causada por las variaciones aleatorias del perfil del índice de refracción a lo largo de toda la longitud de la fibra. La amplitud de la dispersión en función de la distancia presenta unas propiedades aleatorias aunque son estáticas. Los estímulos externos a la fibra óptica tales como

variación de temperatura o deformación, provoca un desplazamiento en el espectro de dispersión reflejado. Este desplazamiento puede ser calibrado para conseguir un sensor distribuido. Mediante el empleo de técnicas espectrales mediante transformada de Fourier y con técnicas de correlación espectral respecto de un espectro de dispersión de referencia, es posible conseguir resoluciones en temperatura de 0.1 °C con una resolución espacial de 1 mm, aunque limitado a longitudes de fibra de algunos cientos de metros [Gifford05]. Esta técnica ha sido aplicada con éxito en la monitorización de la temperatura en un reactor nuclear con una resolución de temperatura de 0.1 °C y una resolución espacial de 1 centímetro [Sang08].

### *1.2.1.6. Sensores basados en interferometría*

Los sensores ópticos basados en esta tecnología suelen ser utilizados para la medida de una magnitud de forma promediada, principalmente para la medida de deformación. Uno de los métodos que se han desarrollado consiste en la utilización de un interferómetro Michelson [Inaudi97] mediante dos fibras ópticas muy próximas, denominadas fibra de medida y fibra de referencia (Figura 1.3). La fibra de medida se instala en contacto directo con la estructura que se va a monitorizar mientras que la fibra de referencia queda libre y no se ve afectada por la deformación de la estructura. Al final de cada una de estas fibras existe un espejo que refleja la luz hacia el camino de vuelta por las fibras ópticas, de modo que se combinan en un acoplador. Estas señales se combinan con una fase que depende de la deformación que sufra la fibra de medida. En el dispositivo de medida se encuentra otro interferómetro Michelson formado por un acoplador que divide la luz en dos fibras de salida con dos espejos al final. Uno de estos espejos es móvil, haciendo que se pueda compensar el desfase existente debido a la combinación de luz en el interferómetro de las fibras de medida y referencia. El desfase se compensa cuando el espejo móvil se desplaza una distancia equivalente a la deformación sufrida por la fibra de medida, pudiendo obtener de este modo la deformación existente en la estructura. La precisión obtenida por este método es de 2  $\mu\text{m}$ , independientemente de la longitud del sensor. Puesto que la información de la medida se halla codificada en la coherencia de la luz y no en la intensidad de la misma, el sistema es insensible a las propiedades de transmisión de la fibra. Aunque se ha utilizado la configuración de interferómetro Michelson en el dispositivo de medida, existe una configuración más reciente que consiste en cambiarlo por un interferómetro Mach-Zehnder que permite la monitorización dinámica [Casciati05].

La utilización de los sensores basados en interferometría ha sido bastante amplia en los últimos años. Una de las aplicaciones ha sido la de medir las compresiones y tracciones sufridas por los pilares de un edificio en construcción en el que se instalaron un total de 25 sensores [Glisic02]. En otra aplicación, se instalaron hasta 58 sensores interferométricos en el puente Siggenthal en Suiza para poder monitorizar la deformación sufrida en varios de los segmentos del puente a lo largo de sus 117 metros de longitud durante las fases de construcción y de servicio [Inaudi02].

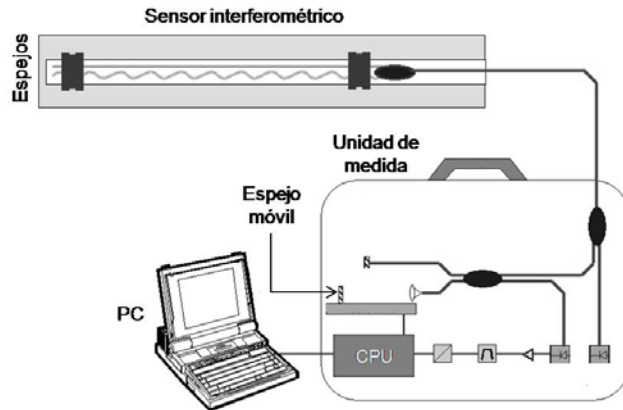


Figura 1.3. Sensor y unidad de medida de un sistema interferométrico.

### 1.2.1.7. Sensores basados en guías de onda ópticas

En aplicaciones tales como medicina, medio ambiente y seguridad se hace necesario el empleo de diagnósticos de bajo coste, rápidos y mediante dispositivos de tamaño reducido. Del mismo modo que los dispositivos electrónicos comenzaron a integrarse hace 50 años, con el resultado de un aumento en el rendimiento y una disminución de costes, se ha comenzado recientemente un intento de integración de dispositivos en el área de la fotónica para conseguir dispositivos de bajo consumo y tamaño reducido. Se presenta pues como un gran desafío la implementación de sensores ópticos a nivel de chip en una plataforma integrada portátil, de bajo coste y bajo consumo. En cuanto a miniaturización e integración en chips, la tecnología de sensado óptico basado en guías de onda ópticas [Mukundan09] se muestra como una de las más prometedoras. Dentro de esta tecnología se han desarrollado varias topologías tales como acoplo a una red de difracción, interferómetros Mach-Zehnder y anillos resonantes.

La topología de acoplo a una red de difracción es quizás la que más fácilmente se puede fabricar mediante tecnologías de integración en chips. Consiste en una red de difracción grabada en una región de la guía de onda mediante técnicas de fotolitografía o impresión. Existen dos variantes de guías de onda mediante esta topología. Una de ellas, denominada OWLS (*Optical Waveguide Light-mode Spectroscopy*), consiste en el acoplo de luz en la estructura incidiendo con un ángulo determinado sobre la red de difracción y midiendo la intensidad que se propaga a través de la guía de onda mediante un fotodetector [Szekacs09]. La variación del parámetro a medir provoca un cambio en el ángulo de incidencia que determina un acoplo máximo de potencia. La medida del sensor se obtiene correlando el ángulo de máxima incidencia con el parámetro a medir. El principal inconveniente de este tipo de sensores es que sólo es posible fabricar una red de difracción por chip. La otra técnica, denominada WIOS (*Wavelength Interrogated Optical Sensors*) consiste en la medida de la eficiencia de acoplo en función de la longitud de onda en vez de en la intensidad [Popa09]. Además, la luz guiada se

extrae de la guía de onda mediante otra red de difracción de periodo diferente para su posterior medida (Figura 1.4.a). Con esta técnica es posible la multiplexación de varios sensores en un mismo chip óptico.

Los interferómetros Mach-Zehnder consisten en una estructura de guía de onda que se divide en dos caminos ópticos. Uno de ellos actúa como brazo sensor, mientras que el otro actúa como referencia. Estos dos caminos se combinan de nuevo tras una cierta distancia, de modo que el desfase que sufre la luz en el camino de sensado debido a la variación del parámetro a medir hace que la interferencia puede ser constructiva o destructiva [Sepúlveda06]. La versatilidad de esta tecnología hace posible su fabricación mediante materiales como óxido de silicio, nitruro de silicio, silicio sobre aislante e incluso polímeros.

Otro tipo de dispositivos en guías de ondas que han sido investigados para la integración de sensores en chips ópticos son los anillos ópticos resonantes [Washburn09]. Su funcionamiento consiste en el acoplo de luz desde una guía de onda lineal, de modo que sólo una longitud de onda específica resuena en el interior del anillo. Estas resonancias aparecen como un valle en el espectro de transmisión y son espectralmente estrechas. La longitud de onda de las resonancias depende fuertemente del índice de refracción local cercano al anillo (Figura 1.4.b). Los materiales para la fabricación de anillos resonantes son variados, desde óxido de silicio, hasta silicio sobre aislante e incluso polímeros.

Por otro lado, la integración a escala microscópica de fenómenos de luminiscencia para sensado está siendo también objeto de una gran investigación. En este campo se han desarrollado unas partículas, denominadas puntos cuánticos (QD, *Quantum Dots*), que resultan ser un material atractivo para ser integrado en dispositivos fotónicos [Klimov03]. En concreto, los QD sintetizados por química coloidal añan el confinamiento tridimensional de la función de onda con la viabilidad de métodos químicos capaces de conseguir radios de estas partículas de 1 nm a 10 nm con una dispersión de tan solo un 6 % [Tomczak09]. Además, estas partículas permiten la posibilidad de sintonizar la longitud de onda de emisión mediante la variación del tamaño y del material de las mismas, sin tener que modificar la estructura química. Por lo tanto, la apropiada selección de varios QD provee la posibilidad de multiplexado en longitud de onda de varios sensores [Goldman04], como se puede ver en la Figura 1.4.c. Durante la última década, muchos investigadores han estudiado el uso de la luminiscencia de los QD en aplicaciones biológicas, químicas y para la medida de fenómenos físicos como la temperatura. Para poder llevar a cabo la integración de las propiedades de los QD en dispositivos optoelectrónicos se suele incorporar estas partículas en un material huésped, denominando al conjunto nanocomposite. Este material puede ser un metal como  $\text{TiO}_2$  o  $\text{ZrO}_2$  [Jasieniak07], aunque los polímeros son más apropiados debido a que pueden ser procesados fácilmente en láminas mediante varios métodos de recubrimiento (como spin-coating, dip-coating, por espray, etc.) en una variedad de sustratos baratos y flexibles, con la posibilidad de aplicar técnicas de fotolitografía [Uddin08].

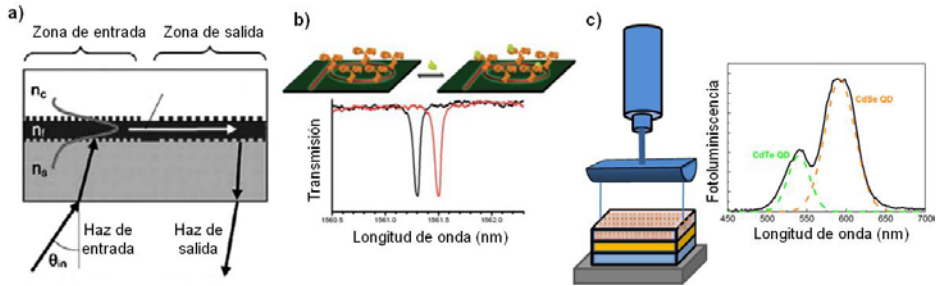


Figura 1.4. a) Red de difracción integrada mediante técnica WIOS, b) anillos resonadores en guía, c) puntos cuánticos y su fotoluminiscencia guiada.

### 1.2.2. Sensores de pH

Puesto que la fibra óptica por sí sola no es capaz de medir pH, se necesita un mecanismo transductor, de modo que se pueda medir una magnitud que esté relacionada con el pH. Las primeras técnicas que se utilizaron para desarrollar sensores de pH basados en fibra óptica consistían en la incorporación de indicadores sobre la fibra óptica (normalmente mediante una técnica conocida como *sol-gel* [MacCraith95]) de modo que la amplitud o incluso la longitud de onda del máximo de fluorescencia cambiaba con la variación del pH en longitudes de onda comprendidas en el espectro visible (400-700 nm). Los indicadores utilizados consistían en tintes o combinaciones de tintes orgánicos fluorescentes de diferentes colores que presentaban cambios según el pH a la longitud de onda de ese color. De este modo, se han utilizado tintes como el isotiocianato de fluoresceína (FITC) [Nivens98] anclado en la fibra óptica (Figura 1.5.a) con un máximo de fluorescencia alrededor de 520 nm y un rango de medida de pH entre 2.4 y 8.3 o el HPTS (8-Hydroxypyrene-1,3,6-trisulfonic acid, trisodium salt) [Zamarreño07] con un máximo de fluorescencia alrededor de 515 nm y un rango de medida de pH entre 2 y 9. Otros tintes utilizados han sido: una mezcla de rojo de cresol, azul de bromofenol y rojo de clorofenol [Dong08] que consigue un sensor de pH con un rango de 4.5 a 13, o azul de timol (timolsulfonftaleína) [Miled02] para obtener un sensor de pH con un rango de 8 a 12. Del mismo modo que con los tintes orgánicos, también es posible la adhesión de polímeros tales como la polianilina (PANI) [Jin00] o polipirrol (PPy) [Marcos96], pero en este caso se utiliza un espectrómetro para adquirir el espectro de absorción.

Otra técnica utilizada para medir pH mediante fibra óptica consiste en usar una FBG y un polímero sensible al pH [Triques06]. Existen polímeros que tienen la capacidad de variar su tamaño si cambia el pH de la disolución en la que se halla inmerso. De este modo, mediante un mecanismo transductor, el cambio de volumen del polímero provoca un estiramiento sobre la FBG, que tiene como consecuencia un desplazamiento de la longitud de onda de resonancia (Figura 1.5.b). Calibrando este mecanismo, se obtiene un sensor de pH mediante una medida indirecta, en este caso, deformación. Un sensor que utiliza esta técnica ha llegado a ser patentada [Silva05]. Otra posibilidad para desarrollar un sensor óptico de pH mediante redes

de difracción consiste en depositar capas de un material sensible al pH sobre la propia red de difracción, de modo que una variación del pH provoca una deformación [Corres07]. Esta deformación conlleva una variación de la longitud de onda de resonancia de la red de difracción.

Otro tipo de sensor de pH basado en fibra óptica consiste en el recubrimiento con un material sensible al pH de una estructura interferométrica basada en un empalme de fibra óptica de diámetro reducido con fibra óptica monomodo estándar [Yin11]. De este modo se producen una serie de resonancias que se desplazan en longitud de onda en función del pH donde se halle sumergido el sensor. Del mismo modo, el recubrimiento de una fibra óptica a la que se le ha extraído la cubierta (dejando el núcleo al descubierto) con PAH/PAA provoca la creación de unas resonancias originadas por modos con pérdidas cercanos a la condición de corte (conocidas como LMR, *Lossy Mode Resonances*) que también varían su longitud de onda con el pH [Zamarreño11].

Por otro lado, también existen técnicas de sensado de pH basado en intensidad óptica. Es el caso de un sensor basado en fibra óptica de plástico recubierta con una mezcla de tintes, a la que se le provoca una serie de micro-curvaturas en un tramo de dicha fibra [Lee02], como se aprecia en la Figura 1.5.c. Al variar el pH que se mide, varía la potencia óptica medida en transmisión. Otros sensores basados en intensidad utilizan tintes adheridos en el extremo distal de una fibra óptica, de modo que el cambio de pH hace variar la intensidad de pico del espectro de fluorescencia [Jin11] o de absorción [Fabbri11]. Una técnica que también utiliza como parámetro la intensidad óptica consiste en hacer incidir la luz guiada con una fibra óptica sobre un tinte que cambia de color con el pH, de modo que la intensidad del espectro reflejado a una longitud de onda determinada varía con el pH [Yoo11].

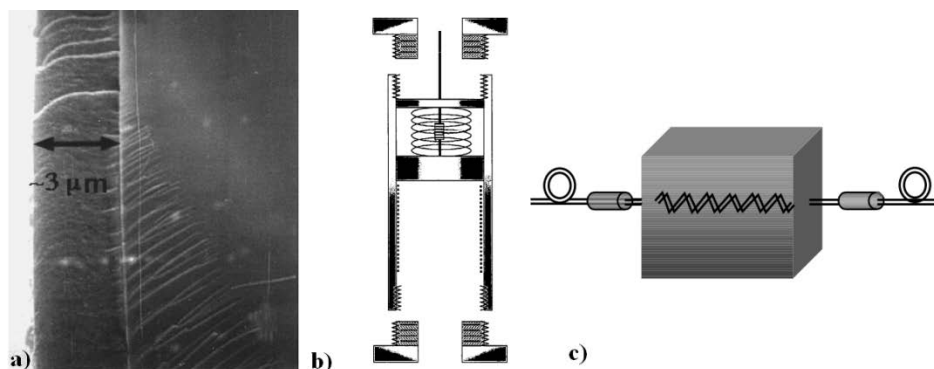


Figura 1.5. a) FITC anclado sobre fibra óptica para la medida de pH basada en fluorescencia, b) Sensor de pH con FBG y mecanismo de transducción que provoca deformación, c) Sensor de pH basado en microcurvaturas.

### 1.3. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo de tesis es el de desarrollar dispositivos capaces de medir varias magnitudes físicas útiles para los ingenieros en el ámbito de la construcción. Asimismo, se pretende desarrollar y analizar un sistema de interrogación para estos dispositivos mediante técnicas novedosas y que presenten mejoras y ventajas respecto a los ya existentes. Para alcanzar este objetivo, se realizarán diversos ensayos que posibiliten la calibración y mejora tanto de los dispositivos sensores como del sistema de interrogación de los mismos.

Puesto que se pretende poder medir magnitudes que caractericen los procesos constructivos de estructuras en el ámbito de la ingeniería civil, se hace necesaria la consecución de varios objetivos secundarios de carácter más específico, los cuales se detallan a continuación:

- Desarrollar un dispositivo basado en fibra óptica para la medida de deformación tanto en superficie como embebido en hormigón. Para ello, habrá que definir la estructura de fibra óptica capaz de medir deformaciones y posteriormente diseñar un sistema de protección de la misma para la correcta manipulación e instalación del dispositivo sensor. Para la comprobación del funcionamiento de este sensor, se realizarán varios ensayos que permitan la calibración del mismo para su posterior uso.
- Desarrollar un dispositivo basado en fibra óptica para la medida de temperatura tanto en superficie como embebido en hormigón. De nuevo, habrá que definir la estructura de fibra óptica más adecuada para la medida de temperatura y se hará indispensable diseñar un sistema de protección de dicha estructura para la correcta manipulación e instalación del dispositivo sensor. Dentro de este objetivo se engloban las tareas para el diseño de un sensor para temperaturas extremas (por encima de los 1000 °C) habiendo que realizar modificaciones tanto en la estructura de fibra óptica como en el encapsulado del mismo. Para la comprobación del funcionamiento de estos sensores, se realizarán varios ensayos que permitan la calibración de los mismos para su posterior uso.
- Desarrollar un dispositivo basado en fibra óptica para la medida de pH del hormigón. Para ello habrá que diseñar mecanismos transductores que permitan la medida de este parámetro mediante fibra óptica así como diseñar un sistema de protección de la misma para la correcta manipulación e instalación del dispositivo sensor. Para la comprobación del funcionamiento de estos sensores, se realizarán varios ensayos que permitan la calibración de los mismos para su posterior uso.
- Diseñar un sistema de interrogación de sensores novedoso que permita la utilización de sensores ópticos de diversa índole, tanto para sensado puntual como para sensado distribuido o promediado. Calibrar la respuesta del sistema y realizar un análisis de las prestaciones del mismo.

- Para la interacción del sistema interrogador de sensores se desarrollará un programa informático mediante el lenguaje de programación LabVIEW®. Además, se diseñara un sistema de alimentación eléctrica basada en energía solar de manera que sea completamente autónomo en un entorno hostil como el de una obra para la construcción de una estructura o incluso para una estructura ya construida en una localización con ausencia de energía eléctrica. De este modo, se implementará un sistema de interrogación automatizado, remoto y con un sistema de alimentación solar autónomo.
- Realizar ensayos y caracterización de sensores basados en guías ópticas, introduciendo de este modo el sensado con dispositivos fotónicos integrados.
- Aplicación práctica de los sensores desarrollados en materiales constructivos y en estructuras reales tanto en el proceso constructivo como durante la vida útil y mantenimiento de las mismas.

Esta tesis doctoral se enmarca dentro del proyecto SOPROMAC (Desarrollo de sensores ópticos avanzados para la determinación de las propiedades de los materiales constructivos y la salud estructural de infraestructuras) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de las ayudas del Programa Nacional de Cooperación Público-Privado del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011. Con el propósito de lograr los objetivos anteriormente mencionados, se hará uso de las instalaciones sitas en el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM), en el seno del Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas (GCOC). Por otro lado, los trabajos realizados en obras para la construcción de estructuras reales se engloban dentro del convenio de colaboración entre la Universidad Politécnica de Valencia y la empresa constructora Sacyr Vallehermoso mediante el proyecto titulado “Desarrollo de sensores ópticos aplicados a la instrumentación de estructuras para conocimiento de su comportamiento en tiempo real”.

Los ensayos de pruebas y calibración de los sensores ópticos aplicados en estructuras experimentales de laboratorio se han realizado en las instalaciones del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (ETSICCP) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

### **1.4. Estructura de la tesis**

El trabajo de tesis se estructura en 6 capítulos claramente diferenciados. En el capítulo 1 se lleva a cabo una breve introducción con el objetivo de presentar la necesidad de disponer de dispositivos sensores para aplicaciones a la vida real y de cómo los sensores ópticos se presentan como una alternativa a los sensores eléctricos convencionales. Además, se realiza un análisis del estado del arte actual



en sensores ópticos. Para ello no solo se hará un análisis de las más recientes investigaciones llevadas a cabo por universidades e institutos de investigación, sino que también se analizarán los diferentes productos comerciales desarrollados por empresas especializadas en el sector de los sensores ópticos. Bajo estas premisas, se muestran los objetivos globales del proyecto y las actuaciones que se reflejan en este trabajo de tesis para lograr la consecución de los mismos.

A continuación, en el capítulo 2 se presentará un sistema de interrogación de sensores ópticos mediante la técnica de correlación de pulsos ópticos. Este esquema de interrogación permite la combinación de dos tipos de sensado como son el puntual y distribuido, considerándose por tanto a este sistema de interrogación como un sistema híbrido. Para la realización de estos trabajos se ha contado con la colaboración del Dr. Koji Nonaka gracias al acuerdo entre la Universidad Politécnica de Valencia y la Kochi University of Technology (高知工科大学) de Japón.

El capítulo 3 contiene el diseño de un sistema de monitorización para sensores ópticos puntuales basados en redes de difracción de Bragg. Para ello se describe un programa informático creado para ofrecer una monitorización automatizada y remota que presente una interfaz amigable para un usuario que quiera realizar labores de control del estado de estructuras mediante herramientas gráficas y de procesado de datos. Incluido en este capítulo se encuentra el diseño del sistema de alimentación solar para los equipos del sistema de interrogación. Finalmente, se presenta la aplicación de este sistema de monitorización en la construcción de una estructura real, en concreto, un puente construido mediante la técnica de lanzamientos por incrementos sucesivos.

Posteriormente, el capítulo 4 se centra en el desarrollo de un dispositivo sensor capaz de medir el pH de disoluciones para la posterior aplicación de medida del pH del hormigón tanto para los procesos de curado y fraguado del mismo como para la monitorización durante la vida útil de estructuras basadas en hormigón (en especial las basadas en hormigón armado).

En el capítulo 5 se aborda el sensado mediante dispositivos ópticos integrados, en este caso con guías ópticas de polímero, donde la inclusión de unos materiales fotoluminiscentes denominados *puntos cuánticos* permite el sensado de temperatura. Se estudiarán dos tipos de puntos cuánticos hechos de materiales diferentes que proporcionan unas características de fotoluminiscencia diferentes y se caracterizarán en temperatura en un rango de entre 25 °C y 50 °C.

Finalmente, en el capítulo 6 se muestran las principales conclusiones del trabajo de tesis extraídas por el autor así como las líneas de actuación futuras.

## 1.5. Referencias

[Babin10]: S. A. Babin, A. G. Kuznetsov, I. S. Shelemba, “Comparison of Raman and fiber Bragg grating-based fiber sensor systems for distributed temperature measurements”, *Key Engineering Materials*, Vol. 437, pp. 309-313, (2010).

[Bahrapour11]: A. R. Bahrapour, A. Moosavi, M. J. Bahrapour, L. Safaei, “Spatial resolution enhancement in fiber Raman distributed temperature sensor by employing ForWaRD deconvolution algorithm”, *Optical Fiber Technology*, Vol. 17, pp.128-134, (2011).

[Bao94]: X. Bao, D. J. Webb, D. A. Jackson, “Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber”, *Optics Letters*, Vol. 19, pp. 141-142, (1994).

[Bao09]: X. Bao, W. Li, C. Zhang, M. Eisa, S. El-Gamal, B. Benmokrane, “Monitoring the distributed impact wave on concrete slab due to the traffics based on polarization dependence on the stimulated Brillouin scattering”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, pp. 15003-15008, (2009).

[Barbosa08]: C. Barbosa, N. Costa, L. A. Ferreira, F. M. Araujo, H. Varum, A. Costa, C. Fernandes, H. Rodrigues, “Weldable fibre Bragg grating sensors for steel bridge monitoring”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, 125305 (10pp) (2008).

[Biswas10]: P. Biswas, S. Bandyopadhyay, K. Kesavan, S. Praivallal, B. A. Sundaram, K. Ravisankar, K. Dasgupta, “Investigation on packages of fiber Bragg grating for use as embeddable strain sensor in concrete structures”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 157, pp. 77-83 (2010).

[Canning09]: J. Canning, M. Stevenson, et al., “Optical fibre Bragg gratings for high temperature sensing”, Proc. of SPIE 7503, 75032N, 20<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, Edimburgo, Escocia (2009).

[Casciati05]: S. Casciati, M. Domaneschi, D. Inaudi, “Damage assessment from SOFO dynamic measurements”, 17<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, Proc. of SPIE Vol. 5855, pp. 1048-1051, (2005).

[Chin12]: S. Chin, N. Primerov, L. Thevenaz, “Sub-centimeter spatial resolution in distributed fiber sensing based on dynamic Brillouin grating in optical fibers”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, No. 1, (2012).

[Cirigliano09]: M. Cirigliano, G. Cattaneo, P. Boffi, A. Barberis, U. Perini, G. Pirovano, M. Martinelli, “Overhead power lines temperature measurements by a fiber optic Raman sensor”, 20<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, Proc. of SPIE Vol. 7503, 75034P (4pp), (2009).

- 
- [Corres07]: J. M. Corres, I. R. Matias, I. del Villar and F. J. Arregui, "Design of pH sensors in long-period fiber gratings using polymeric nanocoatings", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 7, No. 3, pp. 455-463 (2007).
- [Dakin85]: J. P. Dakin, D. J. Pratt, "Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", *Electronic Letters*, Vol. 21, No. 13, pp. 569-570 (1985).
- [Deif10]: A. Deif, B. Cousin, B. Martín-Perez, C. Zhang, X. Bao, W. Li, "Concrete deformation in a reinforced concrete beam using distributed Brillouin fibre sensors", *Smart Materials and structures*, Vol. 19, 55014, (2010).
- [Dong08]: S. Dong, M. Luo, G. Peng and W. Cheng, "Broad range pH sensor based on sol-gel entrapped indicators on fibre optic", *Sensors and Actuators B* 129, pp. 94-98 (2008).
- [Dong09]: Y. Dong, X. Bao, W. Li, "Using differential Brillouin gain to improve the temperature accuracy and spatial resolution in a long-distance distributed fiber sensor", *Applied Optics*, Vol. 48, pp. 4297-4301, (2009).
- [Erdogan94]: T. Erdogan, V. Mizrahi, P. J. Lemaire and D. Monroe, "Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings", *J. Appl. Phys.* 76 (1), pp. 73-80 (1994).
- [Fabbri11]: P. Fabbri, F. Pilati, L. Rovati, R. McKenzie, J. Mijovic, "Poly(ethylene oxide)-silica hybrids entrapping sensitive dyes for biomedical optical pH sensors: Molecular dynamics and optical response", *Optical Materials*, Vol. 33, pp. 1362-1369,(2011).
- [Feng07]: G. Z. Feng, D. Y. Liang, S. B. Chen, J. X. Mei, "Strain monitoring of railway bridges using optic fiber sensors", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 186-197, (2007).
- [Fokine02]: M. Fokine, "Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers", *J. Opt. Soc. Am. B* 19, pp. 1759-1765 (2002).
- [Gifford05]: D. K. Gifford, B. J. Soller, M. S. Wolfe, M. E. Froggatt, "Distributed fiber-optic temperature sensing using Rayleigh backscatter", *ECOC 2005 Proceedings*, Vol. 3, Paper We.4.P.005, (2 pp), (2005)
- [Glisic02]: B. Glisic, D. Inaudi, C. Nan, "Piles monitoring during the axial compression, pullout and flexure test using fiber optic sensors", *Proceedings of the 81<sup>st</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board*, pp. 2701-2710, (2002).
- [Goldman04]: E. R. Goldman, A. R. Clapp, G. P. Anderson, H. T. Uyeda, J. M. Mauro, I. L. Medintz, and H. Mattoussi, "Multiplexed toxin analysis using four colors of quantum dot fluororeagents", *Analytical Chemistry*, Vol. 76, pp. 684-688, 2004.
- [Grattan00]: K. T. V. Grattan, T. Sun, "Fiber optic sensor technology: an overview", *Sensors and Actuators A*, Vol. 82, pp. 40-61, (2000).
-

[Haran98]: F. M. Haran, J. K. Rew and P. D. Foote, “A strain-isolated fibre Bragg grating sensor for temperature compensation of fibre Bragg grating strain sensors”, *Meas. Sci. Technol.* 9, pp. 1163-1166 (1998).

[Hill 78]: K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, “Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication”, *Applied Physics Letters*, Vol. 32, No. 10, pp. 647-649 (1978).

[Horiguchi89]: T. Horiguchi, M. Tateda, “Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave”, *Optical Letters*, Vol. 14, pp. 408-410, (1989).

[Horiguchi90]: T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda, “A technique to measure distributed strain in optical fibers”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 2, No. 5, pp. 352-354 (1990).

[Hotate02]: K. Hotate, M. Tanaka, “Distributed fiber Brillouin strain sensing with 1-cm spatial resolution by correlation-based continuous-wave technique”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, No. 2, pp.179-181, (2002).

[Huang10]: Y. Huang, T. Wei, Z. Zhou, Y. Zhang, G. Chen, H. Xiao, “An extrinsic Fabry-Perot interferometer-based large strain sensor with high resolution”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, 105308 (8pp), (2010).

[Hwang10]: D. Hwang, D. J. Yoon, I. B. Kwon, D. C. Seo, Y. Chung, “Novel auto-correction method in a fiber-optic distributed-temperature sensor using reflected anti-Stokes Raman scattering”, *Optics Express*, Vol. 18, No. 10, pp. 9747-9754, (2010).

[Inaudi97]: D. Inaudi, “Fiber optic sensor network for the monitoring of civil engineering structures”, Tesis doctoral. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (1997).

[Inaudi02]: D. Inaudi, A. Rufenacht, B. V. Arx, H. P. Noher, S. Vurpillot, B. Glisic, “Monitoring of a concrete arch bridge during construction”, *Proceedings of SPIE: Smart Structures and Materials and Non-destructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics*, Vol. 4696, pp. 146-153, (2002).

[Jasieniak07]: J. Jasieniak, J. Pacifico, R. Signorini, A. Chiasera, M. Ferrari, A. Martucci, P. Mulvaney, “Luminescence and amplifier stimulated emission in CdSe-ZnS-nanocrystal-doped TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> waveguides”, *Advanced Functional Materials*, Vol. 17, No. 10, pp. 1654-1662, (2007).

[Jin00]: Z. Jin, Y. Su, Y. Duan, “An improved optical pH sensor based on polyaniline”, *Sensors and Actuators B* 71, pp. 118-122 (2000).

[Jin11]: W. Jin, L. Wu, Y. Song, J. Jiang, X. Zhu, D. Yang, C. Bai, “Continuous intra-arterial blood pH monitoring by a fiber-optic fluorosensor”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 58, No. 5, pp.1232-1238, (2011).

- 
- [Kee99]: H. H. Kee, G. P. Lees, T. P. Newson, “1.65  $\mu\text{m}$  Raman-based distributed temperatures sensor”, *Electronic Letters*, Vol. 35, pp. 1869-1870, (1999).
- [Kersey97]: A. D. Kersey, M. A. Davis, et al., “Fiber grating sensors”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, pp. 1442-1463 (1997).
- [Kesavan10]: K. Kesavan, K. Ravisankar, S. Parivallal, P. Sreehlyam, S. Sridhar, “Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete”, *Measurement*, Vol. 43, pp. 157-163 (2010).
- [Kimura01]: A. Kimura, E. Takada, K. Fujita, M. Nakazawa, H. Takahashi, S. Ichige, “Application of a Raman distributed temperature sensor to the experimental fast reactor JOYO with correction techniques”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, pp. 966-973, (2001).
- [Klimov03]: V. I. Klimov, “Nanocrystal quantum dots: from fundamental photophysics to multicolor lasing”, *Los Alamos Science*, No. 28, 2003.
- [Kuang01]: K. S. C. Kuang, R. Kenny, M. P. Whelan, W. J. Cantwell, P. R. Chalker, “Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials”, *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 1379-1387 (2001).
- [Kurashima90]: T. Kurashima, T. Horiguchi, M. Tateda, “Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers”, *Optics Letters*, Vol. 15, No. 18, pp. 1038-1040, (1990).
- [Lee02]: S. T. Lee, B. Aneeshkumar, P. Radhakrishnan, C. P. G. Vallabhan, V. P. N. Nampoore, “A microbent fiber optic pH sensor”, *Optics Communications*, Vol. 205, pp. 253-256, (2002).
- [Leng03]: J. Leng, A. Asundi, “Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 103, pp. 330-340, (2003).
- [Lin04]: Y. B. Lin, J. C. Chern, et al., “The utilization of fiber Bragg grating sensors to monitor high performance concrete at elevated temperatures”, *Smart Mater. Struct.* 13, pp. 784-790 (2004).
- [Lin05]: Y. B. Lin, C. L. Pan, Y. H. Kuo, K. C. Chang, J. C. Chern, “Online monitoring of highway bridge construction using fiber Bragg grating sensors”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, pp. 1075-1082 (2005).
- [Liou97]: C. L. Liou, L. A. Wang, M. C. Shih, T. J. Chuang, “Characteristics of hydrogenated fiber Bragg gratings”, *Appl. Phys. A* 64, pp. 191-197 (1997).
- [López11]: J. M. López-Higuera, L. Rodríguez, A. Quintela, A. Cobo, “Fiber optic sensors in structural health monitoring”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 4, pp. 587-608 (2011).
-

[MacCraith95]: B. D. MacCraith, C. M. McDonagh, et al., “Sol-gel coatings for optical chemical sensors and biosensors”, *Sensors and Actuators B* 29, pp. 51-57 (1995).

[Marcos96]: S. de Marcos, O. S. Wolfbeis, “Optical sensing of pH based on polypyrrole films”, *Analytica Chimica Acta* 334, pp. 149-153 (1996).

[Miled02]: O. B. Miled, H. B. Ouada, J. Livage, “pH sensor based on a detection sol-gel layer onto optical fiber”, *Materials Science and Engineering C* 21, pp. 183-188 (2002).

[Minardo12]: A. Minardo, R. Bernini, L. Amato, L. Zeni, “Bridge monitoring using Brillouin fiber-optic sensors”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, No. 1, pp.145-150, (2012).

[Mukundan09]: H. Mukundan, A. Anderson, W. K. Grace, K. M. Grace, N. Hartman, J. S. Martinez, B. I. Swanson, “Waveguide-based biosensors for pathogen detection”, *Sensors*, Vol. 9, pp. 5783-5809, (2009).

[Murphy91]: K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. M. Vengsarkar, R. O. Claus, “Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors”, *Optics Letters*, Vol. 16, No. 4, pp. 273-275 (1991).

[Nivens98]: D. A. Nivens, Y. Zhang and S. M. Angel, “A fiber-optic pH sensor prepared using a base-catalyzed organo-silica sol-gel”, *Analytica Chimica Acta* 376, pp. 235-245 (1998).

[Popa09]: A. M. Popa, B. Wenger, E. Scolan, G. Voirin, H. Heinzlmann, R. Pugin, “Nanostructured waveguides for evanescent wave biosensors”, *Applied Surface Science*, Vol. 256S, pp. S12-S17, (2009).

[Sang08]: A. K. Sang, M. E. Froggatt, D. K. Gifford, S. T. Kreger, B. D. Dickerson, “One centimeter measurements in a nuclear reactor using Rayleigh scatter in optical fiber”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 8, No. 7, pp. 1375-1380, (2008).

[Sepúlveda06]: B. Sepúlveda, J. S. del Río, M. Moreno, F. J. Blanco, K. Mayora, C. Domínguez, L. M. Lechuga, “Optical biosensor microsystems based on the integration of highly sensitive Mach-Zehnder interferometers devices”, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol. 8, pp. S561-S566, (2006).

[Silva05]: M. F. da Silva et al., “Optical fiber pH sensor”, *Patente de Estados Unidos*. Pub. No. US2005/0265649 A1 (2005).

[Smith99]: J. Smith, M. DeMerchant, A. Brown, X. Bao, “Simultaneous distributed strain and temperature measurement”, *Applied Optics*, vol. 38, pp. 5372-5377, (1999).

[Song08]: K. Y. Song, W. Zou, Z. He, K. Hotate, “All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in polarization-maintaining fiber”, *Optics Letters*, Vol. 33, pp. 926-928, (2008).

- 
- [Szekacs09]: A. Szekacs, N. Adanyi, I. Szekacs, K. Majer-Baranyi, I. Szendro, “Optical waveguide light-mode spectroscopy immunosensors for environmental monitoring”, *Applied Optics*, Vol. 48, pp. B151-B158, (2009).
- [Tomczak09]: N. Tomczak, D. Janczeuski, M. Han, and J. Vancso, “Designer polymer-quantum dot architectures”, *Progress in Polymer Science*, Vol. 34, No. 5, pp. 393-430, 2009.
- [Triques06]: A. L. C. Triques, S. M. M. Quintero, et al., “Fiber Bragg grating pH sensing technique”, paper TuE94, 18<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, Cancún, México (2006).
- [Uddin08]: M. A. Uddin, H. P. Chan, “Materials and process optimization in the reliable fabrication of polymer photonic devices”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 10 (1), pp. 1-17, (2008).
- [Vries97]: M. de Vries, V. Arya, S. Meller, S. F. Masri, R. O. Claus, “Implementation of EFPI-based optical-fiber sensor instrumentation for the NDE of concrete structures”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, pp. 69-79, (1997).
- [Washburn09]: A. L. Washburn, L. C. Gunn, R. C. Bailey, “Label-free quantitation of a cancer biomarker in complex media using silicon photonic microring resonators”, *Analytical Chemistry*, Vol. 81, No. 22, pp. 9499-9506, (2009).
- [Whelan02]: M. P. Whelan, D. Albrecht, A. Capsoni, “Remote structural monitoring of the cathedral of Como using an optical fiber Bragg sensor system”, *Proceedings of SPIE: Smart Structures and Materials and Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics*, Vol. 4694, pp. 242-252 (2002).
- [Wong07]: A. C. L. Wong, P. A. Childs, R. Berndt, T. Macken, G. D. Peng and N. Gowripalan, “Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors”, *Cement & Concrete Composites* 29, pp. 490-497 (2007).
- [Yin11]: M. Yin, B. Gu, Q. Zhao, J. Qian, A. Zhang, Q. An, S. He, “Highly sensitive and fast responsive fiber-optic modal interferometric pH sensor based on polyelectrolyte complex and polyelectrolyte self-assembled nanocoating”, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, Vol. 399, pp. 3623-3631, (2011).
- [Yoo11]: W. J. Yoo, J. Y. Heo, K. W. Jang, J. K. Seo, J. S. Moon, J.-Y. Park, B. G. Park, S. Cho, B. Lee, “Measurements of spectral responses for developing fiber-optic pH sensors”, *Optical Review*, Vol. 18, No.1, pp. 139-143, (2011).
- [Zamarreño07]: C. R. Zamarreño, J. Bravo, J. Goicoechea, I. R. Matias and F. J. Arregui, “Response time enhancement of pH sensing films by means of hydrophilic nanostructured coatings”, *Sensors and Actuators B* 128, pp. 138-144 (2007).
-

[Zamarreño11]: C. R. Zamarreño, M. Hernáez, I. del Villar, I. R. Matías, F. J. Arregui, “Optical fiber pH sensor based on lossy-mode resonances by means of thin polymeric coatings”, *Sensors and Actuators B*, Vol. 155, pp. 290-297, (2011).

[Zhou03]: Z. Zhou, T. W. Graver, L. Hsu, J. P. Ou, “Techniques of advanced FBG sensors: fabrication, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges”, *Pacific Science Review*, Vol. 5, pp. 116-121 (2003).

[Zou09]: W. Zou, Z. He, K. Hotate, “Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber”, *Optics Express*, Vol. 17, No. 3, pp.1248-1255, (2009).



# Capítulo 2

## Sistema de interrogación basado en correlación de pulsos

### 2.1. Introducción

Como se ha comentado en el capítulo 1, los sensores ópticos se pueden clasificar en diferentes grupos si atendemos a la manera de obtener las medidas. Los sensores puntuales consisten en la medida puntual de una magnitud física en una determinada localización. La técnica de sensado puntual más popular es la basada en redes de difracción de Bragg en fibra (en adelante FBG, *Fiber Bragg Grating*) [Othonos99], aunque existen otras técnicas de medida puntual como por ejemplo las basadas en cavidades Fabry-Pérot [Jiang08] o en sensores de intensidad [Udd11]. La principal desventaja de los sensores puntuales es la falta de medidas en aquellos puntos que se encuentran entre sensores.

Por otro lado, existen los sensores distribuidos, que consisten en un enlace de fibra óptica capaz de medir de forma continuada en tramos de diferentes longitudes,

desde decenas de centímetros hasta cientos de kilómetros [Song11, Zornoza10]. Las técnicas más utilizadas para el sensado distribuido son las basadas en dispersión estimulada de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*) [Horiguchi90, Hotate11], en dispersión estimulada de Raman [Lancaster95] y en reflectometría óptica en el dominio del tiempo [Luo99, Lu11]. Sin embargo, estas técnicas presentan las desventajas de un complicado manejo de la información y un tiempo de respuesta lento. Además, suelen tener un mayor requerimiento de potencia óptica de entrada, ya que la distancia de medida está fuertemente limitada por la relación señal a ruido de la señal reflejada.

En este apartado se demuestra un nuevo sistema de sensado cuasi distribuido sencillo, compacto y modular, con la característica de sensado en múltiples regiones. Este sistema ha sido desarrollado conjuntamente con la Universidad de Tecnología de Kochi (en adelante KUT, *Kochi University of Technology*) en Japón, a raíz del concepto desarrollado por el grupo de Koji Nonaka [Nonaka99] para el monitorizado del tiempo de retardo de pulsos y el esquema de control para su compensación en transmisiones de datos multiplexadas en el dominio del tiempo (OTDM, *Optical Time Domain Reflectometry*).

El sistema que se presenta en este capítulo tiene como ventaja la posibilidad de sensado en diferentes regiones de una zona a monitorizar de forma dinámica, con una alta resolución y un largo alcance. Además, este sistema también dispone de sensores puntuales para la identificación de regiones, por lo que se puede considerar un sistema de sensado híbrido. Destacar también que el sistema propuesto no utiliza electrónica de alta velocidad, lo que permite que el sistema sea de bajo coste. La desventaja de este sistema radica en el rango de medida de deformación que en este caso es dependiente de la longitud de las regiones a monitorizar, como se explicará más adelante. Esto supone que cuanto mayor sea el rango de deformación que necesita medirse, mayor será la limitación en longitud de las regiones.

En este capítulo, se presenta primero una explicación teórica del sistema de sensado mediante correlación de pulsos. Posteriormente, se muestran los montajes experimentales para dos opciones diferentes de medida de regiones con ausencia de interferencias usando dos técnicas diferentes de separación de regiones. Por último, se llevará a cabo una comparación de las técnicas de separación de regiones mediante longitud de onda y mediante intensidad y se presentarán las conclusiones acerca de este sistema.

## 2.2. Explicación teórica del sistema

### 2.2.1. Principio básico

En este apartado se procede a explicar el principio de funcionamiento básico del sistema de monitorización presentado. El funcionamiento del sistema se basa en la medida de la correlación de unos pulsos de monitorización con unos pulsos de

referencia. Los pulsos ópticos de monitorización son inyectados en la zona que se quiere monitorizar mientras que los pulsos de referencia no sufren ningún efecto externo y son transmitidos por una fibra óptica de referencia (Figura 2.1). En concreto, se quieren obtener las deformaciones sufridas por una determinada zona a monitorizar. Para ello se ha de hacer un seguimiento de la variación de la separación temporal ( $\delta$ ) existente entre los pulsos de monitorización y de referencia (ver Figura 2.2). Esta separación temporal tiene un valor determinado que depende de los instantes temporales en los que los pulsos de monitorización y referencia llegan al sistema de medición. Para poder medir la deformación que sufre la zona a monitorizar no importa el valor de dicha separación temporal, sino que se ha de hacer un seguimiento a la variación de dicha separación temporal, ya que una deformación  $\varepsilon$  en la fibra instalada en la zona a monitorizar provocará un incremento en la longitud de la misma  $\Delta l$  que se verá reflejado en un incremento temporal  $\Delta\delta$  que tardan los pulsos en atravesar esa fibra, tal y como muestra la ecuación (2.1).

$$\Delta\delta = \frac{\Delta l}{c/n} \quad (2.1)$$

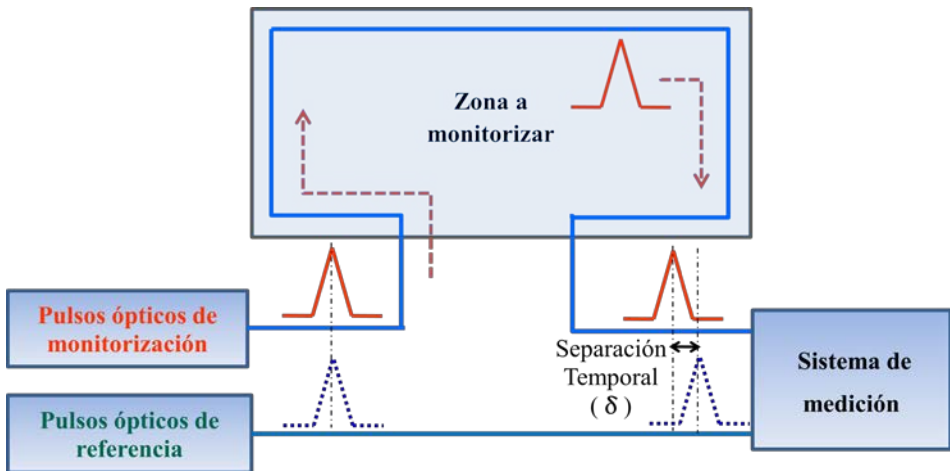


Figura 2.1. Principio básico de funcionamiento del sistema.

Tal y como puede verse en la Figura 2.2, una variación en la longitud de la fibra óptica de monitorización conlleva un aumento de la separación temporal entre pulsos, siendo el valor resultante  $\Delta\delta+\delta$ . Este hecho supone una variación del solape entre los pulsos, que finalmente se verá reflejado en la medida de la correlación entre ambos pulsos. En la izquierda de la figura 2.2 se muestra la posición temporal de los pulsos de monitorización y de referencia con las fibras en reposo y a la derecha se puede ver la posición temporal cuando la fibra de monitorización sufre una deformación de tracción, de modo que el pulso de monitorización sufre un incremento temporal  $\Delta\delta$  en el paso de la fibra cuyo valor viene determinado por la ecuación (2.1).

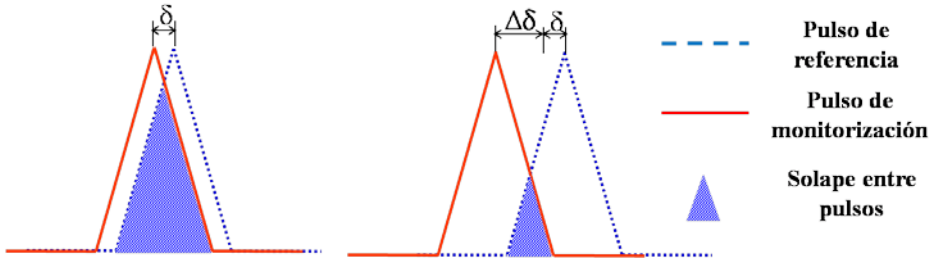


Figura 2.2. Efecto en el solape entre pulsos debido a la variación de la separación temporal entre los pulsos de monitorización y referencia.

Los pulsos de monitorización y de referencia llegan entonces al sistema de medición, que es el dispositivo encargado de medir la correlación entre ambos pulsos. Este dispositivo se denomina *unidad correladora de pulsos* y fue desarrollado en colaboración con la KUT. El interior de esta unidad cuenta con dos etapas principales: la primera etapa es un combinador de pulsos, que a su vez consta de tres elementos: un divisor de pulsos (*pulse splitter*, PS), un espejo (*halfmirror*, HM) y un separador de polarización (*polarization beam splitter*, PBS). La segunda etapa de la unidad consiste en un par de generadores de segundo armónico (*second harmonic generator*, SHG), dos fotodiodos de avalancha (*avalanche photodiode*, APD) para la conversión de señal óptica a señal eléctrica y dos amplificadores

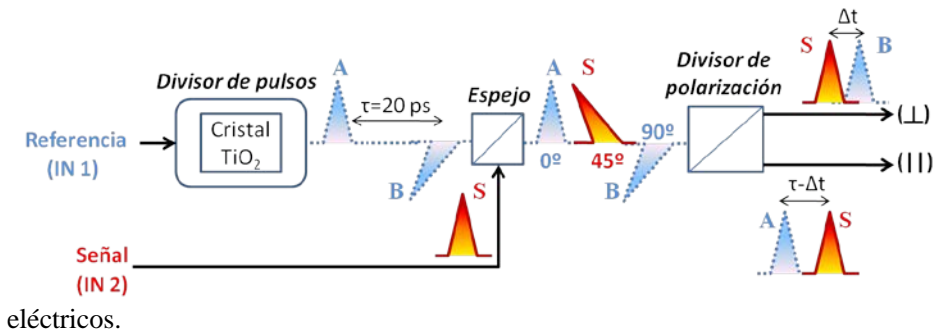


Figura 2.3. Esquema interno del combinador de pulsos.

En la Figura 2.3 se muestra en detalle el funcionamiento de la primera etapa de la unidad correladora de pulsos, es decir, el combinador de pulsos. Se aprecia como el pulso de referencia entra a un cristal birrefringente hecho de rutilo (estructura tetragonal de TiO<sub>2</sub>), de modo que las polarizaciones ortogonales lo atraviesan a diferente velocidad. Como resultado, se produce una separación temporal ( $\tau$ ) de 20 ps entre ambas polarizaciones (pulsos A y B). Posteriormente, se introduce mediante un espejo el pulso de señal de monitorización (pulso S) después de atravesar la zona a monitorizar, de modo que se combina con los pulsos de referencia quedando en una posición temporal intermedia y con un ángulo de 45°. En la última etapa se divide la señal en dos puertos: uno con la combinación del

pulso B con la proyección perpendicular ( $\perp$ ) de S y otro con el pulso A y la proyección paralela ( $\parallel$ ) de S. Puesto que el pulso S ha de combinarse por igual con los pulsos A y B, es importante que éste tenga un ángulo de polarización de  $45^\circ$ , por lo que se hace necesario el control de la polarización de la señal en esta etapa. La separación temporal entre el pulso de monitorización S y el pulso B es de un valor  $\Delta t$ , por lo que la separación temporal entre el pulso A y el pulso S es de  $\tau - \Delta t$ . La integración completa de todos estos elementos se ha llevado a cabo en un módulo de tan solo diez centímetros cúbicos

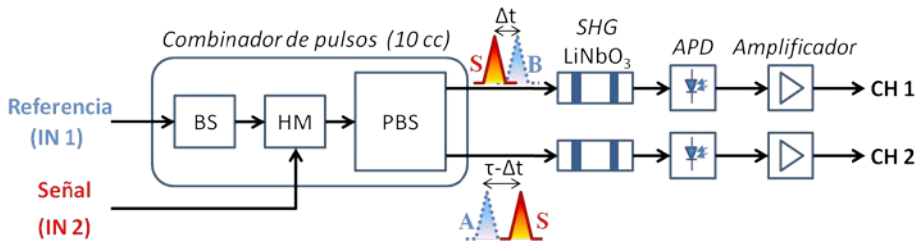


Figura 2.4. Esquema interno de la Unidad Correladora de Pulsos.

En la Figura 2.4 se puede apreciar la conexión del combinador de pulsos con la etapa SHG/APD y amplificadores. La generación de segundo armónico se ha conseguido mediante unos cristales de niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ), de modo que la amplitud de la señal de salida de estos cristales es proporcional a la separación temporal de los pulsos de entrada. Después de cada cristal hay un APD de banda estrecha para la conversión de la señal de óptico a eléctrico seguido de un amplificador eléctrico. Finalmente, a la salida de la unidad correladora de pulsos se coloca un restador para obtener una salida diferencial del sistema (OUT), como se muestra en la Figura 2.5. Puesto que esta señal es la resta de la señal del canal 1 (CH 1) y del canal 2 (CH 2), la intensidad de la misma dependerá de la separación temporal entre los pulsos de ambos canales gracias a la etapa SHG. Esta separación temporal es  $\Delta t - (\tau - \Delta t) = 2\Delta t - \tau$ . De este modo incrementamos la sensibilidad del sistema al doble y aislamos la influencia de las fluctuaciones de potencia de la fuente sobre la señal de salida.

Cabe destacar que la respuesta del cristal de niobato de litio no es lineal, sino que presenta un comportamiento cuadrático. En la Figura 2.6 se muestra el comportamiento de uno de estos cristales al introducirle pulsos ópticos de diferente potencia óptica media. En esta figura, los rombos representan las medidas experimentales, mientras que la línea continua corresponde al ajuste cuadrático de los datos. Puede observarse que el ajuste cuadrático de los datos es excelente. Además, puede verse como este efecto no lineal de generación de segundo armónico comienza a aparecer para una potencia óptica media de entrada superior a 0.25 mW.

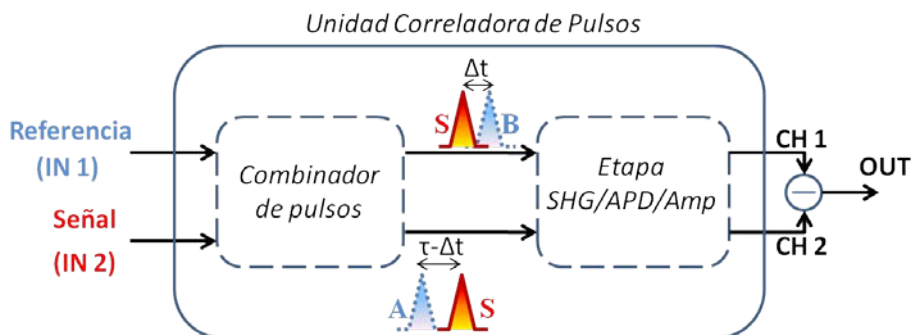


Figura 2.5. Implementación de detección diferencial a la salida de la unidad correladora de pulsos.

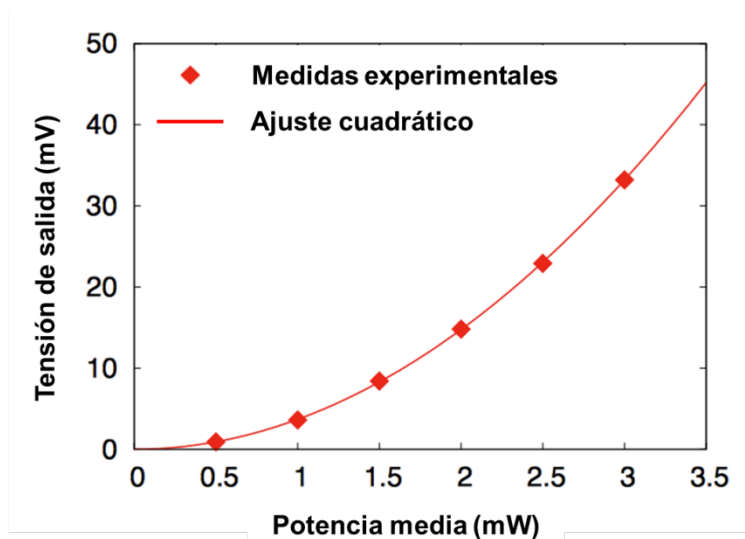


Figura 2.6. Función de transferencia del cristal de niobato de litio.

Se ha realizado también la caracterización de la etapa SHG/APD mediante la respuesta en amplitud de la señal eléctrica de salida del APD respecto del retardo temporal de los pulsos que llegan a la entrada de dicha etapa. Esta respuesta se muestra en la Figura 2.7, en donde se puede observar un máximo cuando el solape entre los pulsos de referencia y de monitorización es total (a). A medida que la separación entre los pulsos de entrada aumenta, la amplitud de salida del APD disminuye como se puede observar en los puntos (b) y (c) en la Figura 2.7.

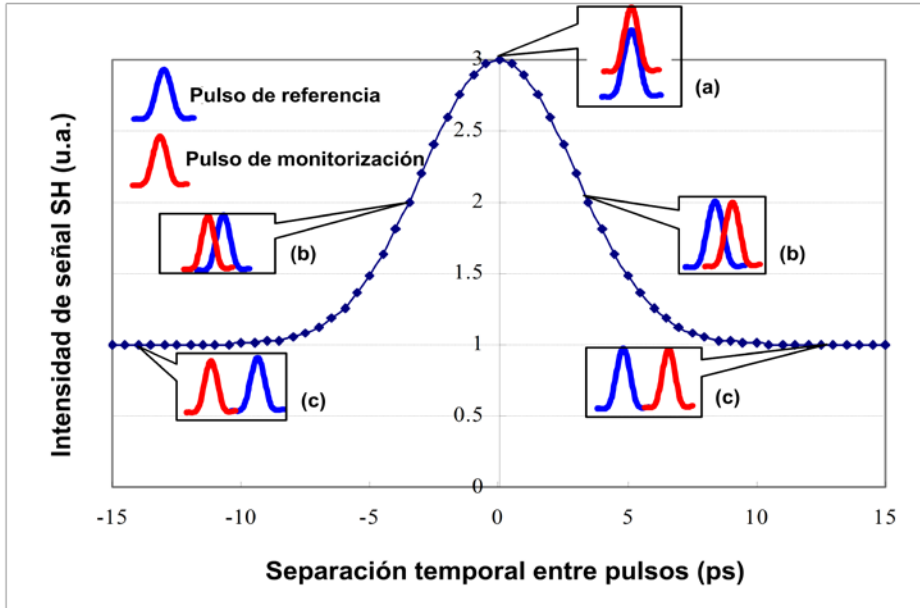


Figura 2.7. Caracterización de la etapa SHG/APD mediante la respuesta de amplitud frente a retardo.

Para obtener la curva característica del sistema completo habría que tener en cuenta que existen dos etapas SHG/APD, cada una con la respuesta mostrada en la Figura 2.7. De este modo, la pareja de pulsos formada por el pulso de referencia A y el pulso de monitorización S generan la curva SHG 1 y el pulso de referencia B y el pulso de monitorización S generan la curva SHG 2 (Figura 2.8). Los máximos de estas curvas corresponden a los instantes temporales en los que el pulso de monitorización S se solapa completamente con cada uno de los pulsos de referencia A y B, y por lo tanto las curvas están separadas  $\tau = 20$  ps. Este valor se corresponde con la separación entre polarizaciones ortogonales que introduce el cristal de rutilo en la etapa combinadora de pulsos (Figura 2.3).

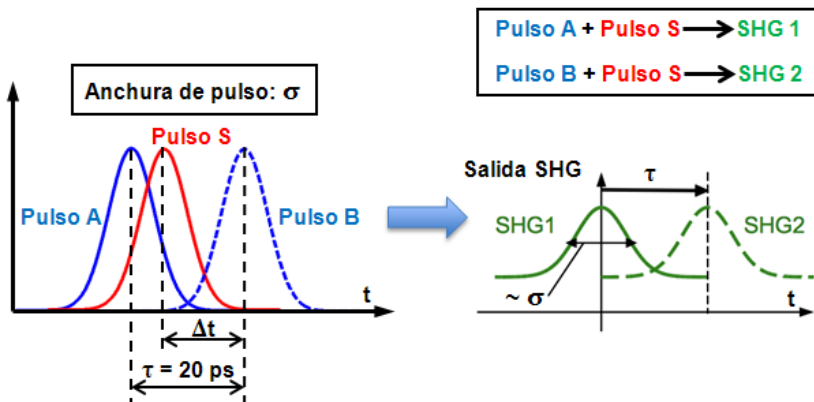
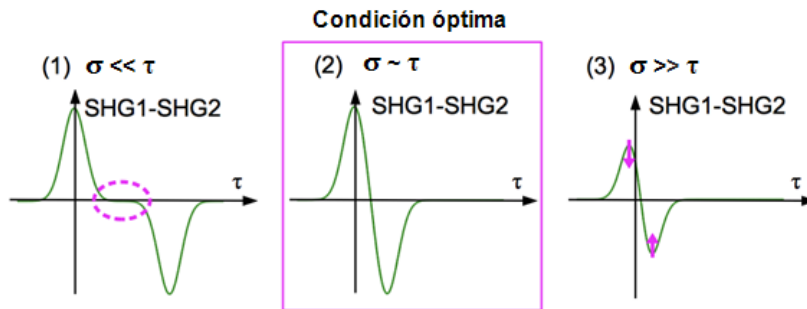


Figura 2.8. Respuesta de las dos etapas SHG/APD.



**Figura 2.9. Funcionamiento de la etapa SHG/APD con detección diferencial y curva característica del sistema.**

Dependiendo de la anchura de pulso óptico utilizado en el sistema, existen tres posibles señales de salida en la etapa de detección diferencial. En concreto, la señal de salida depende de la relación entre el ancho de pulso óptico ( $\sigma$ ) respecto de la separación temporal entre pulsos de polarizaciones ortogonales a la salida del cristal de rutilo en el combinador de pulsos ( $\tau$ ). Estos casos aparecen reflejados en la Figura 2.9. En el caso (1) en el que  $\sigma \ll \tau$ , existe una región nula entre el máximo y el mínimo de la señal, cuando lo deseable es tener una región de medida lineal y continua, tal y como ocurre en el caso (2) cuando  $\sigma$  es similar a  $\tau$ . Si se aumenta la anchura del pulso óptico de entrada al sistema de modo que  $\sigma \gg \tau$ , ocurre que disminuyen el máximo y el mínimo de la señal de salida, lo que se ve traducido en una disminución de la pendiente de esta región lineal (3), y por tanto en una pérdida de sensibilidad del sistema. El rango de medida del sistema depende de la región lineal de la curva de salida diferencial. Puesto que el máximo y el mínimo de esta curva están separados 20 ps, éste será el valor de retardo máximo medido por el sistema. Además, al tener una configuración de medida en el que las señales ópticas tienen que volver a la unidad correladora de pulsos por la misma fibra óptica, este valor máximo se ve reducido a la mitad, es decir, 10 ps. Teniendo en cuenta la velocidad de propagación en el interior de una fibra óptica, esto supone una elongación de 2 mm. Por lo tanto, la máxima deformación que se puede medir depende de la longitud total de la región a monitorizar, ya que la deformación se mide en *strain*, que es una medida relativa que relaciona la elongación de un elemento estructural respecto de su longitud original.

Finalmente, la Figura 2.10 muestra una imagen real del interior de la unidad correladora de pulsos. En su interior se observan las dos etapas de las que se compone: la primera etapa es el combinador de pulsos (compuesto por un divisor de pulsos, un espejo y un separador de polarización) cuyas dimensiones son de tan solo 10 centímetros cúbicos, como ya se ha mencionado anteriormente. También se observa la segunda etapa: los cristales de niobato de litio encargados de la generación de segundo armónico, los APD y los amplificadores. La unidad correladora de pulsos tiene dos puertos de entrada (IN 1 e IN 2) y dos puertos de salida (CH 1 y CH 2).



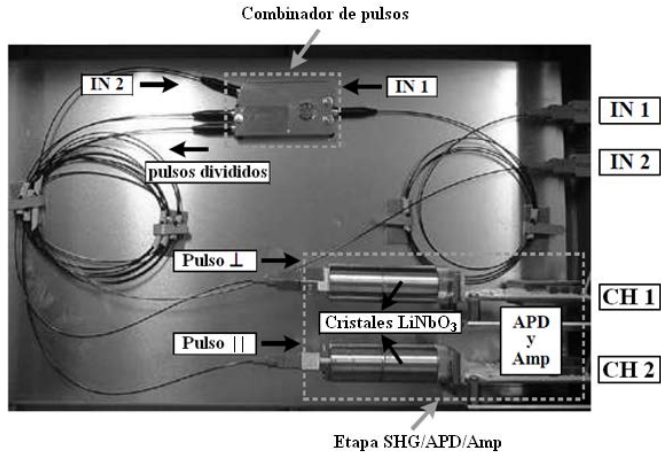


Figura 2.10. Imagen del interior de la unidad correladora de pulsos.

### 2.2.2. Separación en regiones

Una vez explicado el principio básico de funcionamiento del sistema, se introducirá la idea de separación de la zona a monitorizar en regiones. El objetivo es el de poder diferenciar en qué región se está produciendo la deformación de la fibra además de saber cuándo se produce. Un ejemplo de aplicación de esta idea sería la instalación de fibra óptica para la monitorización de la salud estructural de un puente para tráfico de vehículos. En este caso, la longitud total del puente estaría compuesta por varias secciones de una cierta longitud que serían el objeto de la monitorización. Interesaría poder conocer si la deformación que sufre el puente en un determinado momento pertenece a una sección u otra. Otro ejemplo de aplicación de la división en regiones sería la monitorización a lo largo de un gasoducto, de modo que se pueda discernir en que región de entre la gran longitud total aparece un problema de deformación excesiva que pudiera conducir a una grieta. En la Figura 2.11 se muestran estas estructuras como ejemplo de aplicación real.



Figura 2.11. Ejemplos de aplicación del sistema a estructuras reales.

En los apartados 2.3 y 2.4 se van a presentar dos técnicas distintas para llevar a cabo esta labor de separación en regiones mediante la utilización de reflectores parciales entre cada región. El primer tipo de reflector es un reflector parcial selectivo en longitud de onda (en adelante *Wavelength Selective Reflector*, WSR) y el segundo es un reflector parcial de intensidad (en adelante *Intensity Partial Reflector*, IPR).

Los WSR son unos elementos que pueden ser sintonizados en longitud de onda y que actúan como divisores del espectro, de manera que a cada región le corresponderá una porción del espectro disponible. La información de deformación de cada región se refleja en su reflector parcial correspondiente, regresando de este modo al equipo de medida. Los IPR reflejan una pequeña parte de la intensidad emitida por la fuente, de modo que el tiempo que tarda esta señal en atravesar las regiones anteriores al reflector contiene la información de la deformación ocurrida en esas regiones.

### 2.3. Separación en regiones mediante WSR

#### 2.3.1. Principio

Para conseguir una división de la longitud total de la fibra óptica en regiones hay que introducir elementos reflectores al final de la longitud de cada región para que los pulsos de monitorización atraviesen tan solo las regiones deseadas. En este apartado se aborda la técnica de separación de regiones mediante reflectores selectivos en longitud de onda (WSR).

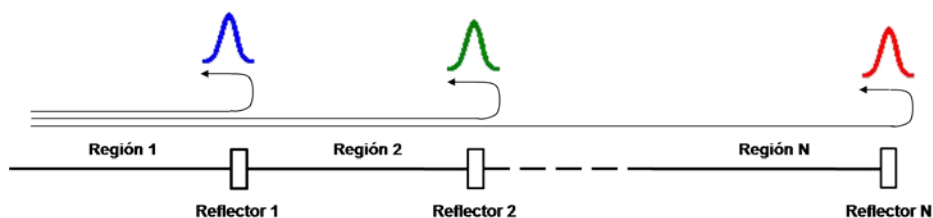


Figura 2.12. Principio de la separación en regiones mediante WSRs.

En la Figura 2.12 puede verse como el primer pulso atraviesa la región 1 y se refleja en el reflector 1. El segundo pulso es reflejado por el reflector 2, habiendo atravesado previamente las regiones 1 y 2, y así sucesivamente.

Por lo tanto hay que conseguir que la fuente óptica que genera los pulsos de monitorización sea capaz de seleccionar primero el reflector 1, luego el reflector 2 y así sucesivamente hasta el reflector N. Existen diferentes alternativas para la elección de los reflectores parciales, pero al final se ha optado por usar redes de

difracción de *Bragg* en fibra (*FiberBraggGrating*, FBG). La elección de las FBG como reflectores parciales responde principalmente a los siguientes motivos:

- Existe la posibilidad de multiplexado en longitud de onda.
- Son sensibles a la temperatura.
- Tienen una respuesta adecuada: reflexión alta a longitudes de onda deseadas.
- Facilidad de disponer de ellas al poder fabricarse en nuestro laboratorio.

La posibilidad de multiplexado en longitud de onda permite realizar la selección de todos los reflectores parciales y por tanto la interrogación de todas las regiones en una sola fibra óptica. Basta con introducir FBGs con diferentes longitudes de onda de Bragg, de modo que la fuente óptica que genera los pulsos de monitorización vaya sintonizándose en longitud de onda a las longitudes de onda de Bragg de las diferentes FBGs. Además, al ser las FBG sensibles a la temperatura [Kersey97], podemos utilizarlas como sensores de temperatura puntual en aquellos sitios donde se instalen. Al poder medir la temperatura, se puede realizar también la compensación térmica de la fibra óptica, e independizar de este modo las fluctuaciones de temperatura de las regiones a monitorizar. La utilización de FBGs como sensores puntuales de temperatura es una técnica relativamente madura y que lleva varios años ya en aplicación.

### 2.3.2. Experimento

Una vez presentado en el apartado 2.3.1 el principio básico de funcionamiento, describiremos en este apartado el montaje experimental y en el siguiente apartado los resultados extraídos de los ensayos realizados. El montaje experimental se presenta en la Figura 2.13 y a continuación se explicarán cada uno de los componentes usados en él.

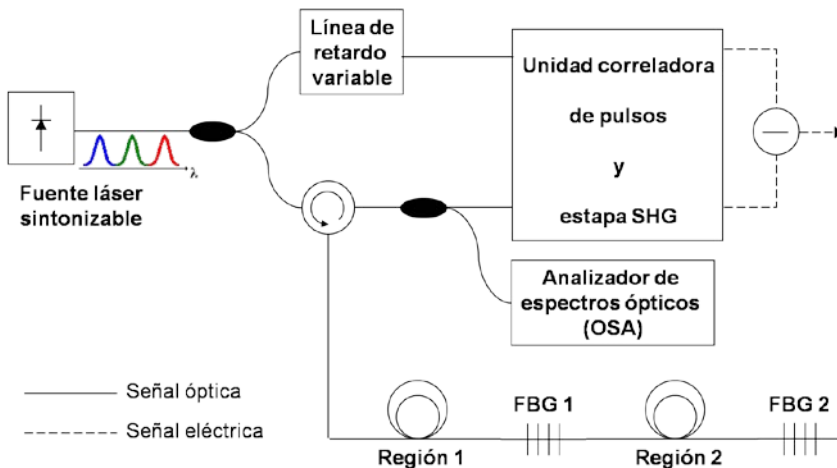
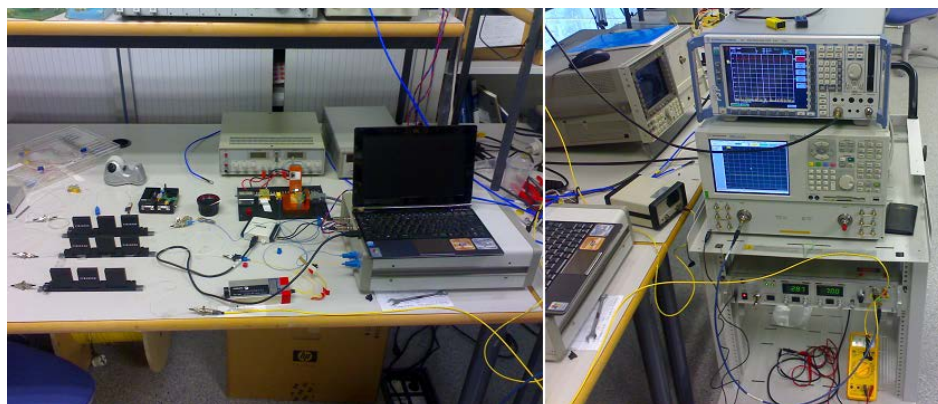


Figura 2.13. Montaje realizado para el experimento.

Se muestra en la Figura 2.14 las imágenes del montaje realizado en el laboratorio del Grupo de Comunicaciones Óticas y Cuánticas (GCOC) perteneciente al Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) en donde se realizaron todos los ensayos que se presentarán a continuación.



**Figura 2.14. Foto del montaje experimental.**

Para este montaje se necesita una fuente láser sintonizable en longitud de onda para poder seleccionar la FBG deseada. Para este ensayo se utilizó una fuente de tipo *Mode-Locked Fiber Laser* de la marca *OPTCOM* modelo CALMAR PSL-10-TT. Este láser tiene un rango sintonizable de 1530 a 1565 nm y un ancho de pulso ajustable de 1,5 a 10 ps. La tasa de repetición de pulsos viene determinada por la frecuencia de un oscilador externo que debe estar comprendida entre 5 y 11 GHz (200 ps y 90,91 ps de tasa de repetición respectivamente).

Después de la fuente láser se conectó un acoplador pasivo 1x2 de relación 10:90. Esto significa que el 10 % de la potencia óptica de la fuente iba dirigida a la rama superior y el 90 % a la inferior. El motivo de utilizar esta relación de potencias es debido a que la rama inferior presenta mayores pérdidas. Esta situación se hace más patente en situaciones reales en las que se pretenda monitorizar distancias de kilómetros con múltiples regiones, conllevando un gran número de conexiones que presentan pérdidas.

En la rama superior se conectó una línea de retardo variable. El rango de retardo disponible es de 600 ps. Otras especificaciones de este dispositivo son 0,85 dB de pérdidas de inserción y unas pérdidas de retorno de más de 50 dB. La rama inferior se conecta a un circulador óptico de tres puertos cuyas especificaciones más importantes son: pérdidas de inserción de 0.7 dB, aislamiento de 53 dB, directividad de 60 dB y pérdidas de retorno de 54 dB.

El puerto 2 del circulador óptico está conectado a la denominada zona de monitorización. En un caso práctico, esta zona sería la estructura que se desea monitorizar y estaría compuesto por varios enlaces de fibra óptica separados por FBG con longitudes de onda de *Bragg* diferentes unas de otras. Para el caso

experimental en laboratorio, hemos utilizado dos tramos de fibra óptica monomodo estándar (SMF-28 de la empresa *Corning*) de 48,5 cm y 54,8 cm de longitud (Región 1 y Región 2 respectivamente) y dos FBG centradas en 1548,9 nm (FBG 1) y 1545,8 nm (FBG 2). Los extremos de los tramos de fibra óptica se fijaron en un sistema de posicionamiento milimétrico para posibilitar el posterior estiramiento de dicha fibra en los ensayos de deformación que se llevaron a cabo. Una imagen de este montaje se muestra en la Figura 2.15.



**Figura 2.15.** Fibras ópticas usadas como regiones de monitorización instaladas sobre un sistema de posicionamiento milimétrico.

Los espectros de las FBG se muestran en la Figura 2.16. Como puede verse, se utilizaron FBG con un perfil de apodización gaussiano. Otras características de las FBG utilizadas son: reflectividad del 80 % y un ancho de banda a -3 dB de 0,28 nm y 0,26 nm para las FBG 1 y FBG 2 respectivamente.

Finalmente, el puerto 3 del circulador óptico se conecta a un acoplador pasivo 1x2 de modo que una de las salidas se conecta a un analizador de espectros ópticos (OSA) y la otra a la unidad de correlación de pulsos. El OSA sirve para el seguimiento de la variación de la longitud de onda central de las FBG, ya que ésta está relacionada con la variación de temperatura a la que se ven sometidas.

A la unidad de correlación de pulsos le llegan por tanto dos entradas: una es la fibra óptica de referencia que llega desde la línea de retardo y la otra es la fibra óptica de monitorización que atraviesa el circulador y llega desde el acoplador mencionado anteriormente. A la salida de la unidad correladora de pulsos hay dos puertos denominados *Canal 1* (CH 1) y *Canal 2* (CH 2).

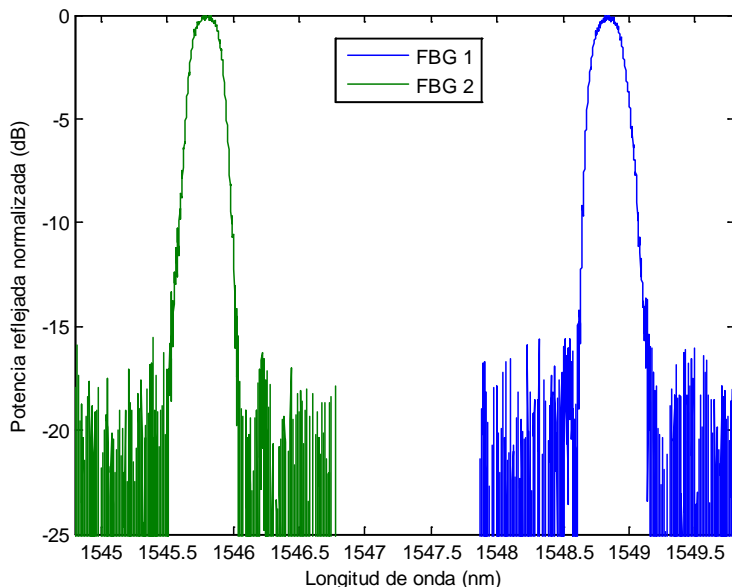


Figura 2.16. Espectro de las FBG utilizadas en el experimento.

Finalmente, se conectó un módulo de adquisición de datos situado después de la detección de las señales ópticas provenientes de las salidas de la unidad de correlación de pulsos por el puerto de salida 1 (CH 1) y el puerto de salida 2 (CH 2). El módulo utilizado en estos experimentos es el *National Instruments* USB-6008. Este módulo dispone de 8 entradas (o 4 diferenciales) analógicas a 12 bits con una frecuencia de muestreo de hasta 10 KS/s, con un rango de la señal de entrada desde  $\pm 1$  V hasta  $\pm 20$  V. Se utilizaron las entradas diferenciales de forma que el módulo actuaba de restador, siendo la señal de salida la resta de las dos señales de entrada.

### 2.3.3. Resultados experimentales

Una vez que se ha explicado el montaje del experimento así como los diferentes dispositivos que lo componen, se procede en este apartado a comentar la configuración de los dispositivos y los resultados experimentales que se obtuvieron en los diferentes ensayos que se realizaron. En este punto hay que mencionar que para la captura y manejo de los datos provenientes del módulo de adquisición de datos se desarrolló un software en el lenguaje de programación *LabVIEW* versión 8.5 cuyo panel frontal se muestra en la Figura 2.17. Por medio de este software se podían visualizar y guardar en disco los valores de voltaje de salida provenientes del Canal 1 (CH1) y del Canal 2 (CH2) de la unidad correladora de pulsos, así como la señal diferencial de ambas (CH 1 – CH 2) a la salida del módulo de adquisición de datos.

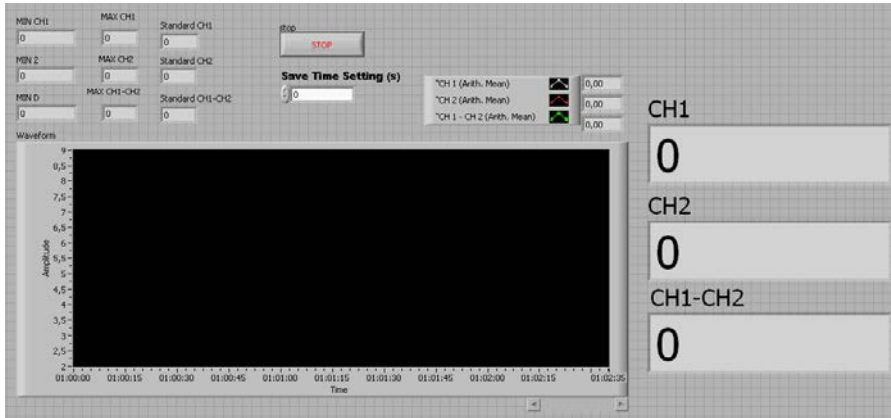


Figura 2.17. Panel frontal del software desarrollado para la captura de datos.

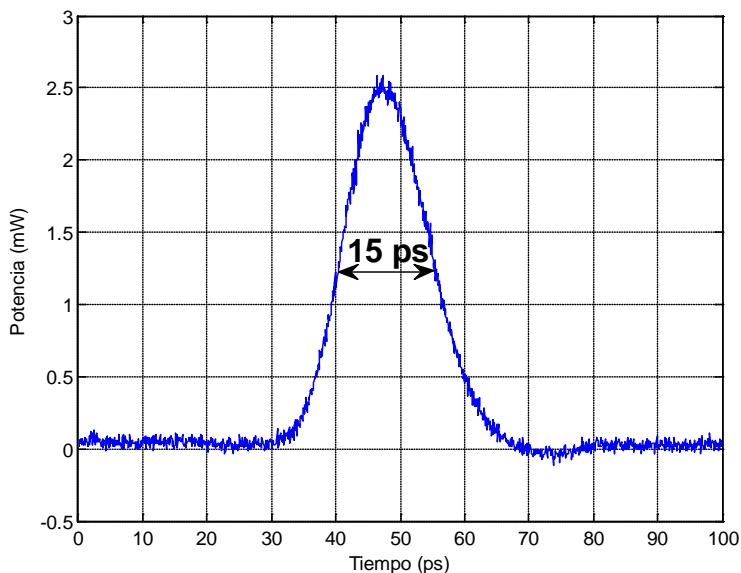
Para los experimentos realizados en este trabajo se conectó a la fuente óptica un oscilador externo sintonizado a 9,956104 GHz, lo que supone una tasa de repetición de pulsos de 100,4 ps. El motivo de utilizar esta frecuencia es que se necesita una tasa de repetición de pulsos mayor de 20 ps para cubrir la separación temporal de los pulsos ortogonales A y B en los que se divide el pulso de referencia y entre los que se intercala el pulso de monitorización, y menor de 600 ps que es el retardo máximo de la línea de retardo óptica disponible. La anchura de los pulsos medida a -3 dB fue de  $\sigma_{\text{meas}} = 15$  ps tal y como muestra una captura tomada por el osciloscopio que se muestra en la Figura 2.18. Cabe recordar que el osciloscopio introduce una desviación en la medida de  $\sigma_{\text{dev}} = 7,7$  ps por lo que la medida de la anchura de pulso ha de ser corregida según la ecuación (2.2), resultando en una anchura de pulso real de  $\sigma_{\text{opt}} = 12,9$  ps

$$\sigma_{\text{opt}} = \sqrt{\sigma_{\text{meas}}^2 - \sigma_{\text{dev}}^2} = \sqrt{(15 \text{ ps})^2 - (7,7 \text{ ps})^2} = 12,9 \text{ ps} \quad (2.2)$$

Siendo  $\sigma_{\text{meas}}$  la anchura medida directamente por el osciloscopio, y  $\sigma_{\text{opt}}$  la anchura real del pulso óptico. La potencia óptica de salida medida fue de 3,4 dBm.

La fuente estaba sintonizada en primer lugar en una longitud de onda central de 1548,9 nm, la misma longitud de onda central que la FBG 1. Al hacer esto estamos seleccionando para monitorizar tan solo la región 1. El espectro de la fuente láser se muestra en la Figura 2.19. Se aprecia el espectro típico de una fuente láser de tipo *Mode-Locked* cuando está en estado de oscilación. Se pueden observar unas resonancias cuya separación espectral depende de la frecuencia del oscilador externo. El valor de esta separación viene determinado por:

$$\Delta\lambda = \Delta f \frac{\lambda^2}{c} = 9,956104 \cdot 10^9 \text{ Hz} \frac{(1548,9 \cdot 10^{-9} \text{ m})^2}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 79,6 \text{ pm} \quad (2.3)$$



**Figura 2.18. Pulso óptico medido a la salida de la fuente láser. Pulso real ensanchado por el osciloscopio de medida.**

En esta configuración, si movemos la línea de retardo variable haremos que la posición temporal del pulso de referencia cambie. De este modo, el solape con el pulso de monitorización cambiará y a la salida tendremos un valor diferente. En concreto, y teniendo en cuenta la Figura 2.4, si aumentamos el retardo del pulso de referencia el solape del pulso B con S aumentará, pero el solape de A con S disminuirá, por lo que a la salida tendremos un voltaje mayor. Si por el contrario disminuimos el retardo, el solape de B con S decrecerá y el solape de A con S crecerá y por lo tanto, tendremos a la salida un voltaje menor.

Si hacemos un barrido con la línea de retardo variable con retardos desde los 0 ps hasta los 230 ps aproximadamente, obtenemos una curva como la mostrada en la Figura 2.20. En el eje de abscisas se representa el valor de la línea de retardo óptico, mientras que en el eje de ordenadas se representa el voltaje diferencial de salida del circuito. Como la tasa de repetición de pulsos de la fuente láser es de 100,4 ps, éste será el periodo de la forma de onda de la función en dicha figura. El máximo de esta curva corresponde al retardo necesario para que el solape entre el pulso S y el pulso B sea total, de manera que no hay solape del pulso S con el pulso A. Por el contrario, el mínimo de la curva corresponde al retardo que hace que el solape del pulso S con el pulso A sea total, siendo el solape del pulso con el pulso S con el pulso B nulo. Los cruces de la curva por la línea de abscisas pertenecen al retardo que hace que el solape entre los pulsos S y A, y los pulsos S y B sean iguales, por lo que al hacer detección diferencial, se obtienen 0 mV a la salida.



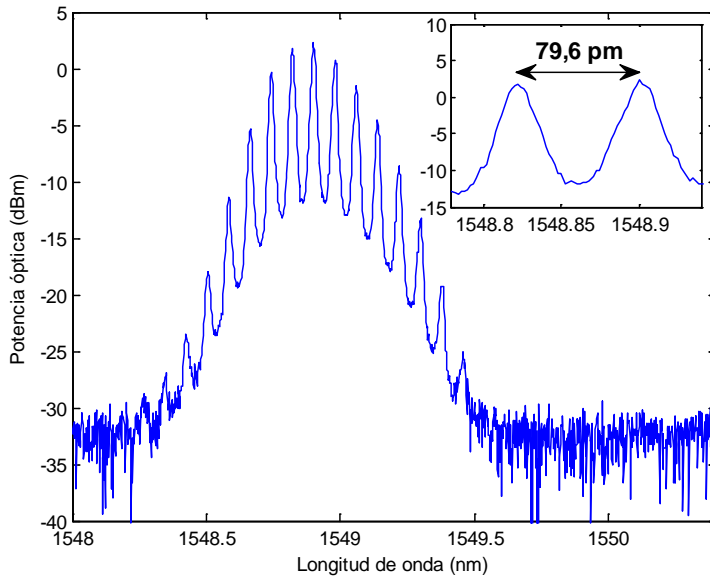


Figura 2.19. Espectro de la fuente óptica sintonizada en 1548,9 nm para seleccionar la FBG número 1.

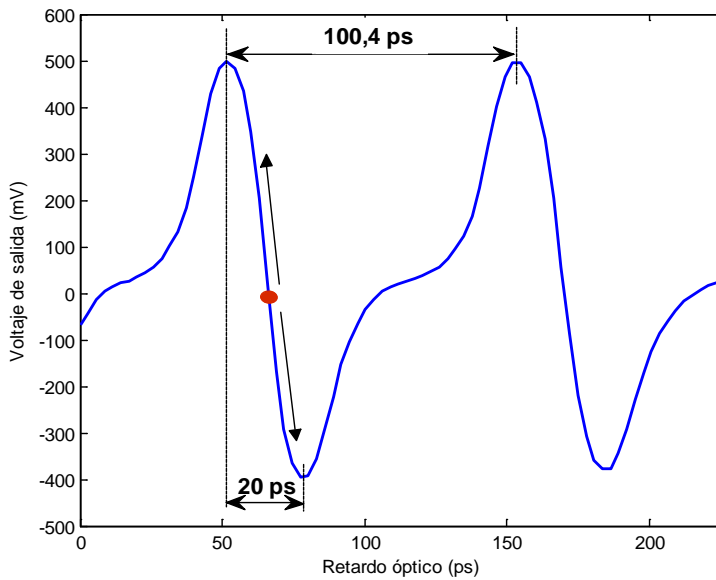
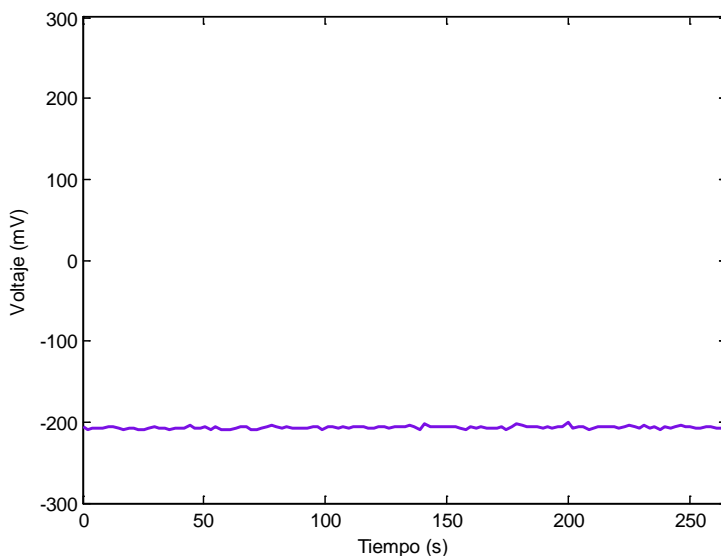


Figura 2.20. Forma característica de la señal eléctrica diferencial a la salida del sistema.

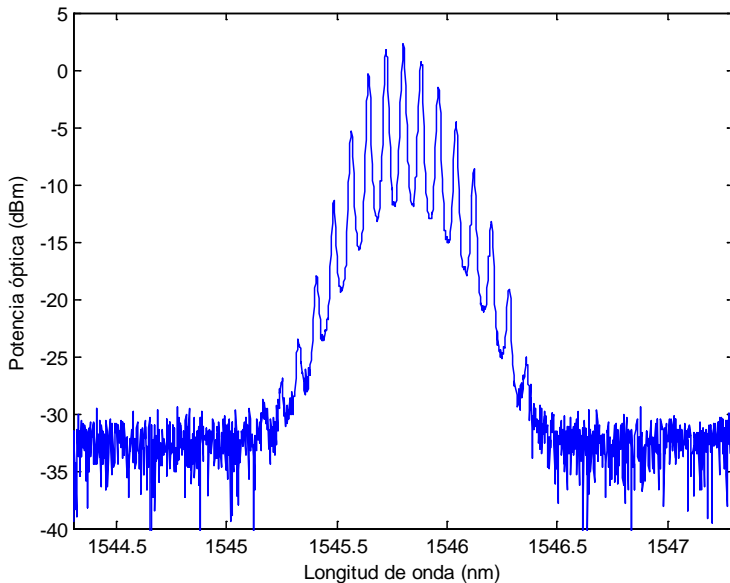
Si se quiere aprovechar el máximo rango dinámico lineal de esta curva se ha de trabajar en un punto donde el voltaje sea 0 mV y además tengamos una región lineal, tal y como ocurre por ejemplo en el valor de retardo 65,4 ps. En la Figura 2.20 se indica este punto de máxima excursión con un punto rojo. La máxima excursión de retardo en esta región lineal corresponde a la separación temporal de los pulsos ortogonales A y B que salen del cristal de rutilo, siendo este valor de 20 ps.

Para comprobar que efectivamente estamos seleccionando la FBG 1, si le aplicamos tensión a la fibra de la región 2, el sistema no debería registrar ninguna variación. Así lo muestra la Figura 2.21. En esta figura el eje de abscisas representa el tiempo de medida (en este caso 255 segundos), mientras que en el eje de ordenadas se muestra el voltaje de salida diferencial.



**Figura 2.21. Señal eléctrica diferencial de salida nula cuando aplicamos tensión a una región no seleccionada.**

Durante el tiempo de medida se le aplicó a la fibra de la región un estiramiento de 1,2 mm, (lo que supone más de 2000  $\mu\epsilon$ ) durante 30 segundos en dos ciclos. El voltaje de salida diferencial permaneció invariante durante todo el intervalo de medida. Posteriormente, se sintonizó la fuente láser a 1545,8 nm para seleccionar la FBG 2 tal y como puede verse en el espectro de la Figura 2.22.



**Figura 2.22. Espectro de la fuente óptica sintonizada en 1545,8 nm para seleccionar la FBG 2.**

Una vez que hemos seleccionado la FBG 2 seremos capaces de detectar cualquier deformación existente tanto en la región 1 como en la región 2. Para demostrarlo, le aplicaremos a la fibra óptica de la región 2 el mismo estiramiento de 1,2 mm que se aplicó a la región 1 en el caso anterior. El resultado se muestra en la Figura 2.23. En este caso se aprecia claramente cuando se aplica tensión (rampa ascendente), cuando mantenemos esa tensión (valor constante en el máximo de la curva) y cuando liberamos esa tensión a la fibra (rampa descendente), volviendo ésta a su situación original de reposo. Esta operación se le aplicó a la fibra óptica de la región 2 en dos ocasiones tal y como se observa en dicha figura.

Habiendo demostrado la posibilidad de seleccionar cada una de las FBG de manera independiente para monitorizar la deformación en una región determinada, cobra especial importancia la demostración de la linealidad y repetitividad del sistema. Para ello se mantuvo la configuración del anterior experimento, es decir, con la fuente óptica sintonizada a 1545,8 nm para seleccionar la FBG 2 y posteriormente se le aplicó deformación a la fibra óptica de la región 2 en pasos de 0,1 mm (que corresponde con 182,5  $\mu\text{e}$  para una longitud de 54,8 cm) hasta aplicar una deformación total de 1,2 mm. La forma de hacerlo fue aplicar tensión a la fibra cada 0,1 mm y anotar el valor de voltaje de salida y así sucesivamente hasta 1,2 mm (2190  $\mu\text{e}$ ). Posteriormente se liberó la tensión de nuevo en pasos de 0,1 mm anotando el voltaje de salida hasta llegar al punto de reposo inicial de la fibra en la que no se encuentra sometida a ninguna deformación. Estos ciclos se repitieron varias decenas de veces dando como resultado una nube de puntos para cada deformación. Con estos valores se ajustó una recta de regresión lineal que se muestra en la Figura 2.24.

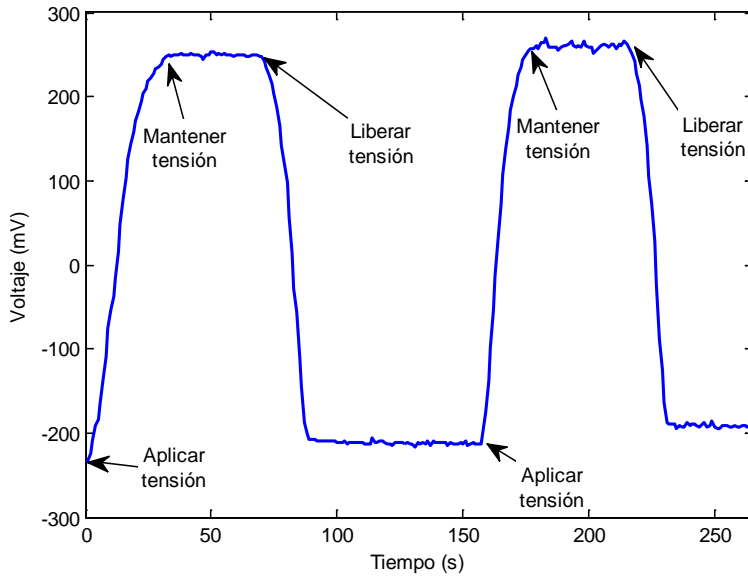


Figura 2.23. Señal eléctrica diferencial de salida cuando aplicamos deformación a la región seleccionada número 2.

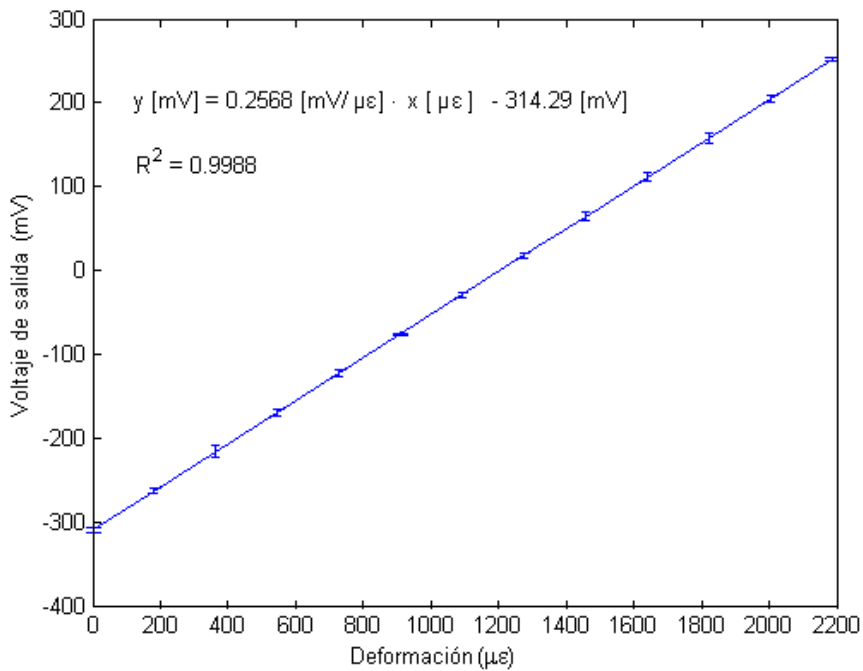


Figura 2.24. Respuesta lineal del sistema.

Como puede observarse, existe una buena linealidad del sistema, siendo la pendiente de la recta de regresión de  $0,2568 \text{ mV}/\mu\epsilon$ , lo que supone una sensibilidad del sistema de  $3,89 \mu\epsilon/\text{mV}$ . El coeficiente de correlación de la recta de regresión es de  $0,9988$ , lo que supone una correlación prácticamente lineal para las medidas que se tomaron. La resolución del sistema depende del módulo de adquisición de datos situado después de la detección de las señales ópticas provenientes de la unidad de correlación de pulsos y su posterior resta para obtener una señal eléctrica diferencial. El módulo utilizado en estos experimentos es el *National Instruments USB-6008*. Puesto que en la conversión analógico a digital utiliza 12 bits, su resolución es de  $(1 / 2^{12}) = 0,000244 = 0,0244 \%$  del rango de medida total que se seleccione en el módulo de adquisición. En nuestro caso el rango utilizado fue el de  $\pm 1$  Voltios, aunque en modo diferencial, por lo que para cada canal de salida hay un rango de  $1 \text{ V}$ . En este caso, la resolución en voltaje es de  $0,244 \text{ mV}$ . Ya que la sensibilidad del sistema es de  $3,89 \mu\epsilon/\text{mV}$ , la resolución en deformación es de  $0,95\mu\epsilon$ .

## 2.4. Separación en regiones mediante IPR

### 2.4.1. Principio

Para la técnica de separación de regiones basadas en IPR se propone el esquema mostrado en la Figura 2.25. En esta configuración, una fuente óptica pulsada produce un tren de pulsos, con una separación temporal de  $T_m$ . El tren de pulsos ópticos se divide en dos ramas: una de monitorización y otra de referencia. Los pulsos de monitorización atraviesan las regiones de monitorización en las que se quieren medir las deformaciones existentes y se reflejan parcialmente en los IPR de manera sucesiva. Por ejemplo, los pulsos de monitorización que alcanzan los reflectores IPR1 e IPR2 se reflejan en los pulsos de monitorización M1 y M2 respectivamente. Estos pulsos reflejados alcanzan la unidad de correlación de pulsos ópticos en uno de sus dos puertos de entrada. Por el otro puerto de entrada a esta unidad llegan los pulsos ópticos de referencia. Mediante la medida de las derivas temporales entre los pulsos de monitorización M1, M2, ..., MN, y los pulsos de referencia, se pueden calcular las deformaciones existentes en las regiones de monitorización.

Se puede observar en el esquema de la Figura 2.25 que el pulso de monitorización M1 atraviesa la Región 1, y que el pulso de monitorización M2 atraviesa tanto la Región 1 como la Región 2, y así sucesivamente con el resto de pulsos de monitorización. Por lo tanto, las derivas temporales entre los pulsos de referencia y los pulsos de monitorización M1, M2, ..., MN reflejados por los reflectores parciales de intensidad IPR1, IPR2, ..., IPRN vienen determinadas por la ecuación (2.4).

$$\Delta t_i = \frac{n}{c} \Delta L_i + T_{\text{delay}} - k_i T_m \quad (2.4)$$

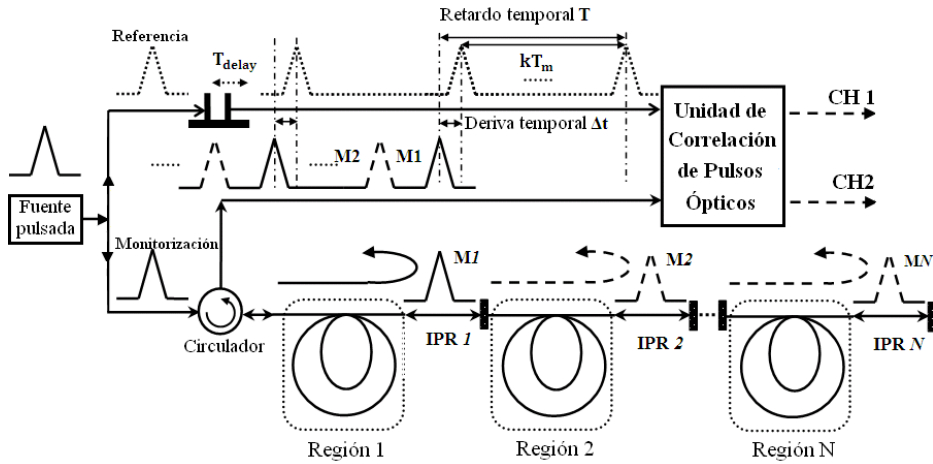


Figura 2.25. Esquema de separación de regiones mediante IPR.

Donde el subíndice  $i=1,2,\dots,N$ , hace referencia a los reflectores IPR 1, IPR 2, ..., IPR N;  $T_m$  es la separación temporal de los pulsos emitidos por la fuente óptica;  $\Delta L_i$  son las longitudes de propagación diferenciales entre los pulsos de monitorización reflejados y los pulsos de referencia;  $k_i$  son constantes enteras que sirven de ajuste para que  $\Delta t_i$  sea menor que  $T_m$ ;  $T_{delay}$  es la posición temporal de la línea de retardo. La ecuación (2.4) indica que  $\Delta L_i$  es proporcional a  $T_{delay}$  y a  $T_m$  cuando el resto de parámetros permanece constante.

Por lo tanto, se puede utilizar un método de escaneo temporal para monitorizar los cambios ambientales en las diferentes regiones de sensado. En la Figura 2.26 se puede observar como al mover la posición temporal de la línea de retardo en la rama de referencia, la posición temporal de los pulsos de referencia cambia, la deriva temporal entre los pulsos de referencia y los de monitorización cambian, y por tanto, también cambian las correlaciones de cada canal.

En la curva de la correlación diferencial (CH 1 – CH 2), los máximos indican cuando el pulso de monitorización y el pulso de referencia están completamente solapados. En otras palabras, los máximos de la curva de la correlación diferencial indican la posición temporal de los pulsos de monitorización en cada región. Así pues, realizando un barrido con los pulsos de monitorización podremos detectar los cambios sufridos por las fibras de monitorización en cada región.

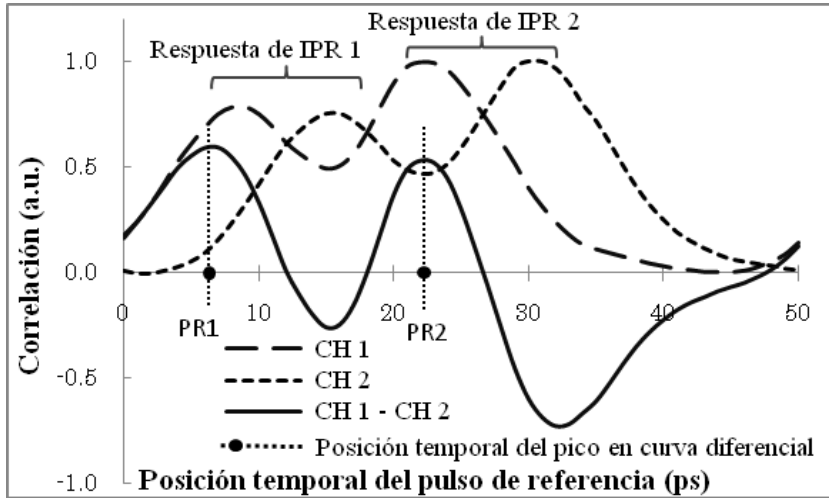


Figura 2.26. Correlación medida por el sistema al realizar un barrido temporal con la línea de retardo.

### 2.4.2. Experimento

El esquema experimental realizado para la separación de regiones mediante IPR se muestra en la Figura 2.27. La fuente pulsada utilizada es la misma que se utilizó en el montaje para la separación de regiones mediante WSRs en el apartado 2.3.2. La fuente óptica se sintonizó a una longitud de onda central de 1555 nm, estando modulado por un tono de  $f_m=20$  GHz, es decir, con una separación temporal entre pulsos de  $T_m=50$  ps.

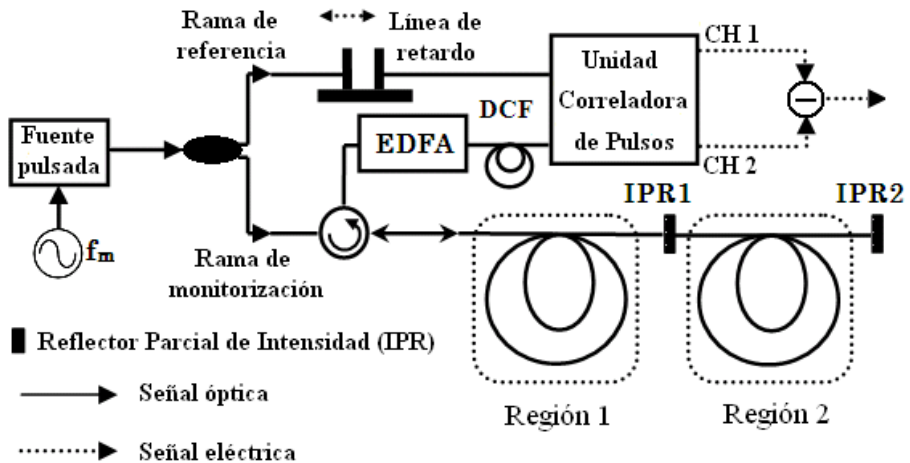


Figura 2.27. Esquema experimental para separación de regiones mediante IPR.

El ancho de pulso generado es de 8.7 ps, aunque éste podría ensancharse hasta los 10 ps en la fibra de monitorización. En este montaje se utilizaron tan solo dos reflectores parciales (IPR 1 e IPR 2) para separar sendas regiones de monitorización (Región 1 y Región 2) con el objetivo de demostrar el funcionamiento del sistema. Los IPRs consisten en la separación de aire en transiciones de fibra, de modo que la reflectividad típica de la interfaz fibra-aire es del orden del 4%. Las regiones de monitorización consisten en tramos de fibra óptica de 60 cm de longitud.

La línea de retardo óptico utilizada es el modelo ODL300 de la compañía Santec, con 0.005 ps de paso mínimo y de 0 a 350 ps de rango. Los pulsos de monitorización reflejados llegan a un amplificador de fibra dopada con Erblio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*, EDFA), de modo que los amplifica hasta los 6 dBm. Justo después, se sitúa un tramo de fibra compensadora de dispersión (*Dispersion Compensating Fiber*, DCF) de 50 metros de longitud para compensar la dispersión introducida por la fibra de monitorización. Los dos puertos de salida de la Unidad Correladora de Pulsos (CH 1 y CH 2) se conectan al módulo de adquisición de datos NI USB-6008, el mismo que se utilizó en el apartado 2.3.2, y con la misma finalidad de obtener una salida diferencial.

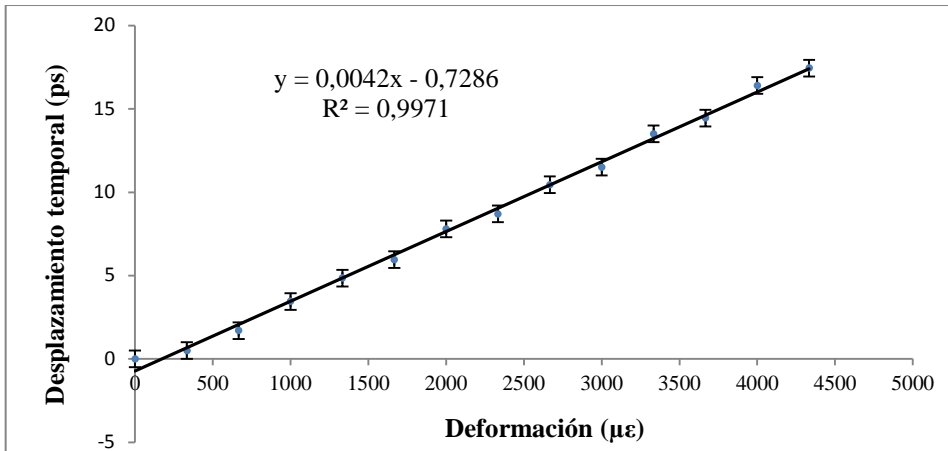
### 2.4.3. Resultados

En este apartado se va a demostrar el correcto funcionamiento del sistema para realizar medidas de deformación distribuidas multi-región. Para ello, primero se le aplicó deformación a la fibra óptica de la Región 1 en pasos de 0.2 mm (pasos de 333.3  $\mu\text{e}$  para una longitud de 60 cm) y se midió el desplazamiento temporal del máximo en la curva de la correlación diferencial realizando un barrido temporal con la línea de retardo óptica situada en la rama de referencia. En la Figura 2.28 se puede observar la relación entre el desplazamiento temporal del máximo en la curva diferencial y la deformación aplicada a la Región 1 en un rango de 0 a 4300  $\mu\text{e}$ . El ajuste lineal de los datos es excelente. El coeficiente de sensibilidad en este caso es de 238.1  $\mu\text{e}/\text{ps}$ . La resolución temporal del sistema es de 0.02 ps, y por lo tanto, la resolución en deformación del sistema es de 4.76  $\mu\text{e}$ . La estabilidad del sistema es muy alta, la fluctuación en la medida es menor del 1%.

Una vez obtenida la respuesta en deformación del sistema, el siguiente paso es comprobar si existen interferencias entre las medidas de las diferentes regiones. Para ello se hizo uso de la Región 1 (R1) y de la Región 2 (R2), aplicándoles deformación en instantes diferentes. En la Figura 2.29 se muestran los resultados de estas acciones. En concreto, en la Figura 2.29.c) se observan los instantes temporales en los que se aplica deformación a las regiones 1 y 2. En la Figura 2.29.a) se muestran los resultados de la primera mitad de este experimento (primeros 10 minutos) en los que R1 y R2 comienzan en reposo y posteriormente se aplica deformación a R2. Inicialmente se observan 2 picos en la curva de correlación diferencial: el primer pico (en torno a 18 ps) muestra a la respuesta de R1, ya que corresponde con la señal reflejada del IPR1, y el segundo pico (en torno



a 36 ps) muestra la respuesta conjunta de R1 y R2, ya que corresponde con la señal reflejada en IPR2. Tal y como se espera, al aplicar una deformación a R2 tiene lugar un desplazamiento temporal positivo del pico de la curva de correlación diferencial correspondiente a la señal reflejada en el IPR2, mientras que el pico correspondiente a la señal reflejada en el IPR1 permanece en la misma posición temporal.



**Figura 2.28. Respuesta del sistema a la deformación de la Región 1.**

En la Figura 2.29.b) se muestran los resultados de la segunda mitad del experimento (del minuto 10 al minuto 20) en los que R1 y R2 comienzan con una deformación aplicada y posteriormente se libera la deformación de R2. En este caso, al liberar la deformación de R2 tiene lugar un desplazamiento temporal negativo del pico de la curva de correlación diferencial correspondiente a la señal reflejada en el IPR2, mientras que el pico correspondiente a la señal reflejada en el IPR1 permanece en la misma posición temporal.

Con este experimento queda demostrado que no existen interferencias significativas entre las medidas de las diferentes regiones, ya que las deformaciones aplicadas a una región determinada no tienen efecto en las señales correspondientes al resto de regiones y solo tienen efecto en la señal reflejada por el IPR correspondiente a esa región.

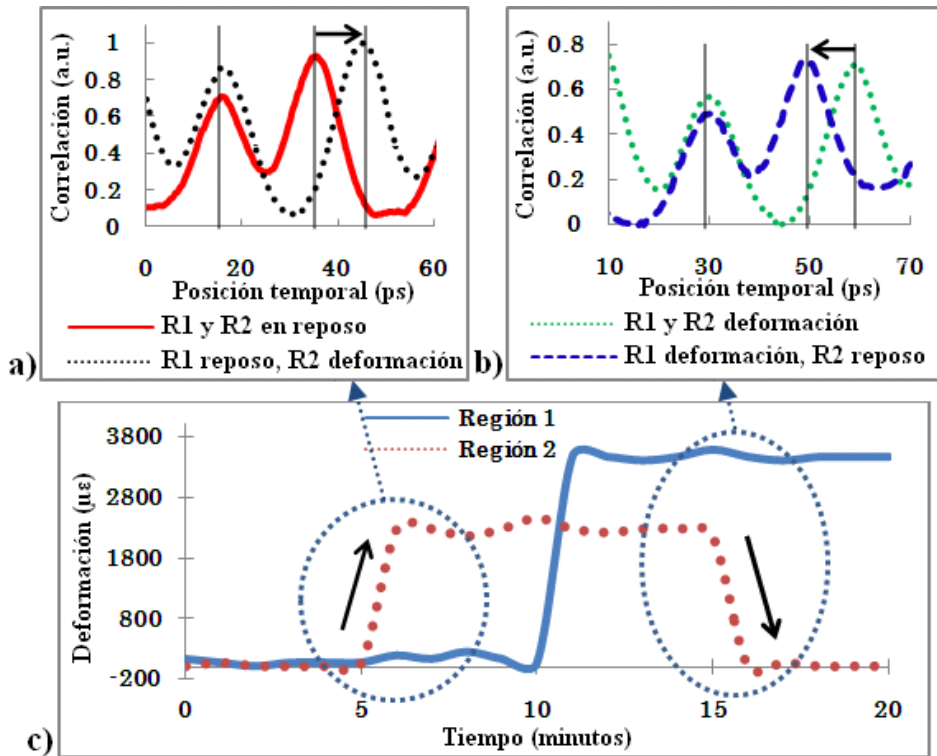


Figura 2.29. Resultados de las medidas de deformación en la Región 1 y en la Región 2.

## 2.5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado y demostrado la viabilidad de un sistema de interrogación híbrido para la monitorización al mismo tiempo de zonas continuas y de ciertos puntos seleccionados. Este sistema de interrogación permite la monitorización de sensores puntuales y distribuidos con una sola fuente óptica sintonizable en longitud de onda. Con esta técnica podemos conocer el comportamiento de grandes estructuras como puentes o gaseoductos dividiendo la longitud total de dichas estructuras en regiones de menor longitud. De este modo, se consigue llevar a cabo una de las aplicaciones más importantes de los sensores ópticos como es la monitorización de la salud de una estructura, ya sea mediante instalación superficial o embebido en dicha estructura.

En comparación con otras técnicas de medida, la técnica de correlación de pulsos con separación de regiones presenta una serie de ventajas:

- 1) Proporciona una monitorización híbrida inteligente mediante la obtención de medidas distribuidas y medidas puntuales, en el caso de utilizar WSR como reflectores parciales.
- 2) Utiliza como sensor enlaces de fibra óptica monomodo estándar para cada región de sensado, de modo que puede ampliarse el sistema añadiendo más regiones en cascada con su reflector parcial correspondiente.
- 3) Realiza medidas en tiempo real con una gran resolución y con una alta velocidad de medida.
- 4) A pesar de no tener una gran resolución espacial, las estructuras de un gran tamaño no requieren una localización exacta de las deformaciones anómalas. Además, estas estructuras pueden dividirse en regiones de monitorización más pequeñas.

La técnica empleada es muy robusta ya que las medidas están basadas en desplazamientos de longitud de onda y en derivas temporales entre pulsos ópticos. Además, el sistema permite la interrogación de regiones específicas mediante el uso de reflectores parciales, ya sean reflectores selectivos en longitud de onda o reflectores parciales de intensidad. El número de sensores que pueden instalarse en una única fibra es muy alto puesto que para la separación de regiones el sistema utiliza una fuente óptica sintonizable y varias FBG, las cuales tienen pocas pérdidas.

En cuanto a la utilización de WSR como reflectores parciales, los resultados experimentales confirman la respuesta lineal del sistema con una sensibilidad de  $3,89 \mu\epsilon/mV$ . La resolución obtenida es de  $0,95 \mu\epsilon$  para la medida de deformación en regiones de alrededor de 50 centímetros con un rango de  $2190 \mu\epsilon$ . La estabilidad de las medidas está por encima del 99,8 %. El máximo rango de deformación que se puede obtener está limitado por la tasa de repetición de pulsos y por el ancho de pulso de la fuente óptica. Estos parámetros pueden ser diseñados para detectar un desplazamiento temporal máximo de la mitad del periodo de repetición de pulsos.

Respecto a la utilización de IPR como reflectores parciales, se realizó un experimento sobre regiones de 60 centímetros de longitud, con un rango total de  $4300 \mu\epsilon$ , obteniendo un coeficiente de sensibilidad de  $238,1 \mu\epsilon/ps$ . La resolución del sistema es de  $4,76 \mu\epsilon$  con una estabilidad superior al 99%. Además, se ha demostrado experimentalmente la ausencia de interferencias entre las medidas de las diferentes regiones. El número de sensores que pueden multiplexarse es alto, siendo este número dependiente de la anchura de pulso y de la tasa de repetición de pulsos de la fuente óptica.

Como comparación de las dos técnicas de separación de regiones empleadas, se comparan algunas de sus características en la Tabla 2.1. La técnica de separación de regiones mediante WSR tiene las ventajas de alta resolución y alta velocidad de medida, lo que hace que esta técnica sea ideal para aplicaciones de corta distancia y

de monitorización dinámica de alta velocidad, como por ejemplo la monitorización de un edificio. Por otro lado, la técnica de separación de regiones mediante IPR presenta las características de bajo coste, regiones de medida extensas y baja velocidad de medida, haciendo esta técnica de medida ideal para aplicaciones de larga distancia y precisión media tales como tuberías de gas o petróleo, líneas de alta tensión, etc.

	<b>WSR</b>	<b>IPR</b>
<b>Medidas en tiempo real</b>	Sí	Sí
<b>Linealidad del sistema</b>	Sí	Sí
<b>Sensibilidad</b>	Alta	Media
<b>Velocidad de medida</b>	Alta	Media
<b>Independencia a la polarización</b>	No	Sí
<b>Número de sensores</b>	Alto <sup>[a]</sup>	Alto <sup>[b]</sup>
<b>Coste potencial</b>	Medio	Bajo
<b>Monitorización remota</b>	Sí	Sí
<b>Producción masiva</b>	Sí	Sí

**Tabla 2.1. Comparativa entre técnicas de separación de regiones mediante WSR e IPR.**

<sup>[a]</sup> dependencia con la anchura espectral de la fuente óptica.

<sup>[b]</sup> dependencia con la anchura de pulso y con la tasa de repetición de pulsos de la fuente óptica.

## 2.6. Referencias

[Horiguchi90]: T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda, “A technique to measure distributed strain in optical fibers”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 2, No. 5, pp. 352-354 (1990).

[Hotate11]: K. Hotate, “Brillouin scattering accompanied by acoustic grating in an optical fiber and applications in fiber distributed sensing”, 21<sup>st</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS21), Invited paper, Proc. of SPIE, Vol. 7753, 775307, (2011).

- [Jiang08]: Y. Jiang, C. Tang, “A high-resolution technique for strain measurement using an extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) and a compensating EFPI”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, No. 6, 065304, 5pp (2008).
- [Kersey97]: A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, “Fiber grating sensors”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, No. 8, pp. 1442-1463 (1997).
- [Lancaster95]: D. G. Lancaster, J. M. Dawes, “A pulsed laser source using stimulated Raman scattering in optical silica fibers”, *Optics Letters*, Vol. 15, No. 18, pp. 1038-1040 (1990).
- [Lu11]: Y. Lu, T. Zhu, X. Bao, L. Chen, “Vibration monitoring with high frequency response based on coherent phase-sensitive OTDR method”, 21<sup>st</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS21), Proc. of SPIE, Vol. 7753, 77533K, (2011).
- [Luo99]: F. Luo, J. Liu, N. Ma, T. F. Morse, “A fiber optic microbend sensor for distributed sensing application in the structural strain monitoring”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 75, pp. 41-44 (1999).
- [Nonaka99]: K. Nonaka, K. Uchiyama, H. Takara, “Picosecond optical pulse timing control using double pulses”, *European Conference on Optical Communication, ECOC'99, WeC1*, pp. II-40 – II41, Nice, France (1999).
- [Othonos99]: A. Othonos, K. Kalli,, “Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing”, *Artech House Optoelectronics Library* (1999).
- [Song11]: K. Y. Song, M. Kishi, Z. He, K. Hotate, “High-repetition-rate distributed Brillouin sensor based on optical correlation-domain analysis with differential frequency modulation”, *Optics Letters*, Vol. 36, No. 11, pp. 2062-2064, (2011).
- [Uchiyama04]: K. Uchiyama, K. Nonaka, H. Takara, “Subpicosecond timing control using optical double-pulses correlation measurement”, *IEEE Technology Letters*, Vol. 16, No. 2, pp. 626-628 (2004).
- [Udd11]: E. Udd, “Fiber optic sensors: An introduction for Engineers and Scientists”, Ed. Wiley-Interscience, ISBN: 0470126841, pp. 119-134, (2011).
- [Zornoza10]: A. Zornoza, D. Olier, M. Sagues, A. Loayssa, “Brillouin distributed sensor using RF shaping of pump pulses”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, 094021 (9 pp.), (2010).



# Capítulo 3

## Diseño y desarrollo de un sistema de monitorización estructural basado en FBG.

### 3.1. Introducción

En ingeniería civil es de vital importancia la monitorización de ciertas magnitudes durante el proceso constructivo de una estructura o durante la vida útil de la misma. Gracias a la correcta monitorización de magnitudes físicas tales como deformación, temperatura, humedad relativa y pH, se puede determinar el estado de la salud estructural.

Las magnitudes físicas de mayor relevancia y en las que se basa este apartado son las de deformación y temperatura. La monitorización de la deformación en una estructura nos permite conocer las fuerzas de tracción y compresión a las que se ven sometidos los elementos de la misma. La variación de temperatura a la que está

sometida una estructura se ve reflejada en dilataciones y compresiones de los materiales debido a que estos presentan unos coeficientes de dilatación térmica. Además, la monitorización de la temperatura tiene la función de compensación térmica de los sensores ópticos de deformación.

En los apartados 3.2 y 3.3 se presenta brevemente el principio de funcionamiento de las redes de difracción de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG), y los sensores de deformación y de temperatura creados en las instalaciones del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la Universidad Politécnica de Valencia.

En el apartado 3.4 se propone un sistema de monitorización de sensores ópticos programable, remoto y autónomo. Programable porque se pueden establecer los instantes de apagado y encendido del sistema, así como los periodos de guardado de datos. Remoto porque todas estas tareas de ajuste y las propias de monitorización pueden realizarse a distancia, en vez de tener que permanecer in-situ. Y autónomo porque además de poder ser programado para un funcionamiento autónomo, también es autónomo respecto de la alimentación gracias al uso de energía fotovoltaica.

Con los sensores de deformación y temperatura además del sistema de monitorización desarrollado, se realizaron varias pruebas de campo en estructuras reales. En el apartado 3.5 se presenta uno de los trabajos de instalación llevados a cabo, así como los resultados que se extrajeron durante la monitorización de la estructura.

Por último, en el apartado 3.6 se presenta un sensor de temperatura especialmente diseñado para poder aguantar altas temperaturas (más de 1000°C), donde se explica el principio de funcionamiento y el proceso de creación de este tipo de sensor de temperatura. Además, se incluye un ensayo realizado en el que se instalaron estos sensores embebidos en hormigón y se expusieron a un fuego real.

## **3.2. Redes de difracción de Bragg (FBG)**

### **3.2.1. Principio de funcionamiento**

Una red de difracción de Bragg (FBG) consiste en una perturbación periódica (o cuasi-periódica) del índice de refracción efectivo en el núcleo de una fibra óptica. Una FBG puede estar compuesta por miles de estas perturbaciones cuya separación espacial es del orden de centenares de nanómetros, de manera que la longitud final de una FBG suele ser de unos pocos milímetros o centímetros. Estas estructuras se comportan como filtros elimina-banda de modo que si a la entrada de la FBG se inyecta una señal óptica con un espectro suficientemente ancho, cuando la señal llega a las perturbaciones parte de la luz se transmite y parte de ella se refleja. El máximo acoplamiento al modo reflejado se da a la longitud de onda conocida como



longitud de onda de Bragg. Este máximo de reflectividad o mínimo de transmisividad viene determinado por [Hill78]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (3.1)$$

donde  $\lambda_B$  es la longitud de onda que cumple la condición de Bragg y que por tanto se refleja,  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo del modo fundamental, y  $\Lambda$  es el periodo espacial de las perturbaciones en el índice de refracción.

La longitud de onda de Bragg puede desplazarse debido al efecto de diferentes magnitudes físicas tales como deformación, temperatura, presión, humedad relativa, etc. Sin embargo, las FBG presentan una mayor sensibilidad a variaciones de temperatura y a deformaciones mecánicas aplicadas a la fibra, siendo despreciables el resto de efectos. La variación de  $\lambda_B$  se puede hallar aplicando derivadas parciales respecto de los factores de la que ésta depende:

$$\Delta\lambda_B = \frac{\partial\lambda_B}{\partial\varepsilon}\Delta\varepsilon + \frac{\partial\lambda_B}{\partial T}\Delta T \quad (3.2)$$

En este punto, introducimos la magnitud física denominada *deformación unitaria*. Definiremos la deformación unitaria como la cantidad de deformación por unidad de longitud de un objeto sometido a una fuerza. La deformación unitaria se calcula dividiendo la deformación total del objeto por la longitud original, tal y como muestra la expresión (3.3). La deformación unitaria se mide en *strain* ( $\varepsilon$ ). Como los valores típicos son muy pequeños, se suele utilizar el *microstrain* ( $\mu\varepsilon$ ):

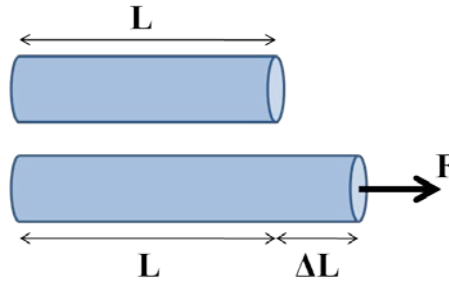


Figura 3.1. Deformación unitaria de un objeto al aplicarle una fuerza de tracción.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L [m]}{L [m]} \quad (3.3)$$

Para desarrollar las derivadas parciales de la ecuación (3.2) haremos uso de la regla de la cadena aplicándola a la ecuación (3.1):

$$\frac{\partial \lambda_B}{\partial \varepsilon} = 2n_{eff} \left( \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right) + 2\Lambda \left( \frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} \right) = \lambda_B \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} \right] \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \lambda_B}{\partial T} = 2n_{eff} \left( \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) + 2\Lambda \left( \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) = \lambda_B \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right] \quad (3.5)$$

Sustituyendo en la ecuación (3.2):

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B \left\{ \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} \right] \Delta \varepsilon + \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right] \Delta T \right\} \quad (3.6)$$

Por último, si desarrollamos la expresión (3.6):

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_B = \lambda_B \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{n_{eff}^2}{2} \right) \left[ p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}) \right] \right] \Delta \varepsilon \right. \\ \left. + \left[ \left( \frac{n_{eff}^2}{2} \right) (p_{11} + 2p_{12}) \alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right] \Delta T \right\} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Para hacer más compacta la formulación, agrupamos el término que corresponde a los efectos por la aplicación de una deformación mecánica a la fibra en un coeficiente y el término que corresponde a los efectos por la variación de la temperatura a la que se encuentra la fibra en otro coeficiente:

$$\Delta \lambda_B = K_\varepsilon \Delta \varepsilon + K_T \Delta T \quad (3.8)$$

Donde  $\varepsilon$  es la deformación unitaria en unidades de *strain* ( $\varepsilon$ ) y  $K_\varepsilon$  se define como la sensibilidad en deformación de la FBG, en unidades de pm/ $\varepsilon$ . Por otra parte,  $K_T$  es la sensibilidad en temperatura de la red de difracción, en unidades de pm/ $^\circ\text{C}$ , y  $\Delta T$  es el incremento de temperatura a la que se ve sometida. Los coeficientes de sensibilidad en deformación y en temperatura tienen las siguientes expresiones:

$$K_\varepsilon = \left[ 1 - \left( \frac{n_{eff}^2}{2} \right) \left[ p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}) \right] \right] \lambda_B \quad (3.9)$$

$$K_T = \left[ \left( \frac{n_{eff}^2}{2} \right) (p_{11} + 2p_{12}) \alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right] \lambda_B \quad (3.10)$$

En las ecuaciones (3.9) y (3.10),  $p_{11}$  y  $p_{12}$  son los coeficientes foto-elásticos, también conocidos como constantes de Pockels y fueron determinados experimentalmente por Bertholds and Dändliker [Bertholds88]. Valores típicos para estos coeficientes son  $p_{11}=0.113$  y  $p_{12}=0.252$ . El coeficiente  $\nu$  se denomina coeficiente de Poisson de la fibra óptica que tiene un valor típico de  $\nu=0.17$  para fibra de germanosilicato [El-Diasty00] y  $n_{\text{eff}}$  es el índice de refracción efectivo de la fibra. En la ecuación (3.10), está presente el coeficiente de dilatación térmica,  $\alpha$ , que tiene unidades de  $(^{\circ}\text{C})^{-1}$ . Cuando la fibra óptica no se encuentra sometida a fuerzas externas, el coeficiente de dilatación térmica corresponde al de la propia fibra óptica y tiene un valor aproximado de  $0,55 \cdot 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$ . Si está adherida a un material de mayor coeficiente de dilatación térmica, la deformación que sufre el material será transmitida a la fibra óptica. Valores típicos para materiales comunes como el acero y el hormigón son:  $\alpha_{\text{acero}}= 1,2 \cdot 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$  y  $\alpha_{\text{hormigón}}= 1 \cdot 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$ . El término  $(1/n_{\text{eff}})(\partial n_{\text{eff}}/\partial T)$  se denomina coeficiente termo-óptico y se corresponde con la variación del índice de refracción efectivo con la temperatura. En el caso de la fibra óptica este coeficiente tiene un valor aproximado de  $8,6 \cdot 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$ .

Como se puede observar en las ecuaciones (3.9) y (3.10), los coeficientes de sensibilidad en deformación y en temperatura de una FBG dependen de  $\lambda_B$ , por lo que redes de difracción con diferente longitud de onda de Bragg tendrán diferentes coeficientes de sensibilidad. Sin embargo, la desviación para longitudes de onda de Bragg próximas es despreciable.

### 3.2.2. Compensación térmica

Como se ha explicado en el apartado 3.2.1, una FBG es sensible a la variación de varios parámetros físicos de forma simultánea, siendo los más importantes las variaciones de temperatura y las deformaciones de la fibra. El hecho de que ambos parámetros influyan en el desplazamiento de la longitud de resonancia de una FBG hace que sea imposible distinguir en qué proporción afecta cada uno de estos parámetros en un instante determinado a este desplazamiento.

Sin embargo, existe la posibilidad de aislar mecánicamente una FBG de manera que no esté adherida a ningún material y ésta se encuentre libre de cualquier deformación mecánica. En este caso  $\varepsilon = 0$ , por lo que la ecuación (3.8) se transforma en:

$$\Delta\lambda_B = K_T \Delta T \quad (3.11)$$

Por lo tanto, en este caso la longitud de onda de resonancia de la FBG se desplaza tan sólo con las variaciones de temperatura, actuando ésta como un sensor de temperatura. Para la calibración de una FBG como sensor de temperatura, basta con obtener el valor de la constante  $K_T$ , lo que se consigue con registrar los desplazamientos de  $\lambda_B$  para temperaturas conocidas.

Con una FBG aislada mecánicamente es posible la compensación de temperatura de una FBG que se quiera utilizar como sensor de deformación. Ambas FBGs han de estar muy próximas para que las variaciones de temperatura sean las mismas para las dos redes de difracción. De este modo, una de las FBG estaría completamente adherida a un material y se vería afectada por las deformaciones del mismo (compresión, tracción, torsión, etc.) y la otra estaría libre, por ejemplo dentro de un tubo, de manera que tan solo se viera afectada por los cambios de temperatura. La FBG adherida al material a medir la denotaremos por el subíndice *def* y la FBG libre con el subíndice *temp*, teniendo en cuenta que cada una de estas FBG tiene sus propios coeficientes  $K_T$  y  $K_\varepsilon$ . Para ambas FBG, el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg viene determinado por la ecuación (3.8), y teniendo en cuenta la ecuación (3.11):

$$\Delta\lambda|_{temp} = K_T|_{temp} \cdot \Delta T \quad (3.12)$$

$$\Delta\lambda|_{def} = K_T|_{def} \cdot \Delta T + K_\varepsilon|_{def} \cdot \Delta\varepsilon \quad (3.13)$$

De este modo nos queda un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas ( $\Delta T$  y  $\Delta\varepsilon$ ). Si queremos aplicar la compensación en temperatura para conocer la variación de la deformación ( $\Delta\varepsilon$ ) debida solamente a una carga exterior, habrá que despejar  $\Delta T$  de la ecuación (3.12) y sustituir en (3.13):

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda|_{temp}}{K_T|_{temp}} \quad (3.14)$$

$$\Delta\lambda|_{def} = \frac{K_T|_{def}}{K_T|_{temp}} \Delta\lambda|_{temp} + K_\varepsilon|_{def} \Delta\varepsilon \quad (3.15)$$

Con esto ya tenemos la variación de la longitud de onda debida solamente a la deformación del material, realizando la compensación en temperatura. Ya por último, si queremos conocer la variación de deformación que ha sufrido el material al que se encuentra adherido el sensor, habrá que despejar  $\Delta\varepsilon$  en (3.15):

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{K_\varepsilon|_{def}} \Delta\lambda|_{def} - \frac{K_T|_{def}}{K_T|_{temp} \cdot K_\varepsilon|_{def}} \Delta\lambda|_{temp} \quad (3.16)$$

La resolución de las ecuaciones (3.12) y (3.13) se puede llevar a cabo con una herramienta de cálculo de manera matricial. En este caso, habría que resolver la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda|_{temp} \\ \Delta\lambda|_{def} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_T|_{temp} & 0 \\ K_T|_{def} & K_\varepsilon|_{def} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Cabe destacar que deberemos conocer las constantes  $K_{e/def}$ ,  $K_{T/def}$  y  $K_{T/temp}$  previamente para poder realizar la compensación en temperatura. La caracterización de los sensores consiste en obtener el valor de estos coeficientes para las distintas situaciones en que se instalarán los sensores.

La constante  $K_{e/def}$  tiene un valor de 1,15 pm/ $\mu\epsilon$  y  $K_{T/def}$  tiene un valor aproximado de 8,12 pm/ $^{\circ}\text{C}$  bajo la condición de estar la FBG libre de acciones externas [García08]. Por último, la constante  $K_{T/def}$  debe determinarse experimentalmente para cada material al que se vaya a adherir. Es muy importante resaltar este punto, ya que la constante de sensibilidad en temperatura de los sensores de deformación dependerá del coeficiente de dilatación térmica del material al que se ha adherido el sensor como se comprobó en la ecuación (3.10).

### 3.3. Sensores puntuales basados en FBG

#### 3.3.1. Sensor de deformación

En el apartado 3.2 se ha presentado a la FBG como un dispositivo idóneo para ser utilizado como sensor debido a su sensibilidad intrínseca a varios parámetros. No obstante, para ser aplicado a estructuras no basta con la instalación directa de la fibra óptica, ya que ésta presenta una serie de inconvenientes en este aspecto:

- Fragilidad de la fibra óptica: Para la inscripción de redes de difracción en fibra óptica es necesario actuar directamente sobre el núcleo, teniendo que retirar el recubrimiento de acrilato para dejar al descubierto la cubierta de la fibra óptica. De este modo, la sección de fibra óptica donde se encuentra la FBG es de tan solo 125  $\mu\text{m}$  siendo además la sílice un material altamente quebradizo. Por lo tanto, el manejo e instalación de la fibra óptica en estas condiciones es realmente delicado.
- Transferencia de deformación: La fibra óptica tiene geometría cilíndrica, por lo que al adherirla a una superficie es posible que no haya una transferencia completa de la deformación de la superficie de la estructura a la fibra óptica.
- Integridad de la instalación: En el caso de haber instalado fibra óptica desnuda en la superficie de una estructura, al no tener ésta ninguna protección, es más propensa a sufrir algún accidente posterior a la instalación, como por ejemplo golpes y cortes, y además está a expensas de las condiciones climatológicas exteriores.

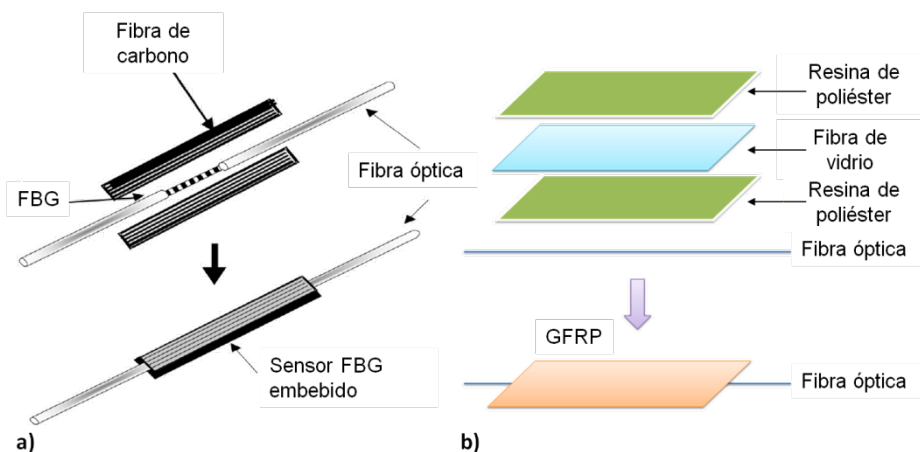
Por estos motivos, se hace indispensable la adecuación de la fibra óptica para ser instalada en estructuras. La creación de un encapsulado para la fibra óptica soluciona todos los problemas que se han planteado anteriormente. Es por ello que en este apartado se presenta el diseño de un encapsulado para utilizar una FBG como sensor de deformación.

La misión del encapsulado de una FBG es la de conferir a la fibra óptica de rigidez y robustez mecánica para protegerla de caídas y golpes, así como facilitar el manejo de la misma para su instalación. Por otra parte, el encapsulado debe ser capaz de transferir por completo la deformación del material que se quiere medir a la fibra óptica, sin alterar el comportamiento básico en deformación de la FBG.

Para el diseño de un encapsulado es importante tener en cuenta varios factores que repercuten en el comportamiento final del mismo. Estos factores son los materiales elegidos, la proporción de cada uno de estos materiales, el procedimiento de encapsulado, los tiempos de cada fase, los tiempos de espera, etc.

Tradicionalmente, se han utilizado materiales metálicos y materiales compuestos como fibra de vidrio y fibra de carbono [Kuang01, Moyo05]. Además, siempre se ha elegido una configuración en la que la FBG queda emparedada entre varias capas de estos materiales, de modo que en un corte transversal del encapsulado, la fibra óptica queda en el medio (Figura 3.2.a).

El encapsulado desarrollado para esta tesis utiliza una sola capa de fibra de vidrio, reforzada por dos capas de resina de poliéster, de modo que al conjunto se le denomina polímero reforzado con fibra de vidrio o GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer). Sin embargo, al contrario de cómo se venía desarrollando hasta ahora, la FBG no queda emparedada entre dos capas, sino que ésta se encuentra en la superficie inferior del encapsulado, tal y como se aprecia en la Figura 3.2.b. Este sensor encapsulado ha sido patentado por los institutos de investigación iTEAM e ICITECH de la UPV con el nombre “Sensor óptico para la monitorización de estructuras”, patente número P200801728.



**Figura 3.2. a) Sensor de deformación presentado por Moyo et al. b) Sensor de deformación desarrollado por la UPV.**

El motivo de utilizar esta configuración, distinta a la que se venía utilizando hasta ahora es debido a que se ha demostrado que para asegurar la máxima transferencia de deformación de la estructura a la FBG es imprescindible que la fibra óptica quede lo más próxima posible a la estructura [Li06]. Cualquier elemento que se sitúe entre la FBG y la estructura provocará un gradiente de deformaciones con el resultado de que la fibra óptica sufrirá una deformación menor a la que sufre la superficie de la estructura. Para corroborar la mejora que establece esta nueva configuración, se ha desarrollado un estudio mediante un modelo de elementos finitos [Torres11], reforzando lo anteriormente expuesto.

Se adquirieron unos sensores comerciales a la empresa FiberSensing para comparar el sensor desarrollado con los que están disponibles actualmente en el mercado. En concreto se adquirieron 2 sensores modelo FS6200 (Strain Sensors) de dos materiales diferentes: uno con encapsulado de fibra de carbono y otro con encapsulado de poliamida. Como comparación, se capturaron los espectros ópticos en reflexión tanto de los sensores comerciales adquiridos como del sensor desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Puede verse en la Figura 3.3 que la diferencia más notable del sensor de la UPV respecto de los sensores comerciales es que tiene unos lóbulos secundarios mucho menores. Esto es debido a que en la inscripción de las FBG se aplica un perfil de apodización gaussiano precisamente para conseguir este efecto. Gracias a esta característica, es más sencilla la labor del software encargado de la detección de picos en el espectro de las FBG para el seguimiento de las longitudes de onda de Bragg. En caso de que los lóbulos secundarios reflejaran una potencia alta, podría confundir al software y detectar más sensores de los que en realidad existen.

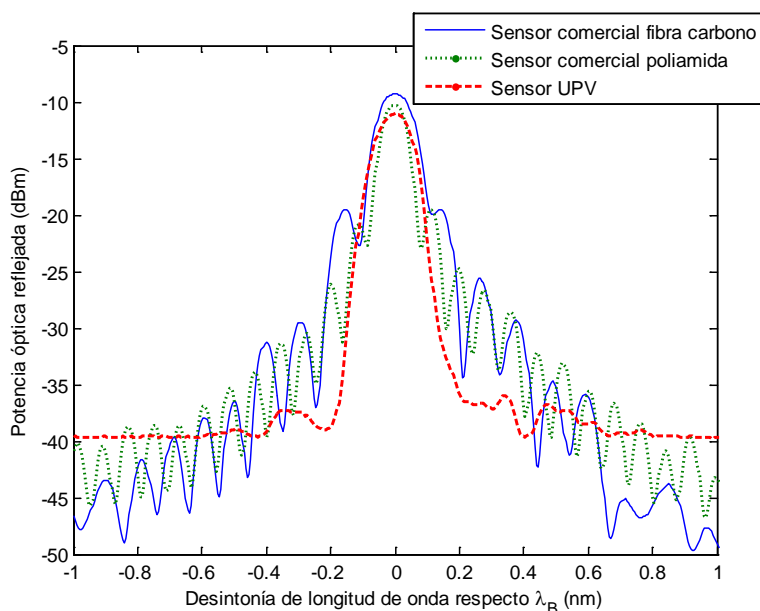


Figura 3.3. Comparativa de espectros entre los sensores comerciales y el sensor UPV.

### 3.3.2. Sensor de temperatura

Al igual que para el sensor de deformación, el sensor de temperatura consta de una red de difracción de Bragg (FBG) y de un encapsulado adecuado para la misma. Puesto que una FBG es intrínsecamente capaz de medir variaciones de temperatura perfectamente sin necesidad de elementos externos, este encapsulado tendrá tan solo la misión de protección de la fibra óptica. Por otro lado, el diseño del encapsulado será de tal forma que la FBG de la que consta el sensor de temperatura se vea afectada solamente por las variaciones de temperatura, y no por otros parámetros como deformación, presión, etc.

En este sentido, el encapsulado que se ha desarrollado consta de un tubo metálico hueco, de modo que la fibra queda holgada en su interior (Figura 3.4). Se le añade además al encapsulado una base de fibra de vidrio y resina de poliéster (formando un GFRP) para facilitar la instalación del sensor de temperatura en superficies planas. Con este diseño, el sensor óptico de temperatura es capaz de medir las variaciones de temperatura del material al que se halle adherido, sin que le afecte la deformación de dicho material, al tener la fibra óptica suficiente holgura en el interior del encapsulado.

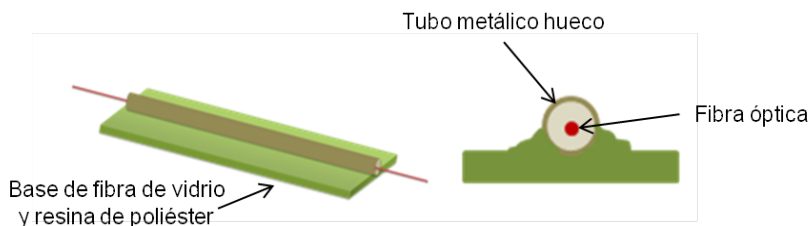


Figura 3.4. Sensor de temperatura desarrollado por la UPV.

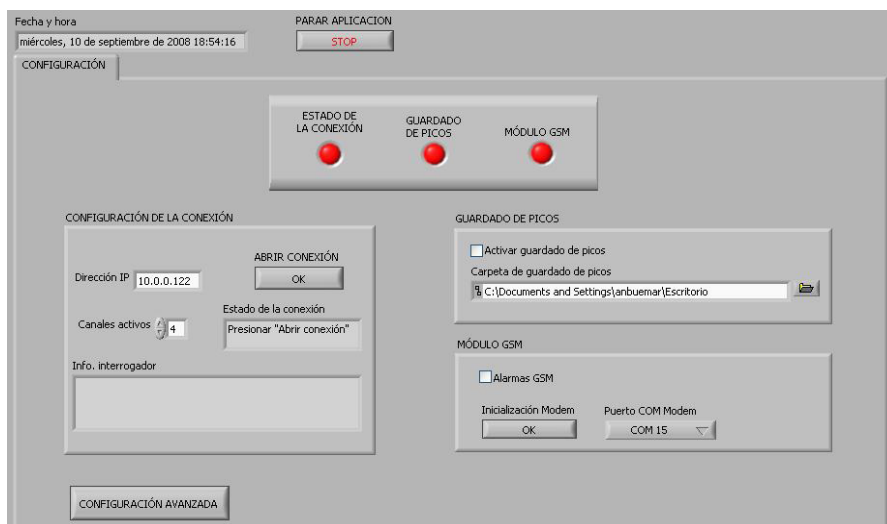
## 3.4. Sistema de interrogación de sensores programable, remoto y autónomo

### 3.4.1. Software desarrollado

Se ha desarrollado una aplicación para la interrogación de los sensores de deformación y temperatura basados en FBG. El lenguaje de programación escogido ha sido LabVIEW de National Instruments en su versión 8.5 [LAB]. El programa se ejecuta en un PC, estableciendo comunicación con un interrogador de sensores ópticos comercial por medio de un cable de red Ethernet y con un módem GSM (*Global System for Mobile communications*) [Garg99] mediante un puerto USB. El objetivo del programa es monitorizar los diferentes sensores ópticos que forman un sistema de sensores instalados en una estructura como puede ser un edificio, un puente o las tuberías de un gasoducto, entre las muchas posibilidades que nos ofrece el campo de la construcción civil.



Para ello, se ha dotado al programa de varias funciones tales como el guardado automático de los datos que nos proporcionan los sensores a lo largo del tiempo, visualización de esos datos en una gráfica temporal, visualización del espectro que generan estos sensores, conversión a unidades de ingeniería: grados centígrados (para la temperatura) o strains (para la deformación), posibilidad de definir unos umbrales que delimiten el correcto funcionamiento de los sensores y envío de mensajes SMS cuando se dispare una alarma por superar estos umbrales, etc. La pantalla principal se muestra en la Figura 3.5.



**Figura 3.5. Ventana principal de la aplicación.**

Se ha diseñado un sistema de pestañas para la navegación entre las secciones del programa. Al ejecutar la aplicación, tan solo se muestra la pestaña *CONFIGURACIÓN* para poder ajustar parámetros básicos de la conexión (dirección IP del instrumento interrogador, número de canales que se van a utilizar) así como del guardado de datos que nos proporciona el interrogador sobre los sensores, pudiendo especificar la carpeta de trabajo donde se crearán las carpetas que contendrán los archivos de datos, y del módulo GSM para el envío de alarmas mediante SMS.

Las longitudes de onda correspondientes a los máximos en reflexión de cada uno de los sensores ópticos basados en FBGs se almacenarán en archivos de texto, junto a la potencia reflejada a esas longitudes, siempre y cuando esté activada la casilla *Activar guardado de picos*. El programa creará automáticamente una carpeta en la ruta introducida en *Carpeta de guardado de picos* con el formato "Mes\_año" (por ejemplo Septiembre\_2008) y dentro de esa carpeta se crearán los archivos de texto con el formato "día.txt" (por ejemplo 05.txt). En cada línea del archivo se guardarán la fecha y hora de la medida junto con las longitudes de onda y potencia reflejada de todos los sensores ópticos del sistema. Las longitudes de onda estarán expresadas en nanómetros (nm) con 4 decimales de precisión y las potencias en dBm con 2 decimales de precisión (Figura 3.6).

Fecha	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4	CH_1 S_1	CH_1 P_1	CH_2 S_1	CH_2 P_1
24/10/2008 12:12:30	1	1	0	0	1543.8722	-13.9100	1539.1109	-13.8300
24/10/2008 12:12:31	1	1	0	0	1543.8725	-13.8900	1539.1114	-13.9600
24/10/2008 12:12:32	1	1	0	0	1543.8709	-13.9200	1539.1119	-13.8200
24/10/2008 12:12:33	1	1	0	0	1543.8703	-13.9400	1539.1103	-13.8300
24/10/2008 12:12:34	1	1	0	0	1543.8712	-13.8600	1539.1116	-13.9100
24/10/2008 12:12:35	1	1	0	0	1543.8717	-13.8400	1539.1112	-13.8300
24/10/2008 12:12:36	1	1	0	0	1543.8718	-13.9600	1539.1111	-13.9600
24/10/2008 12:12:37	1	1	0	0	1543.8716	-13.9100	1539.1111	-13.8800
24/10/2008 12:12:38	1	1	0	0	1543.8716	-13.8600	1539.1111	-13.8800
24/10/2008 12:12:39	1	1	0	0	1543.8710	-13.9600	1539.1114	-13.8600
24/10/2008 12:12:40	1	1	0	0	1543.8720	-13.9900	1539.1120	-13.8600
24/10/2008 12:12:41	1	1	0	0	1543.8712	-13.8300	1539.1113	-13.7600
24/10/2008 12:12:44	1	1	0	0	1543.8718	-14.0000	1539.1118	-13.8600
24/10/2008 12:12:44	1	1	0	0	1543.8721	-13.9700	1539.1117	-13.9100
24/10/2008 12:12:44	1	1	0	0	1543.8719	-13.9300	1539.1117	-13.8400
24/10/2008 12:12:45	1	1	0	0	1543.8711	-13.8800	1539.1112	-13.8600
24/10/2008 12:12:46	1	1	0	0	1543.8724	-13.9100	1539.1122	-13.8900
24/10/2008 12:12:47	1	1	0	0	1543.8724	-14.0000	1539.1125	-13.9000
24/10/2008 12:12:48	1	1	0	0	1543.8723	-13.9100	1539.1122	-13.9100
24/10/2008 12:12:49	1	1	0	0	1543.8724	-13.9300	1539.1124	-13.9100

Figura 3.6. Fichero de datos generado por el software interrogador de sensores.

En el *módulo GSM* tenemos un menú desplegable para seleccionar el puerto COM que ha sido asignado al módem GSM y un botón para inicializar el módem, que consiste en la introducción del código PIN (por si no se hubiera hecho ya) para tener la SIM operativa. Para establecer la conexión con el instrumento interrogador y el consiguiente flujo de datos hacia el PC, se ha de pulsar el botón *Abrir conexión*, una vez que se han ajustado todas las opciones de configuración deseadas. El botón de configuración avanzada permite la visualización de 3 nuevas pestañas de configuración además de la pestaña inicial de configuración básica (*CONFIGURACIÓN AVANZADA*, *MÓDULO GSM* y *VISUALIZACIÓN DEL ESPECTRO*) previa introducción de una contraseña.

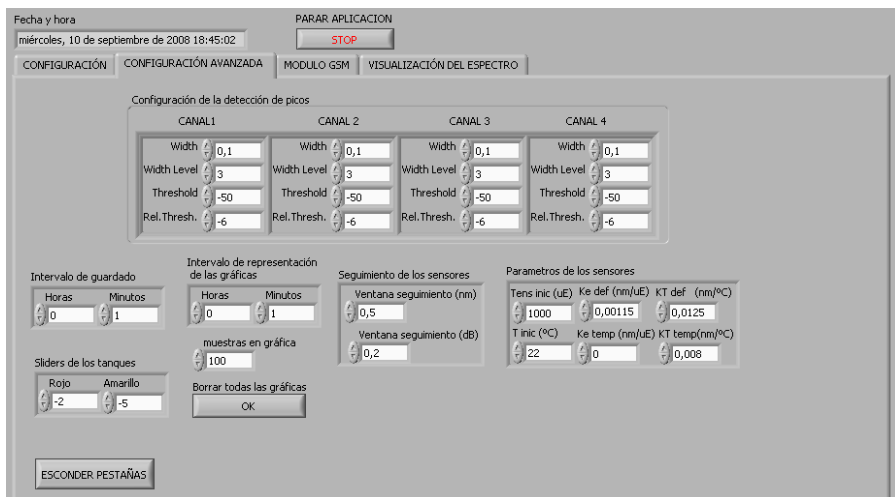


Figura 3.7. Pestaña CONFIGURACIÓN AVANZADA.

En la pestaña *CONFIGURACIÓN AVANZADA*, podemos ajustar los siguientes parámetros:

- *Configuración de la detección de picos*: permite el ajuste de los parámetros utilizados en la llamada a la librería que se encarga de detectar los picos existentes en el espectro. Son 4 parámetros y se pueden ajustar para cada canal por separado.
- *Parámetros de los sensores*: permite establecer el valor de los coeficientes de sensibilidad para el tipo de sensores que se estén utilizando en ese momento. Existe la posibilidad de ajustar 4 parámetros individualmente, que corresponden a los coeficientes de deformación y temperatura de los 2 sensores que forman el sensor compensado en temperatura.
- *Intervalo de guardado*: Cuando está activado el guardado de picos, esta opción nos permite establecer cada cuanto tiempo se guardan los datos en el archivo de texto que se encuentra en la ruta especificada en *Carpeta de guardado de picos* como se comentó anteriormente. Se pueden introducir valores de horas y minutos por separado.
- *Intervalo de representación de las gráficas*: espaciado de tiempo entre 2 muestras que se representan en las gráficas de los sensores. Al igual que antes, se pueden introducir valores de horas y minutos por separado.
- *Muestras en gráfica*: Número de puntos representados en cada gráfica de los sensores. Este parámetro controla la cantidad de datos representados para que las gráficas de los sensores puedan ser leídas fácilmente. Además, sirve para controlar la memoria que utiliza el programa, puesto que en memoria estarán almacenadas tantas muestras de cada sensor como indique este valor. Las muestras almacenadas son las más recientes, desechando si se da el caso las muestras más antiguas. El intervalo de tiempo que se mostrará en cada gráfica de sensor será por tanto *Muestras en gráfica x Intervalo de representación de las gráficas*.
- *Borrar todas las gráficas*: Limpia las gráficas de los sensores de todas las muestras almacenadas y empieza a dibujarse una nueva gráfica con las muestras que van capturándose.
- *Seguimiento de los sensores*: Ventanas para el seguimiento de los sensores durante el tiempo. Estos valores determinan la máxima variación entre 2 muestras consecutivas para la longitud de onda y la potencia de un mismo sensor. Se utilizan para prevenir solapes de espectro entre sensores adyacentes y la desaparición de picos.
- *Esconder pestañas*: Botón que esconde las 3 pestañas que aparecen al presionar el botón *CONFIGURACIÓN AVANZADA*.

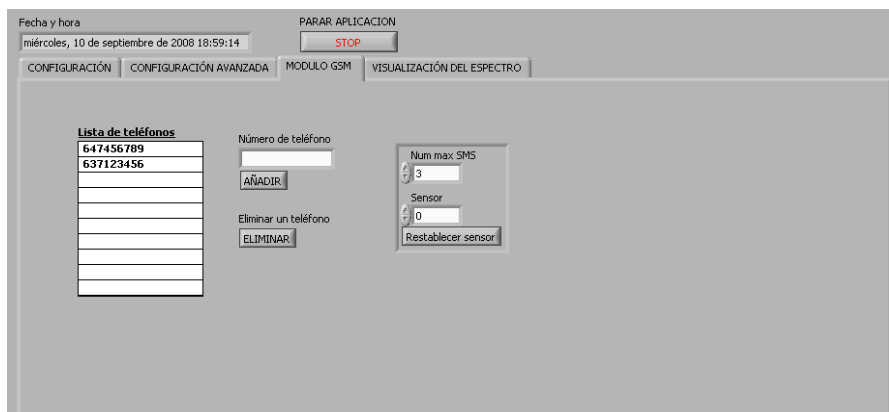


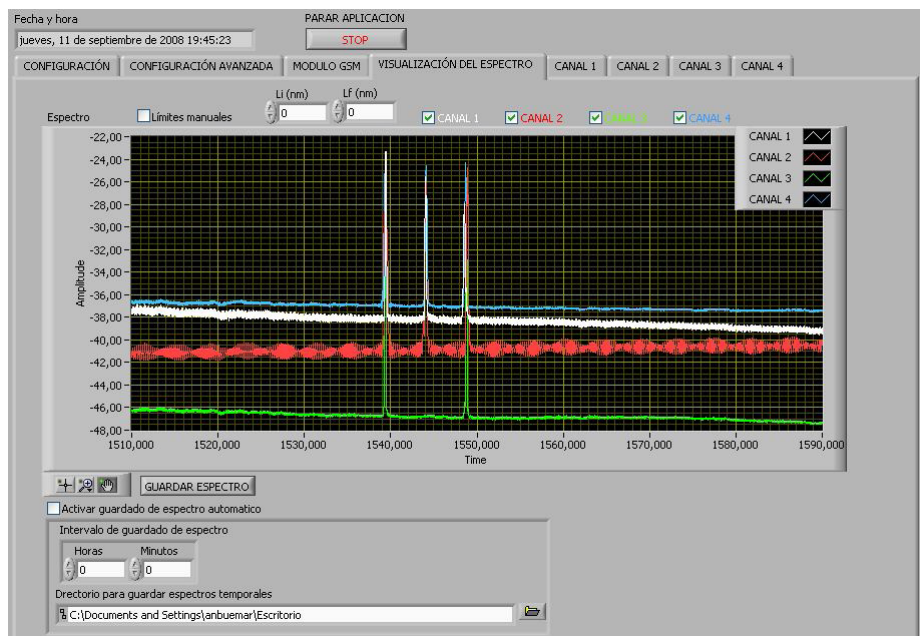
Figura 3.8. Pestaña MÓDULO GSM.

En la pestaña *MÓDULO GSM* tenemos disponibles las siguientes opciones:

- *Lista de teléfonos*: Teléfonos que recibirán un SMS cada vez que un sensor haga saltar una alarma cuando el *MÓDULO GSM* esté activo.
- *Añadir*: Botón que añade el teléfono introducido en el campo *Número de teléfono* a la *lista de teléfonos*.
- *Eliminar*: Botón para eliminar el/los teléfono/s seleccionados en la *lista de teléfonos*.
- *Num max SMS*: Número máximo de SMS que se envían debido a las alarmas producidas por un único sensor. Este valor nos sirve para evitar la posibilidad de que un sensor dañado esté enviando continuamente SMS en cada muestra por hallarse fuera de los umbrales de correcto funcionamiento.
- *Restablecer sensor*: Ajusta el sensor especificado en el campo *sensor* para que pueda enviar de nuevo tantos SMS como indique el valor *Num max SMS*. La finalidad de esta opción es la de permitir enviar alarmas mediante SMS a un sensor que se hubiese estropeado y hubiera sido sustituido.

En la pestaña *VISUALIZACIÓN DEL ESPECTRO*, podemos encontrar las siguientes opciones de configuración:

- *Espectro*: Gráfica que nos muestra el espectro de los sensores conectados a los canales del instrumento interrogador. Existe la posibilidad de seleccionar los canales que queremos visualizar al mismo tiempo con las casillas *CANAL 1* a *CANAL 4*.



**Figura 3.9. Pestaña VISUALIZACIÓN DEL ESPECTRO.**

- *Límites manuales:* Establece los márgenes de visualización de los espectros en términos de longitud de onda con la introducción de los valores en las casillas  $L_i$  (longitud de onda inicial) y  $L_f$  (longitud de onda final). Esta opción es útil para visualizar una franja concreta del espectro. Para otras opciones de visualización, como por ejemplo el aumento de una zona de interés, se dispone de las herramientas de visualización estándares que acompañan a la gráfica situadas en la parte inferior izquierda de la misma.
- *Guardar espectro:* Guardado en un archivo de texto con extensión .txt de los espectros que se visualizan en ese momento en la gráfica *Espectro*. Al presionar el botón aparece un cuadro de diálogo para introducir el nombre que queremos darle al archivo y seleccionar la ruta donde queremos guardarlo.
- *Activar guardado de espectro automático:* Esta casilla permite la posibilidad de guardar el espectro en un archivo de datos de forma automática. El intervalo de guardado se puede ajustar con las casillas *Horas* y *Minutos* del cuadro *Intervalo de guardado de espectro*. Cada vez se cumpla la condición de tiempo, se creará un archivo de datos en la ruta introducida en *Directorio para guardar espectros temporales* con el formato “día\_mes\_hora\_minutos.txt” (como por ejemplo, el archivo 05\_09\_13\_22.txt que contiene el espectro existente el día 5 de septiembre a las 13:22).

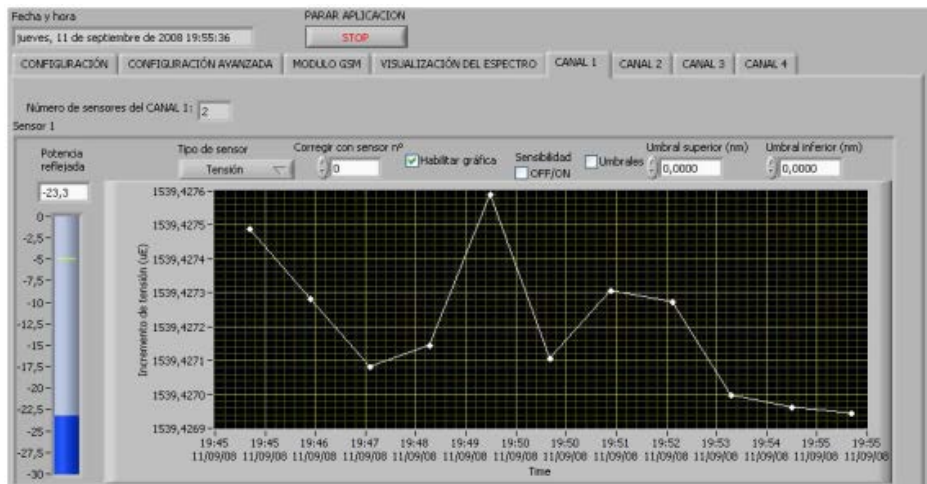


Figura 3.10. Pestaña CANAL 1.

En las pestañas *CANAL 1* a *CANAL 4* tenemos acceso a la información que nos proporciona cada uno de los sensores conectados al interrogador. En la parte superior de la pestaña se indica el número de sensores presentes en el canal actual. Debajo habrá tantos objetos sensores como indique ese número (en la captura ese número es 2).

El *objeto sensor* se ha creado con el fin de facilitar la labor de programación. Cada sensor tendrá uno asociado para acceder a la información que proporciona. Los campos que conforman dicho objeto son:

- *Potencia reflejada*: Conjunto de indicador y tanque con el valor de la potencia reflejada (en dBm) a la longitud de onda que presenta un máximo en reflexión.
- *Tipo de sensor*: Lista desplegable con dos posibilidades, *Deformación* o *Temperatura*. De este modo podemos indicarle al programa si ese sensor sirve para medir deformaciones (sensor de incrustado en el encapsulado) o para medir temperatura (sensor libre en el interior del tubo metálico).
- *Corregir con sensor nº*: Opción disponible solo si se trata de un sensor de deformación. Se ha de introducir el número de sensor que se utilizará para la compensación en temperatura del sensor de deformación. El sensor que se introduzca ha de ser de temperatura. El número de sensor aparece como etiqueta de cada *objeto sensor*, como por ejemplo *Sensor 2*.
- *Habilitar gráfica*: Activa o desactiva el dibujado de la gráfica del sensor.
- *Sensibilidad*: Casilla de verificación que al activarse aplica los coeficientes correspondientes introducidos en el cuadro *Parámetros de los sensores* de la pestaña *CONFIGURACIÓN AVANZADA*. Los coeficientes que se

aplicarán dependerán del *Tipo de sensor* que hayamos seleccionado. De este modo, los valores que mostremos en la gráfica corresponderán a deformación si hemos indicado que ese sensor es de deformación, o temperatura si el sensor es de temperatura. Si la casilla está desactivada, los valores de la gráfica serán las longitudes de onda del pico que refleja el sensor en cuestión.

- *Umbrales*: Casilla de verificación que activa los umbrales para ese sensor. Cada vez que se supere por exceso el umbral superior o por defecto el inferior saltará un mensaje de alarma que será almacenado en un archivo de sesión (archivo log). Si además está activada la casilla *Alarmas GSM* perteneciente al cuadro *Módulo GSM* en la pestaña *CONFIGURACIÓN*, se enviarán los correspondientes SMS.
- *Umbral superior y Umbral inferior*: Valor numérico de los umbrales cuando la casilla *Umbral* está activada. Si la casilla *Sensibilidad* está desactivada, estos valores serán interpretados como longitudes de onda en nanómetros (nm). Si está activada, serán interpretados como microstrains ( $\mu\epsilon$ ) si el *Tipo de sensor* seleccionado es de deformación o grados centígrados ( $^{\circ}\text{C}$ ) si el *Tipo de sensor* seleccionado es de temperatura.
- *Gráfica*: Representa los valores que obtenemos del sensor respecto del tiempo. Estos valores pueden ser longitudes de onda en nanómetros (nm), deformaciones unitarias en microstrains ( $\mu\epsilon$ ) o grados centígrados ( $^{\circ}\text{C}$ ) dependiendo del estado de los controles *Tipo de sensor* y *Sensibilidad*.

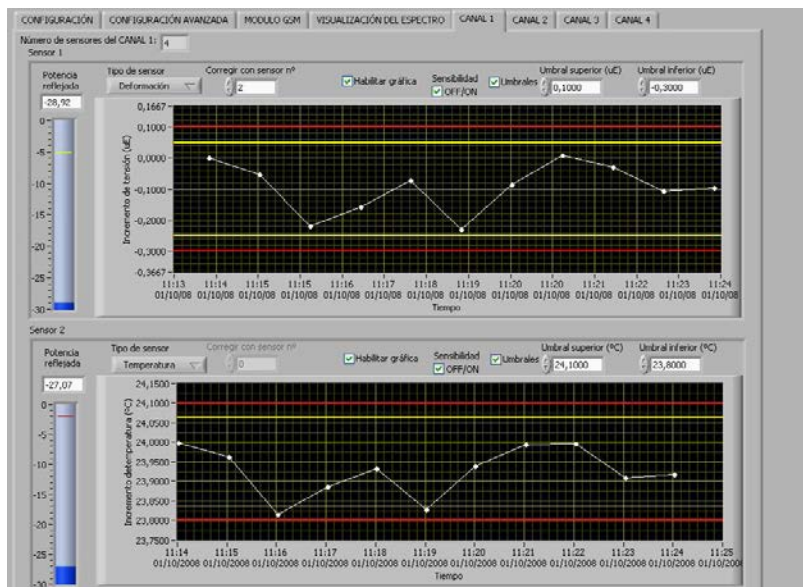


Figura 3.11. Pestaña CANAL 1 utilizando umbrales y sensibilidad.

En la Figura 3.11 se muestra una captura del programa mientras se monitorizaban dos sensores. Uno de ellos es de deformación y el otro de temperatura. Se han introducido unos umbrales y se ha activado la casilla de sensibilidad para mostrar unidades de ingeniería (microstrains y grados centígrados).

### 3.4.2. Sistema inalámbrico

Una de las características de las que se ha querido dotar al sistema de interrogación de sensores ópticos es el del acceso remoto a las medidas desde un equipo situado a cierta distancia de donde se encuentran los equipos de medida. Esta distancia puede ser desde unos pocos metros hasta cientos de kilómetros si se utiliza internet para conectarse desde cualquier punto del planeta.

Si se desea el acceso remoto en un radio cercano (cientos de metros), como por ejemplo puede ser el recinto de una obra, se necesitará un router inalámbrico, preferiblemente del mayor alcance posible, ya que de este modo se tendría acceso desde todos los puntos de interés dentro de una misma instalación. Si se quisiese tener acceso a los datos de monitorización desde cualquier ubicación mediante la conexión a internet, se necesitaría un router (no es necesario que sea inalámbrico) y un modem que tenga acceso a internet por medio de una conexión de datos con redes móviles (Figura 3.12).



**Figura 3.12. Conexión de los equipos para una red inalámbrica local.**

En ambas configuraciones se utiliza un ordenador local que hace la función de ejecutar el programa de toma de datos y a la vez sirve de mantenimiento de estos mismos datos. Desde el ordenador remoto se tendrá acceso a este ordenador local, y por tanto al software de interrogador de sensores y a los datos que se almacenan.

A la hora de realizar las conexiones de los equipos, se tendrá que tener en cuenta que todos ellos han de encontrarse en la misma subred. Esto significa que habrá que



tener precaución con las direcciones IP que se les asigne. El interrogador de sensores tiene una IP de fábrica, 10.0.0.121 y una máscara de subred 255.255.255.0. El router hace de mediador entre el interrogador de sensores y los ordenadores que quieren acceder a él, por lo que se le puede asignar una dirección IP de 10.0.0.122 en la interfaz con el interrogador de sensores y una dirección IP de 10.0.0.1 en la interfaz con los ordenadores

Por tanto, al ordenador local se le puede asignar la IP de 10.0.0.2 con la misma máscara de subred mencionada anteriormente, y al ordenador remoto una dirección IP de 10.0.0.3. Si se conectasen más ordenadores remotos, se les irían asignando las siguientes direcciones IP disponibles, esto es, 10.0.0.4, 10.0.0.5, etc. A los ordenadores que acceden al router se les ha de asignar como puerta de enlace predeterminada la dirección IP 10.0.0.1.

Para poder operar el software de interrogación de sensores, el lenguaje de programación LabVIEW 8.5 dispone de una herramienta denominada “Web Server” que se encarga de gestionar el acceso remoto. Para ello, primero hay que hacer uso de otra herramienta denominada “Web Publishing Tool” que consiste en el proceso de embeber un programa de LabVIEW en formato “html”, de modo que pueda ser accedida desde un navegador.

### **3.4.3. Alimentación mediante energía solar**

La energía solar es la energía producida por el sol y que es convertida a energía útil por el ser humano, ya sea para calentar o para producir electricidad. La radiación solar que alcanza la Tierra puede aprovecharse por medio del calor que produce a través de la absorción de la radiación, por ejemplo en dispositivos ópticos o de otro tipo.

La Tierra recibe una cantidad inmensa de radiación solar, aunque sólo la mitad de ella alcanza la superficie terrestre. Aún así, de los 174 petavatios de radiación que la superficie recibe, aproximadamente el 30 % es reflejado de vuelta al espacio, mientras que el resto es absorbido por océanos y tierra firme [Smil91]. El espectro electromagnético de la luz solar en la superficie terrestre está ocupado principalmente por luz visible y rangos de infrarrojos con una pequeña parte de radiación ultravioleta.

Recogiendo de forma adecuada la radiación solar, podemos obtener calor y electricidad. El calor se logra mediante los colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos. Ambos procesos nada tienen que ver entre sí, ni en cuanto a su tecnología ni en su aplicación. Este trabajo se centra en los sistemas fotovoltaicos para la transformación de energía solar en energía eléctrica.

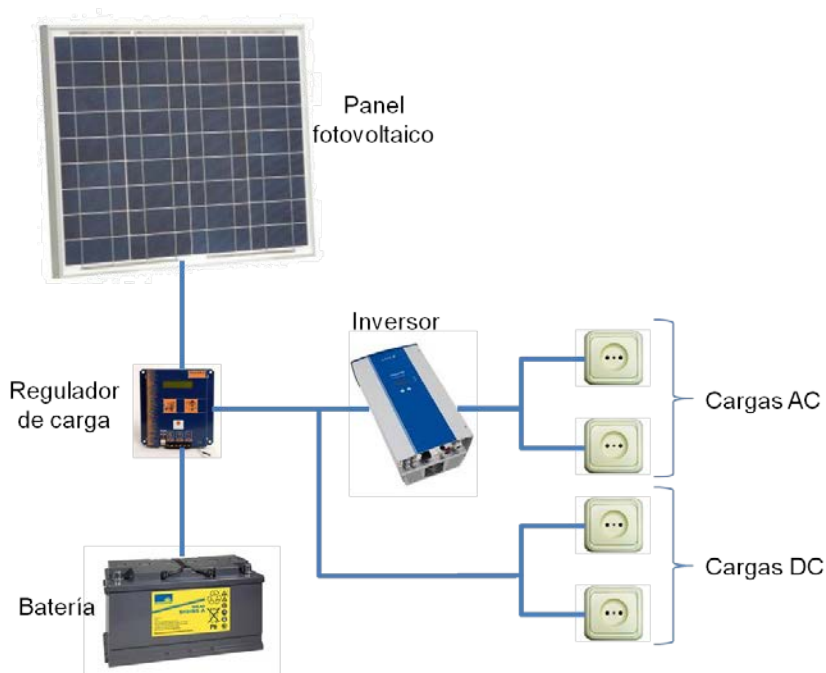
### 3.4.3.1. Sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico puede ser de dos tipos: aislado y conectado a la red. Los sistemas fotovoltaicos aislados están compuestos por generadores fotovoltaicos (que producen la energía a partir de la que reciben del Sol) y acumuladores (que la almacenan hasta el momento de su utilización). Por otro lado, los conectados a la red interactúan con el sistema eléctrico existente para complementarse.

Existen una serie de componentes que un sistema fotovoltaico precisa para el correcto funcionamiento del mismo [Lorenzo94]. Estos componentes son:

1. Panel fotovoltaico
2. Regulador de carga
3. Batería
4. Inversor
5. Cargas de corriente alterna (AC)

En el circuito de la Figura 3.13 se puede observar la conexión de los elementos fundamentales para que interactuar con un sistema fotovoltaico acabe siendo simplemente conectar un enchufe.



**Figura 3.13. Elementos de un sistema fotovoltaico.**

A continuación se explica en detalle cada uno de estos componentes:

### 1) *Panel Fotovoltaico*

El elemento principal de un sistema para convertir la energía solar en energía eléctrica es la célula fotoeléctrica, también llamada célula solar o célula fotovoltaica. Todas las células solares funcionan por el mismo principio: la luz incide en la superficie superior de la célula, y "empuja" los electrones del material con el que se ha fabricado hacia una capa inferior. Conectando las dos capas, conseguimos crear un circuito de "regreso a casa" para dichos electrones. Existen 2 tipos de paneles fotovoltaicos: cristalino y no cristalino (o thin film).

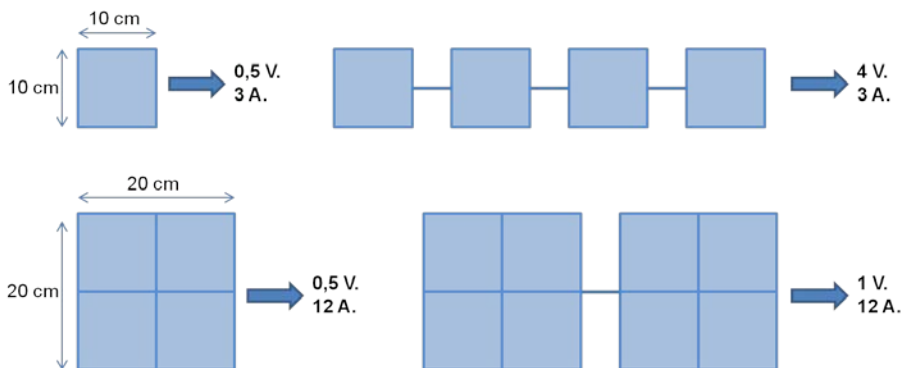
- Paneles fotovoltaicos cristalinos: Dentro de los paneles solares de tipo cristalino existen 2 variantes: monocristalino y policristalino. Las células solares más eficientes, basadas en el silicio que se encuentra en abundancia en la arena, son las de tipo monocristalino, donde cada célula se corta con un fino espesor a partir de una barra de silicio que ha recibido un tratamiento específico. Existen también las células de tipo policristalino, que combinan diferentes cortes pequeños de silicio.

El tipo policristalino es algo menos eficiente que el monocristalino en condiciones ideales de iluminación, pero es algo mejor cuando el sol alcanza ángulos más bajos de incidencia sobre el panel. En la práctica es el tipo más usado, aunque no tolera la inclusión de sombras, o los días nublados, ya que en esas condiciones su potencia de carga desciende sustancialmente.

- Paneles fotovoltaicos no cristalinos (thin film): Se trata de un tipo de silicio amorfo (no cristalino) que se usa ampliamente en calculadoras y que tienen un rendimiento inferior a la mitad del rendimiento de un panel basado en células de tipo cristalino. Las únicas ventajas de este tipo de células son que permiten su aplicación en paneles flexibles y que son más económicas de fabricar.

- Rendimiento y dimensiones

Las células fotovoltaicas cristalinas proporcionan un voltaje en circuito abierto de 0,5 voltios aproximadamente, independientemente del tamaño que tengan. La corriente eléctrica que producen es de unos 3 amperios por cada 100 cm<sup>2</sup> (10 cm x 10 cm) de célula. Las células de un panel se conectan en serie hasta obtener el voltaje deseado, pero al igual que las baterías conectadas en serie, ese conexionado no aumenta su capacidad de generar corriente. Por ejemplo, un panel con 36 células de 100 cm<sup>2</sup> en serie produciría unos 18 voltios capaces de producir una intensidad de corriente de 3 amperios, lo que significa una potencia de unos 54 vatios (la potencia es el resultado de multiplicar el voltaje por la intensidad de corriente).



**Figura 3.14 Tensiones y corrientes que proporcionan diferentes configuraciones de células fotovoltaicas.**

- Rendimiento

La potencia específica del panel sólo está disponible cuando el sol alcanza su máxima altura y la luz solar incide plenamente y sin ángulo sobre el panel, el resto del día el panel genera una cantidad inferior de corriente. Para aproximar el rendimiento de un panel instalado horizontalmente en nuestro sistema, no podemos esperar más que lo que equivale al máximo rendimiento durante cuatro horas; es decir, que un panel que especifica una salida de 5 amperios aportará aproximadamente 20 Ah en un día soleado. El amperio-hora (Ah) es una unidad de carga que indica la corriente eléctrica suministrada durante una hora. La equivalencia con el culombio (C) que es la unidad del Sistema Internacional es  $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$ . Además, las células fotovoltaicas pierden eficacia de voltaje cuando su temperatura aumenta. Por cada aumento de  $6^\circ \text{ C}$ , el rendimiento disminuye aproximadamente un 3%. No es extraño que un panel solar alcance en verano temperaturas superiores a los  $50^\circ \text{ C}$ , provocando una reducción del voltaje de un 15% (Figura 3.15).

## 2) Regulador de carga

Elemento muy importante para los sistemas de energía fotovoltaica. Entre sus funciones encontramos la de evitar sobrecargas en la batería que puedan producir daños, impedir la descarga de la batería en condiciones de escasa o ninguna luz y asegurar el funcionamiento del sistema en el punto de máxima eficacia.

Se podría considerar al *regulador* como el “cerebro” o la “CPU” en este tipo de sistemas. Normalmente todos los reguladores vienen equipados con un display en el que se nos muestra información detallada sobre los procesos que se llevan a cabo en el sistema fotovoltaico, tales como la potencia de carga, la potencia que se consume, temperaturas de operación y tiempo de descarga. Por último, decir que es uno de los elementos más baratos del sistema, ya que es casi totalmente eléctrico y no necesita ningún tipo de mantenimiento.

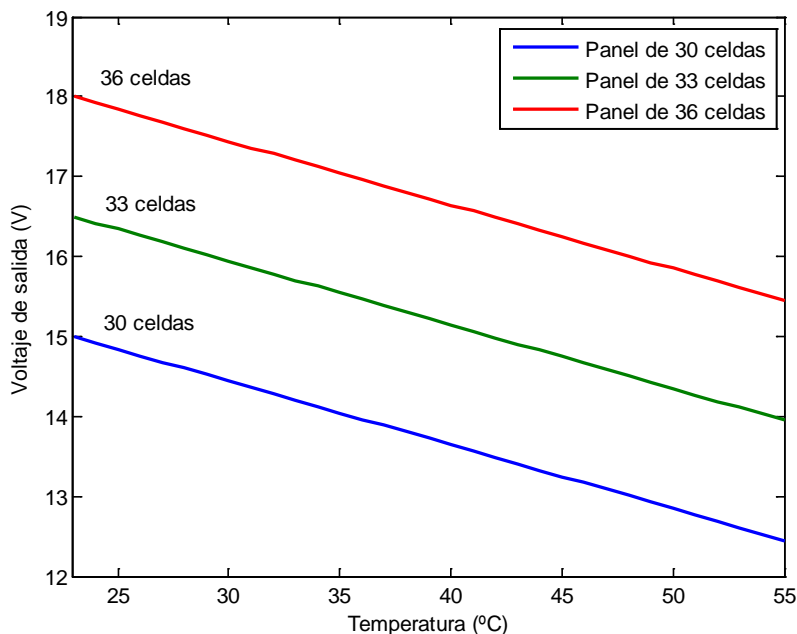


Figura 3.15. Voltaje de salida de paneles fotovoltaicos respecto de la temperatura.

### 3) Batería

Dispositivo que almacena la energía que le suministra la placa solar por medio del regulador para utilizarla en caso de condiciones de escasa luz. Las baterías que se utilizan para este tipo de sistemas suelen ser bastante parecidas a las de los turismos, siendo sus características técnicas similares. De los tipos disponibles, la batería de gel presenta ventajas sustanciales respecto a los otros tipos de baterías. Algunas de esas ventajas son:

- Absolutamente libre de mantenimiento
- Medioambientalmente limpia
- No hay escape de vapores de ácido
- Extremadamente baja gasificación
- Destacable arranque en frío durante toda su vida útil
- Mínima descarga
- Superior rendimiento de trabajo en ciclos
- Permite un ángulo de inclinación de 180°
- Probada capacidad de descarga profunda
- Sin estratificación
- Alta resistencia a la vibración

### 4) Inversor

Convierte la onda continua de 12 V que le llega desde la batería a la onda sinusoidal de 220V común. El inversor no es un dispositivo fundamental en este tipo de sistemas, ya que solo es necesario cuando queremos conectar a la salida del sistema aparatos que funcionen en 220V. Si, por el contrario, se pudiera alimentar nuestros dispositivos con corriente continua, el inversor carecería de importancia.

### 5) Carga AC

Enchufes comunes a los que poder conectar aquellos aparatos que se necesiten.

#### 3.4.3.2. *Sistema fotovoltaico adquirido*

- *Elección del panel*

La elección del panel fotovoltaico es una tarea crucial, ya que una elección errónea puede llegar a causar falta de potencia (si es demasiado pequeño), o dificultad para transportarlo (si es demasiado grande). Los paneles para este tipo de sistemas son mayoritariamente de tipo cristalino (monocristalino o policristalino) ya que son los más eficientes y resistentes, dando el menor tamaño y proporcionando una potencia considerable.

Por tanto, es indispensable, calcular previamente cuántos elementos queremos conectar a nuestro panel, cuánto consume cada uno de estos elementos, y por supuesto, cuántas horas queremos que el sistema esté en funcionamiento.

Para este caso, se necesitaba un sistema autónomo basado en energía fotovoltaica que pudiera alimentar al menos 2 horas al día el conjunto de dispositivos que se necesitan para una monitorización de sensores, interrogador y portátil. Los cálculos fueron un poco más en profundidad pensando en la posibilidad de que el sistema se pudiera ubicar en un sitio concreto y enviara datos una vez al día por internet, para lo cual también necesitaríamos un router o cualquier dispositivo móvil inalámbrico.

Por otra parte, como queremos que nuestro sistema pueda funcionar un intervalo de tiempo dado al día, aunque la placa solar debe suministrar potencia para ello, no debemos olvidar, que también se dispondrá de una batería, lo que nos da otra variable y así poder reducir el tamaño del panel o en su defecto, reducir el tamaño de la batería.

Siendo todas estas nuestras condiciones, procedimos a hacer algunos cálculos para hallar las potencias requeridas:

$$P_{total} = 70 W(\text{Portátil}) + 25 W(\text{Interrogador}) + 20 W(\text{Router}) = 115 W \quad (3.18)$$

Por tanto, teniendo una potencia total de 115 W, se decidió escoger una **placa de 130W**, y apoyar con una batería de gel que después se comentará. El tipo escogido fue el policristalino, ya que su eficiencia y precio nos demostraban que era la opción óptima. Una vez escogida la placa, los demás elementos se eligen en base a la potencia y corriente máxima que se manejará dado el módulo fotovoltaico adquirido.

- **Propiedades de los elementos adquiridos**

Después de mencionar los elementos necesarios para nuestro sistema, pasaremos a explicar brevemente las características de cada uno de los elementos adquiridos para nuestro módulo autónomo de energía fotovoltaica.

Como se ha comentado anteriormente, la potencia elegida para el panel solar se fija en 130W, ya que nos entregaba potencia suficiente para alimentar nuestros aparatos y cargar la batería al mismo tiempo.

Posteriormente, se eligen el resto de los elementos atendiendo casi únicamente a criterios de potencias soportadas y mínimo coste, es decir, se pretende comprar el dispositivo más barato que pueda soportar con cierta holgura la potencia que le estará entregando el panel fotovoltaico, ya que si se adquieren dispositivos más caros con mejores prestaciones, lo único que realmente se está haciendo es encarecer un producto que debido a que como el panel no entrega más potencia, el módulo entero en sí no aumentará en sus prestaciones finales. Por último, se pretende adquirir un dispositivo que necesite el mínimo mantenimiento posible, aunque para los sistemas fotovoltaicos la gran mayoría de los productos que se comercializan cumplen holgadamente este requerimiento.

Siendo así las especificaciones, se pasó a estudiar varios de los dispositivos que ofrecía el mercado y se concluyó en adquirir los siguientes:

- **Placa solar:** Panel Fotovoltaico policristalino de la empresa Siliken. Se trata de un panel fotovoltaico de 36 células, capaz de entregar una potencia de salida nominal de 130 W con una tolerancia de  $\pm 5\%$ . La tensión y corriente nominales son de 17,2 V y 7,54 A respectivamente. La deriva en la potencia de salida debido a la temperatura es de  $-0.43\% / ^\circ\text{C}$ . Las dimensiones físicas de esta placa son 149 cm x 67.3 cm x 4 cm con un peso de 12 Kg.
- **Regulador:** Regulador Isoler D30 con una tensión nominal de 12/24 V o 48 V y corriente máxima de 30A. Dispone además de una sonda para la compensación de temperatura, siendo la deriva de  $-2\text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Sus dimensiones físicas son de 15.6 cm x 15.7 cm x 2.7 cm con un peso de 540 g.

- **Batería:** Batería de gel de Sonnenschein, de 85Ah. (El amperio-hora es una unidad de energía que define la corriente que podría suministrar la batería en una hora antes de descargarse completamente). Tiene un voltaje nominal de 12 V y una carga máxima de aproximadamente 600 A. Sus dimensiones físicas son de 33 cm x 17.1 cm x 23.6 cm con un peso de 31 Kg.

Cabe destacar de la batería que se precisa una labor continua de mantenimiento, al contrario que el resto de elementos del sistema fotovoltaico. Sin embargo, la batería de gel requiere un menor mantenimiento, y es por eso por lo que se decidió adquirir una batería de este tipo.

- **Inversor:** Inversor de Onda de 12/220 V modelo Phoenix C12/1200 de la empresa Victron Energy. Sus dimensiones físicas son de 37.5 cm x 21.4 cm x 11 cm con un peso de 10 Kg.
- **Cargas AC:** Se trata de dos tomas de corriente tipo C, de las que se utilizan en España. En nuestro sistema tenemos dos ya conectadas, pero también existe la posibilidad de conectar cualquier tipo de expansor de corriente. Proveen a los dispositivos conectados de una tensión alterna de 220 V que necesitan para funcionar.

- **Características del sistema completo**

Una vez presentados todos los componentes del módulo autónomo, es importante resaltar algunas características del comportamiento global del sistema. El sistema tiene capacidad para poder alimentar durante un periodo de tiempo considerable, el interrogador de sensores, un ordenador portátil y un router inalámbrico. El tiempo que puede estar conectado depende por supuesto de las condiciones de luz solar.

En el caso más adverso posible, en el cual no tuviéramos luz durante algunos días, ya sea por estar en una época del año en la que no luzca mucho el sol, o por que las condiciones de nubes no nos permiten visibilidad directa con el mismo, se podría conseguir una autonomía de:

$$\frac{85Ah(Energía\ Batería)}{9Ah(Consumo)} \geq 9,44horas \quad (3.19)$$

El consumo se halla principalmente de las pruebas empíricas realizadas, ya que es impreciso realizar cálculos teóricos para este valor, por no poder tener en cuenta la cantidad de energía que podían consumir los equipos conectados al panel solar (*regulador e inversor*) ya que no se disponía de ellos antes de adquirirlos. Por tanto, se entiende que el valor empírico obtenido en pruebas puede ser mucho más fiable.

Como se puede comprobar, disponemos de suficiente autonomía para alimentar los equipos durante varios días, considerando que no necesitamos que estén



encendidos mucho más de un par de horas diarias. Lo que sí debemos tener en cuenta es que en este cálculo, se ha utilizado la carga de la batería como si estuviera al 100%, lo que en la práctica es imposible, ya que el mero hecho de que esté tan cargada, hace que ella misma se descargue poco a poco, aparte de tener en cuenta que en los días anteriores a nuestro “caso más adverso”, es posible que la batería tampoco llegara a cargarse completamente, ya que cada día tendríamos que utilizar nuestros equipos. Siendo así, y suponiendo una carga aproximada de un 70% cuando empieza nuestro “caso peor”, la autonomía sería de:

$$\frac{85Ah(Energía\ Batería) \cdot 0,7}{9Ah(Consumo)} \approx 6,5horas \quad (3.20)$$

Resultado que se aproxima mucho más a la realidad de lo que se acercaba el anterior. Si ahora consideramos que los equipos hipotéticamente podrían estar 1.5 horas al día funcionando, tendríamos una autonomía de más de 4 días en condiciones de muy poca luz, lo que nos da un margen de maniobra sustancial. Incluso si se redujera el intervalo de tiempo de funcionamiento diario, el margen se hace mayor si cabe.

Por otra parte, dado que el mantenimiento es un aspecto importante, se puede asegurar que el sistema autónomo podría funcionar durante años con la única salvedad de comprobar cada cierto tiempo si algún objeto ha podido dañar algún componente, o si por algún evento inesperado, el panel solar recibe alguna sombra que anteriormente no recibía. Por tanto, hablamos de un sistema con mínimo mantenimiento. En las Figuras 3.16 y 3.17 se muestran unas imágenes del sistema fotovoltaico adquirido una vez montado junto al interrogador de sensores. Para facilitar el traslado del sistema, los elementos más pesados (principalmente batería e inversor) se instalaron en el interior de una cabina.

### • **Comprobación del tiempo de autonomía en condiciones de luz**

Esta prueba consistía en dejar al equipo funcionar el mayor tiempo posible en condiciones de luz para poder evaluar la autonomía del mismo. Aquí no se precisa de software de programación de tareas, ya que se encienden todos los dispositivos, y se comprueba cuánto tiempo es capaz el módulo autónomo de alimentarlos hasta dejar de funcionar.



Figura 3.16. Montaje del sistema fotovoltaico adquirido.

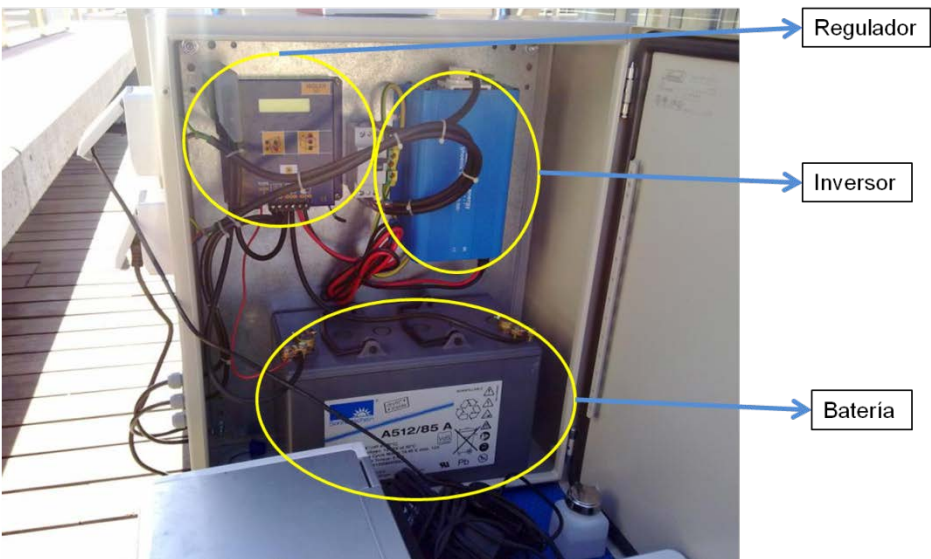


Figura 3.17. Detalle de la cabina donde se hallan el regulador, el inversor y la batería.

En este caso las condiciones y energías utilizadas fueron:

Fecha	21 de febrero de 2011
Duración de la prueba	3 horas
Condiciones	2 horas de nubes y 1 hora de sol
Energía Cargada	23 Ah
Energía Consumida	26 Ah

**Tabla 3.1. Características del sistema fotovoltaico adquirido en condiciones de luz.**

De esta tabla se pueden extraer varias conclusiones:

1. El sistema en condiciones de luz puede aguantar indefinidamente. En realidad, simplemente estamos comprobando que habíamos adquirido un equipo con una potencia suficiente como para alimentar el sistema completo, ya que si nos damos cuenta, las energías cargadas y gastadas son prácticamente iguales, y más, teniendo en cuenta que 2 de las tres horas, la placa solar no recibió toda la potencia que podría haber estado cargando. Con lo que se deduce que el sistema en condiciones de luz, **gasta lo mismo que carga.**
  2. El sistema trabajando a ritmo completo gasta casi 9 Ah por hora. Dato bastante importante para poder hacer después cálculos o programar tareas y saber cuál será nuestro margen de maniobra.
  3. Cuando la placa solar no recibe luz directa del sol, la potencia de carga baja considerablemente al 40 o 50% de su valor nominal, hándicap que puede hacerse más importante en estaciones del año con más probabilidad de nubes.
  4. Por último, señalar que en condiciones de luz, el equipo puede funcionar también perfectamente, aún con los equipos funcionando sin parar.
- **Comprobación del tiempo de autonomía en condiciones de escasa luz**

La última prueba que se realizó, parecida a la anterior, fue para poder calcular el tiempo de autonomía en condiciones de poca o ninguna luz. Esta prueba era

importante, ya que nos podía dar un valor práctico del tiempo que puede el sistema estar operativo en el “caso peor”.

Para esta prueba se conectaron todos los dispositivos como en las pruebas anteriores, se puso en marcha la adquisición de datos y el interrogador. Se hizo todo igual que en la prueba anterior, salvo que se hizo dentro del laboratorio, y en una habitación con la luz apagada, lo que permitía suponer con seguridad que la placa solar no iba a cargar nada la batería. El ensayo se realizó hasta que la batería se descargó y los equipos dejaron de funcionar. Para este último caso, las condiciones y energías fueron:

Fecha	25 de febrero de 2011
Duración de la prueba	6,5 horas aproximadamente
Condiciones	Oscuridad
Energía Cargada	0 Ah
Energía consumida	58 Ah

**Tabla 3.2. Características del sistema fotovoltaico adquirido en condiciones de escasa luz.**

A la vista de los resultados de la Tabla 3.2 y las observaciones realizadas se puede concluir que:

- La batería tenía una carga al iniciar la prueba de:

$$\frac{58Ah(Energía\ consumida)}{85Ah(Energía\ total)} \times 100 = 68\% \text{ (Estado inicial)} \quad (3.21)$$

- Se pudo observar que el sistema empezaba a fallar aunque la batería todavía tuviera energía como para poder encender los equipos, aunque volviera a fallar, lo que nos hace pensar que no debemos nunca apurar la energía de la misma.
- Aunque aproximar el nivel de batería resulta complicado en este tipo de situaciones, si realizamos los cálculos recogiendo datos del fabricante y los hallados empíricamente, podemos deducir que la carga a la que la batería empezó a fallar se podría aproximar a 5 Ah.

- Se obtuvo un fichero de datos de 6,5 horas, lo que nos permitiría tener el equipo en condiciones de muy baja luz durante 6 días aproximadamente, suponiendo 1 hora el día de monitorización, lo que nos da un margen de maniobra bastante amplio. Asimismo, los otros dispositivos, estarían conectados a un temporizador, y así conseguimos que el sistema no consuma prácticamente nada mientras queramos mantener el sistema a la espera.

### 3.4.3.3. Programación de tareas

Para el segundo de los objetivos, el que tiene que ver con la programación de tareas en el entorno de un PC, se han utilizado las configuraciones que dispone el sistema operativo para realizar todo tipo de tareas de automatización, desde suspender el ordenador, reactivarlo tras un tiempo arbitrario, iniciar una aplicación, o simplemente apagar el ordenador. Todo ello con flexibilidad, ya que existe la posibilidad de programar las tareas para que se ejecuten todos los días, ciertos días de la semana, o incluso un día determinado. El trabajo conjunto de estas configuraciones junto con el software de monitorización desarrollado, permite a un ordenador iniciarse, ejecutar la tarea o las tareas programadas (monitorizar los sensores, enviar datos, etc...), y volver al estado de suspensión o hibernación para un menor consumo de energía. Todo ello con el objetivo de poder monitorizar varios sensores ópticos en ciertos momentos del día, y en otros, tener el sistema consumiendo lo menos posible. Es importante también explicar la diferencia entre suspensión e hibernación. Si bien es cierto que el estado de suspensión no acarrea ningún volcado a memoria de datos ni backups, el consumo de energía es considerablemente superior al de hibernación, en el que el ordenador prácticamente consume 0 Wattios. Siendo así, se decidió que el ordenador pasara a estado de hibernación, pero como el volcado de datos a memoria sí que se hace en este proceso, hay que tener muy en cuenta que no se deje ninguna aplicación abierta que pueda saturar la memoria RAM, ya que eso conllevaría errores de memoria disponible a la reanudación de las tareas programadas.

Se realizó una prueba para comprobar si tanto el software de programación de tareas, como el de adquisición de datos, eran capaces de trabajar juntos, y si el ordenador también podía gestionar todos sus cambios de estado. Se programaron una serie de tareas de modo que se pretendía que el ordenador se encendiera e hibernara de manera automática, mientras en las etapas en que permanecía encendido el ordenador se tomaban datos de los sensores conectados al interrogador. En concreto, cada una de las 3 fases del ensayo consistió en los siguientes pasos:

- Encendido del ordenador desde hibernación
- Arranque del programa de toma de datos 1 minuto después del encendido
- Cierre del programa de toma de datos después de 5 minutos
- Hibernación del ordenador.

En la Figura 3.18 se muestra el archivo de datos tomado en dicha prueba, donde se puede observar cómo el archivo de datos continúa a otra hora sin más consecuencia que un corte en las horas de monitorización.

Fecha	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4	CH_1 S_1	CH_1 P_1
17/02/2011 16:45:20	1	0	0	0	1570.5976	-9.5100
17/02/2011 16:46:20	1	0	0	0	1570.5964	-9.4700
17/02/2011 16:47:20	1	0	0	0	1570.5931	-9.5500
17/02/2011 16:48:20	1	0	0	0	1570.5931	-9.5300
17/02/2011 16:49:20	1	0	0	0	1570.5953	-9.5300
17/02/2011 17:07:20	1	0	0	0	1570.5927	-9.5800
17/02/2011 17:08:20	1	0	0	0	1570.5921	-9.5600
17/02/2011 17:09:20	1	0	0	0	1570.5931	-9.4900
17/02/2011 17:10:20	1	0	0	0	1570.5933	-9.5500
17/02/2011 17:11:20	1	0	0	0	1570.5954	-9.4900
17/02/2011 17:28:20	1	0	0	0	1570.5974	-9.5800
17/02/2011 17:29:20	1	0	0	0	1570.5971	-9.4700
17/02/2011 17:30:20	1	0	0	0	1570.5974	-9.5200
17/02/2011 17:31:20	1	0	0	0	1570.5967	-9.5000
17/02/2011 17:32:20	1	0	0	0	1570.5932	-9.4400

Figura 3.18. Archivo de datos obtenido con la programación de tareas.

Se puede apreciar que el programa de toma de datos guardaba una toma cada minuto, por lo que se disponen de 5 datos en cada una de las fases. Además, se puede comprobar que la toma de datos comienza 20 segundos después del arranque del programa, debido al tiempo necesario para la apertura de la conexión de red con el interlogador de sensores y a la inicialización del mismo.

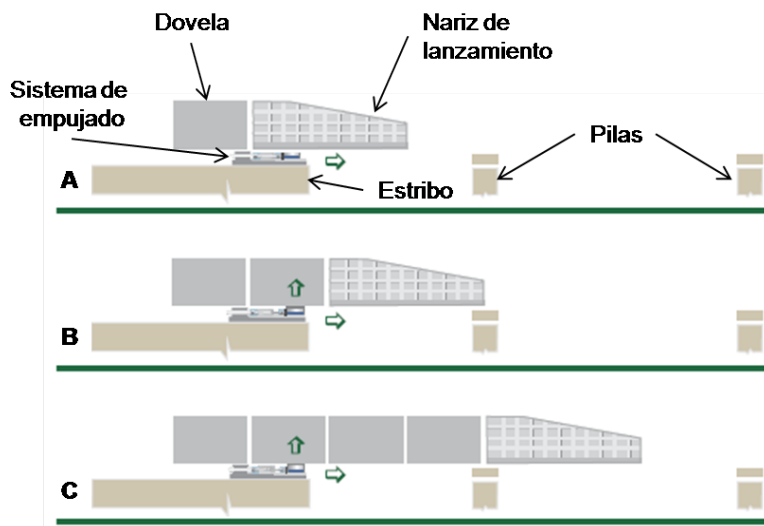
### 3.5. Monitorización de sensores en una obra real

La estructura sobre la que se llevó a cabo la instalación y monitorización de sensores ópticos en una obra real se trata de un puente empujado, es decir, construido mediante la técnica de lanzamientos por incrementos sucesivos [Göhler00]. Esta técnica es ampliamente conocida por los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, aunque resulta desconocida para personas menos familiarizadas con la terminología de la construcción civil. Es por ello que primero se realizará una introducción teórica a esta técnica y posteriormente se presentarán los trabajos de instalación de los sensores en el puente y los resultados que se extrajeron de la monitorización de los mismos.

#### 3.5.1. Introducción a los puentes construidos mediante la técnica de lanzamientos por incrementos sucesivos

- Procedimiento constructivo

La superestructura se fabrica en tramos de dovelas de una determinada longitud en un parque de fabricación atrás de un estribo en el eje del puente. Cada dovela subsecuente se cuela directamente contra la anterior, de tal forma que la estructura resultante se avanza hacia adelante por medio de unos dispositivos hidráulicos especiales.

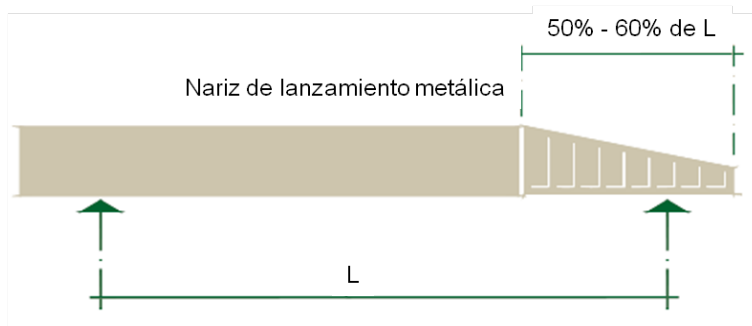


**Figura 3.19. Fases del proceso constructivo de un puente empujado.**

En la Figura 3.19.A se observa la primera dovela fabricada unida a la nariz de lanzamiento (parte de la estructura que se explicará más adelante), apoyando ambas en el estribo. En la Figura 3.19.B se muestra como se acopla la segunda dovela a la primera. Posteriormente se lanza este conjunto de dovelas y nariz de lanzamiento en dos pasos: primero se levanta la estructura y posteriormente se hace la avanzar mediante gatos hidráulicos. Este proceso se repite tantas veces como sea necesario para que el puente pueda salvar la distancia completa (Figura 3.19.C).

Durante el lanzamiento del puente, la superestructura está sujeta continuamente a cambios en la ley de momentos flectores correspondientes a los máximos de peso propio, de tal forma que cualquier sección transversal se mueve de zonas de momentos positivos a zonas de momentos negativos y viceversa. Por lo tanto, los esfuerzos de tensión se presentan alternadamente en la parte superior e inferior de cada sección al moverse el puente por todas las pilas durante la construcción.

Por otra parte, en este tipo de construcción se presenta un problema muy específico del sistema en cuestión, cuando un claro entero está en voladizo durante las fases de empujado. Para evitar un momento flexionante máximo se dispone de un elemento metálico denominado “nariz de lanzamiento” sujeto a la parte delantera de la estructura, ya que la nariz alcanza la siguiente pila cuando la estructura no ha adquirido suficiente longitud para producir una ley de momentos flexionantes elevados.



**Figura 3.20. Nariz de lanzamiento característica de un puente empujado.**

La nariz de lanzamiento es una estructura metálica normal, de preferencia fabricada en varias secciones para facilitar su transporte a la obra. Deberá unirse “in situ” con tornillos calibrados o bien con soldadura que garantice que no existan movimientos relativos entre las secciones. La longitud de la nariz de lanzamiento se plantea económicamente entre el 50% y el 60% del claro libre, siendo el primer valor más usual para puentes de ferrocarril y el segundo valor para puentes de tráfico rodado.

En la parte delantera de la nariz, en la zona de aproximación a las pilas, se instalarán unos gatos especiales, cuyo objetivo es recuperar la flecha de peso propio que toma la estructura en voladizo al llegar a la pila.

- **Parque de fabricación**

El parque de fabricación es el lugar en el que se construyen las dovelas y se unen entre sí. El tamaño de la dovela suele variar entre 15 y 25 m, dependiendo esto realmente de la longitud total del puente. Si éste es muy largo, se justificará una mayor longitud de molde. En la figura 3.21 se muestra el esquema de un parque de fabricación típico en este tipo de construcciones.

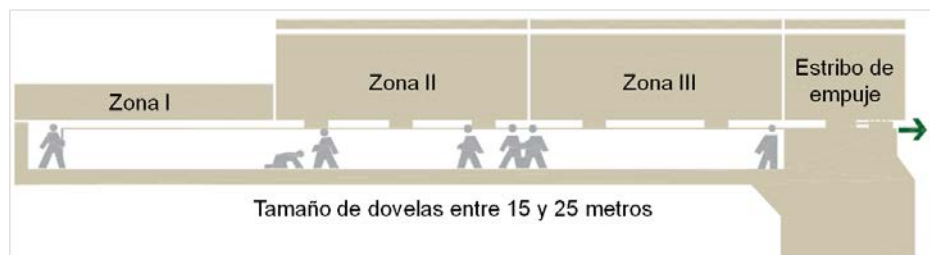
Las diferentes zonas en las que se divide un parque de fabricación típico se explican a continuación:

ZONA I: Donde se fabrica la parte inferior del cajón (losa de fondo).

ZONA II: Donde se fabrica la parte superior del cajón (almas y vuelos).

ZONA III: Es una transición entre la zona II y el estribo de empuje, cuyo objetivo es que el puente tenga suficiente longitud y contrapeso para que éste no vuelque antes de que la nariz alcance la primera pila.





**Figura 3.21. Parque de fabricación.**

Cabe mencionar que aunque el personal de obra puede permanecer en el parque de fabricación para la construcción de las dovelas, han de abandonar el lugar imperativamente durante el proceso de lanzamiento del puente para evitar accidentes.

- **Sistema de empujado**

Los equipos modernos de empuje se componen de un cilindro vertical que levanta el puente, y que lo empuja. El cilindro vertical asciende 4 ó 5 mm, con lo que recibe una gran carga vertical y en consecuencia transmite una carga horizontal por el rozamiento que existe con la estructura. A continuación se ponen en marcha los cilindros horizontales que empujan hacia adelante movilizándolo al conjunto de cilindro vertical más puente, del orden de 25 cm. Al terminar este ciclo el cilindro vertical descende, se libera del puente y el conjunto horizontal se retrae llevando consigo al cilindro vertical. Este ciclo tarda aproximadamente 2.5 minutos, por lo que el lanzamiento de una dovela de 20 m es del orden de 3 horas.

El equipo de lanzamiento permite además de mover el puente hacia adelante regresarlo a voluntad. Esta operación complementaria es absolutamente indispensable en la ejecución de la obra, para poder corregir ciertos errores en el alineamiento, al aproximar la nariz a las pilas, cuando alguna almohadilla es insertada en forma inversa, etc.

- **Apoyo deslizante**

En todos los puntos donde el puente se apoya, ya sean pilas, estribos y la zona III, en el parque de fabricación, se dispondrá de apoyos deslizantes. Estos apoyos están formados por un bloque de cemento fuertemente armado de 15 a 35 cm de espesor y perfectamente nivelado, sobre el que se asienta una chapa de acero inoxidable especial tensada. Sobre esta chapa se disponen unas almohadillas de neopreno de 10 a 13 mm de espesor. La parte de neopreno va en contacto con la estructura y con el acero inoxidable. En su movimiento, el puente arrastra la almohadilla hacia adelante y es introducida de nuevo por detrás.

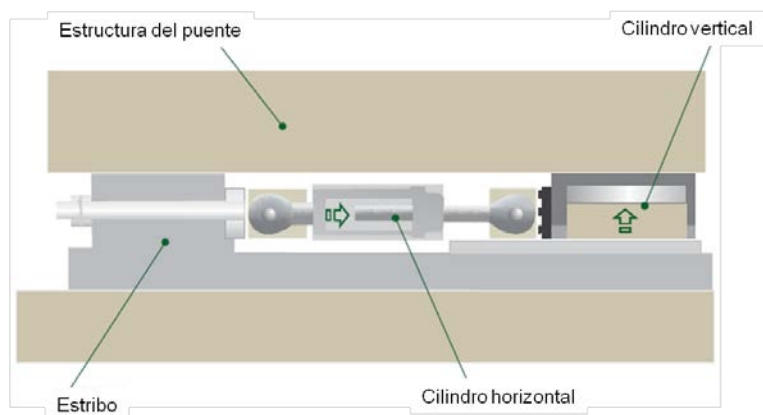


Figura 3.22. Equipo hidráulico de empujado.

### 3.5.2. Instalación de los sensores ópticos

Como se ha comentado anteriormente, la estructura sobre la que se han llevado a cabo los trabajos descritos es el puente sobre el corredor del río Cadagua perteneciente a la Variante Sur Metropolitana de Bilbao (Figura 3.23). Esta estructura consiste en un cajón metálico que será lanzado en diferentes fases, hasta llegar a salvar por completo la distancia existente entre los estribos inicial (E 1-1) y final (E 1-2). La estructura final tendrá una longitud de 364,122 metros, divididos en 4 tramos entre las pilas P 1-1, P 1-2 y P 1-3.

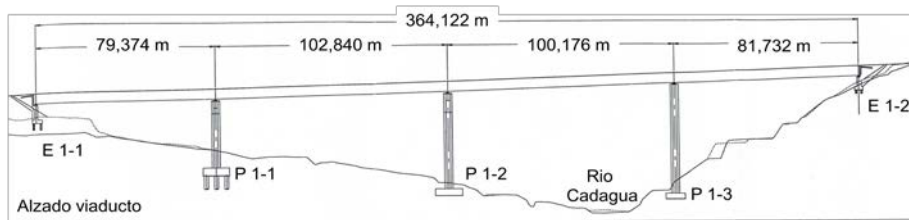


Figura 3.23. Alzado del viaducto de la Variante Sur Metropolitana de Bilbao.

El objetivo principal de la instalación de sensores ópticos en esta estructura consiste en la obtención de las deformaciones que se producen en la misma durante las fases de lanzamiento, ya que ésta queda en voladizo antes de llegar a las pilas teniendo que salvar grandes distancias y por lo tanto, sufrirá grandes deformaciones que podrían incluso poner en riesgo la integridad de la obra.

La sección del cajón metálico presenta una geometría trapezoidal (Figura 3.24) con bases de 5,55 metros y 6,60 metros, y con una altura de 4,43 metros. Sobre el

cajón metálico se sitúa el tablero sobre el que se asfalta para la creación de carretera para tráfico rodado. La ubicación de los sensores de deformación dentro de cada sección transversal se indica en la figura 3.24 con unos puntos negros.

La instalación de los sensores ópticos fue llevada a cabo en el viaducto del 2 al 6 de noviembre de 2009. Los sensores se instalaron en 5 secciones transversales. Concretamente, las correspondientes a los diafragmas del D61 al D65. Estas secciones son las que, cuando el cajón se encuentra con su voladizo máximo, se sitúan más próximas a la pila P1-2, tratándose de las secciones más desfavorables. Dentro de las secciones monitorizadas, la sección D65 es la que se encuentra más próxima a la nariz de lanzamiento y la D61 la que se encuentra más alejada de la misma.

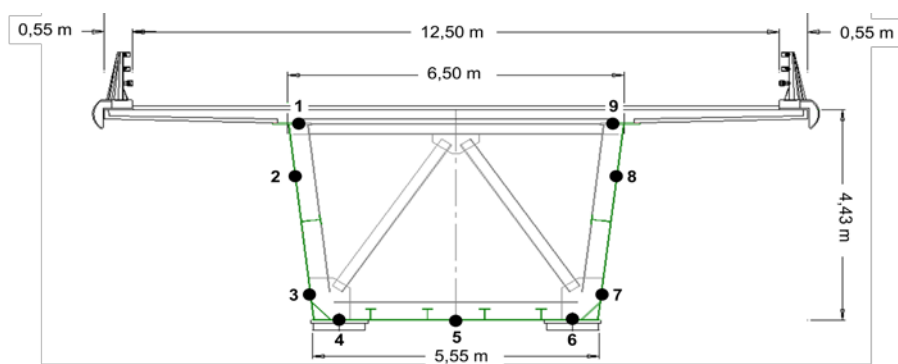


Figura 3.24. Sección transversal del cajón metálico.

En cada una de las secciones transversales se han empleado 9 sensores ópticos de deformación, y 2 de temperatura, uno situado en cada margen del cajón. Los sensores de una misma sección transversal fueron conectados en serie, empleando un único cable de fibra óptica, que fue el que se conectó al interrogador óptico.

En la instalación se necesitaron un total de 55 sensores ópticos. De éstos, 45 se emplearon para la medida de las deformaciones, y los restantes 10, fueron los encargados de la medida y el control de la evolución de la temperatura, con objeto de poder llevar a cabo la compensación térmica de temperatura que exige el sensado óptico. La nomenclatura de los sensores de deformación instalados en las 5 secciones se detalla en la tabla 3.3.

Como el interrogador óptico dispone de 4 canales ópticos y se necesitaban monitorizar 5 secciones transversales, se hizo necesario el empleo de un expansor de canales, ampliando de este modo la capacidad del sistema hasta 16 canales ópticos. Para la captura de datos en local se conectó un ordenador portátil a un router inalámbrico.

POSICIÓN	SECCIÓN				
	D61	D62	D63	D64	D65
1	Sensor 1	Sensor 10	Sensor 19	Sensor 28	Sensor 37
2	Sensor 2	Sensor 11	Sensor 20	Sensor 29	Sensor 38
3	Sensor 3	Sensor 12	Sensor 21	Sensor 30	Sensor 39
4	Sensor 4	Sensor 13	Sensor 22	Sensor 31	Sensor 40
5	Sensor 5	Sensor 14	Sensor 23	Sensor 32	Sensor 41
6	Sensor 6	Sensor 15	Sensor 24	Sensor 33	Sensor 42
7	Sensor 7	Sensor 16	Sensor 25	Sensor 34	Sensor 43
8	Sensor 8	Sensor 17	Sensor 26	Sensor 35	Sensor 44
9	Sensor 9	Sensor 18	Sensor 27	Sensor 36	Sensor 45

Tabla 3.3. Nomenclatura y posición de los sensores instalados.

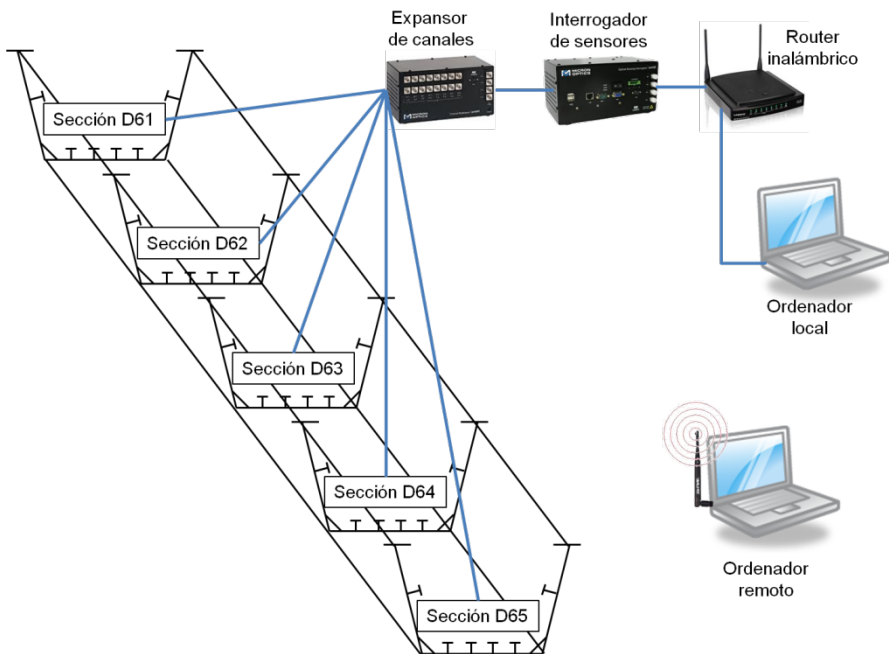


Figura 3.25. Esquema de la conexión de las secciones a monitorizar.

El interrogador de sensores ópticos, el expansor de canales y el portátil para toma de datos, fueron colocados en el interior del cajón. De este modo, se evitó la posibilidad de roturas de cableado y superposición con los otros tajos que seguían abiertos en la obra. No obstante el *router* empleado disponía de una cobertura

inalámbrica de 300 metros, de modo que se pudo llevar de forma remota el control del programa de interrogación, la modificación de los parámetros de detección de datos, y conocer en tiempo real las deformaciones que sufría el cajón mediante un ordenador portátil que se dispuso en la caseta de obra (Figura 3.25).

El proceso de instalación de los sensores ópticos es un aspecto fundamental, puesto que la transferencia de deformación y temperatura depende en gran medida de una correcta instalación en la superficie que se va a medir. La instalación se realizó siguiendo unos pasos bien definidos para cada uno de los sensores que se instaló:

- 1) Preparación de la superficie: La superficie de acero del cajón del viaducto fue pintada posteriormente a su fabricación para evitar el proceso de oxidación del metal. Fue necesario quitar esta capa de pintura de grosor considerable con una lija radial para asegurar la máxima transferencia de deformación/temperatura de la estructura de acero a los sensores ópticos. Además, con este procedimiento se consigue una superficie plana con el objetivo de mejorar el proceso de pegado del sensor óptico. Por último, para terminar de preparar la superficie donde se instalará el sensor óptico, se ha de eliminar los restos de polvo producidos por el lijado y por la suciedad ambiental con un algodón empapado en alcohol isopropílico.
- 2) Preparación del adhesivo y del sensor: Una vez que la superficie está lista, el siguiente paso es el de preparar el sensor. Primero, se coloca el sensor a una cinta adhesiva de 15 centímetros de longitud, de modo que el lado del sensor que va a ser adherido a la superficie a medir quede boca arriba. La preparación del adhesivo requiere mezclar dos compuestos y agitarlos durante 2 minutos. Posteriormente se aplica el adhesivo de manera uniforme sobre el sensor y con la cantidad adecuada del mismo. Insuficiente adhesivo puede suponer un mal funcionamiento del sensor y demasiado adhesivo reduce la transferencia de deformación/temperatura al sensor. La cantidad correcta de adhesivo se conoce gracias a los ensayos de calibración realizados en laboratorio.
- 3) Adhesión del sensor a la superficie metálica: El sensor ha de ser colocado en el punto deseado de la superficie metálica suavemente y con cuidado. Una vez que el sensor está en contacto con la superficie metálica, se debe aplicar una presión firme y continua en toda la longitud del sensor durante 10 segundos hasta que el sensor queda estable. Después, se presiona la cinta adhesiva que rodea al sensor para terminar de fijarlo durante el curado del adhesivo del sensor en la estructura. El curado de este adhesivo depende de las condiciones ambientales (sobre todo temperatura) pero el proceso entero no dura más de 12 horas. Un curado lento de este adhesivo evita la creación de deformaciones residuales que normalmente repercuten en una deformación del espectro óptico de la FBG del sensor. [Kuang01].

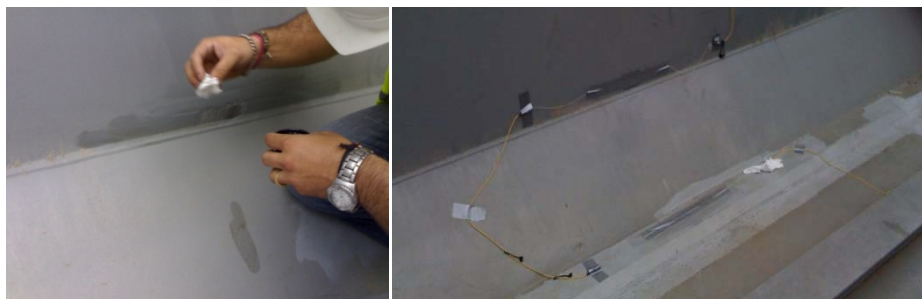


Figura 3.26. Preparación de la superficie e instalación de los sensores sobre la misma.

### 3.5.3. Monitorización del puente durante la maniobra de lanzamiento

La monitorización del lanzamiento del viaducto tuvo lugar durante los días 17, 18 y 19 de noviembre de 2009. La instrumentación fue llevada a cabo al mismo tiempo que se producía el lanzamiento del cajón, ininterrumpidamente durante toda la operación. Esto significa que también se ha monitorizado durante las noches del día 18 y del día 19 de noviembre de 2009. Se ha monitorizado en concreto el lanzamiento correspondiente entre las pilas P1-2 y P1-3, llegando la nariz del cajón a apoyar por completo sobre esta pila. La fase inicial y final de este lanzamiento se muestran simplificada en la Figura 3.27. En este lanzamiento, la luz máxima del voladizo resulta ser de 100,176 metros. La Figura 3.31 muestra una fotografía que se captó en la situación final del lanzamiento.

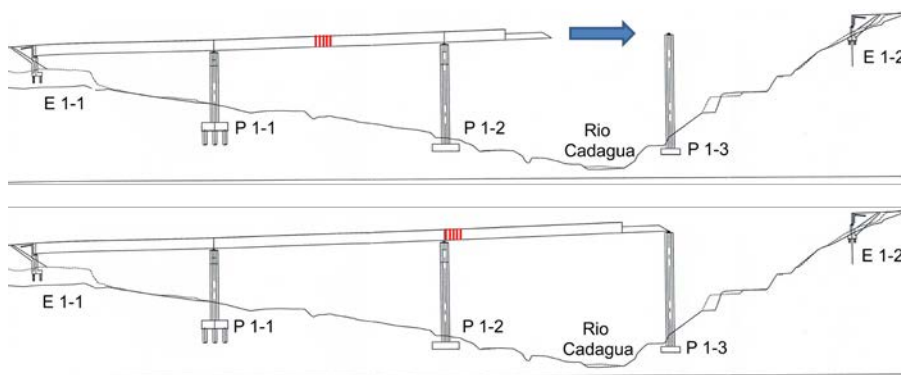
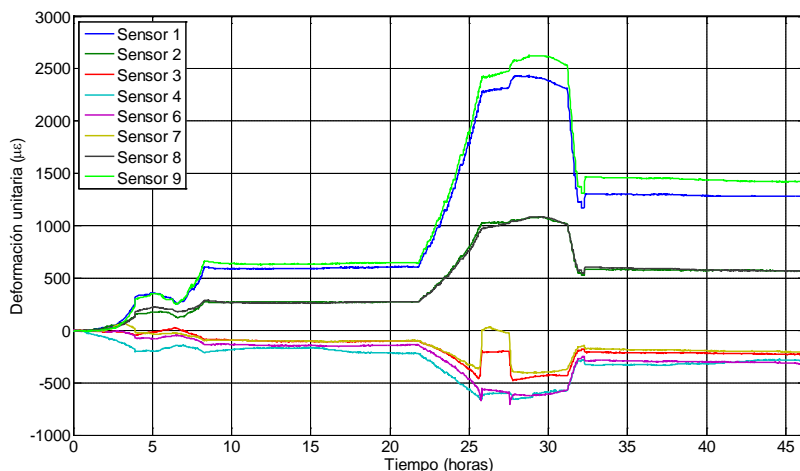


Figura 3.27. Situación inicial y final correspondiente al lanzamiento monitorizado.



**Figura 3.28.** Situación final del lanzamiento monitorizado. La nariz del cajón apoya sobre la pila P1-3. En color rojo se muestran la posición de las 5 secciones instrumentadas.

En las siguientes figuras se muestra la deformación medida por cada uno de los sensores ópticos de la red de instrumentación, en microstrain, frente al tiempo medido en horas. Deformaciones negativas corresponden a deformaciones de compresión, mientras que deformaciones positivas, indican tracciones en el material. Las leyes de deformación que se muestran ya están compensadas. La compensación térmica de cada sensor se ha realizado según la ubicación del sensor térmico con el que compensar en cada momento, según éste se encontrara en un margen del cajón, sometido a sol o a sombra. En este aspecto no han existido grandes problemas, teniendo en cuenta las lluvias y la presencia de nubes durante gran parte de la operación de lanzamiento.



**Figura 3.29.** Curvas de de deformación de los sensores en la sección D61.

No existen datos de los sensores 5, 24 y 32 debido a una instalación defectuosa de los mismos, no siendo posible la captura de datos de estos sensores durante el lanzamiento del puente. Por lo tanto, la tasa de supervivencia en la instalación de sensores ópticos es del 93.3 %.

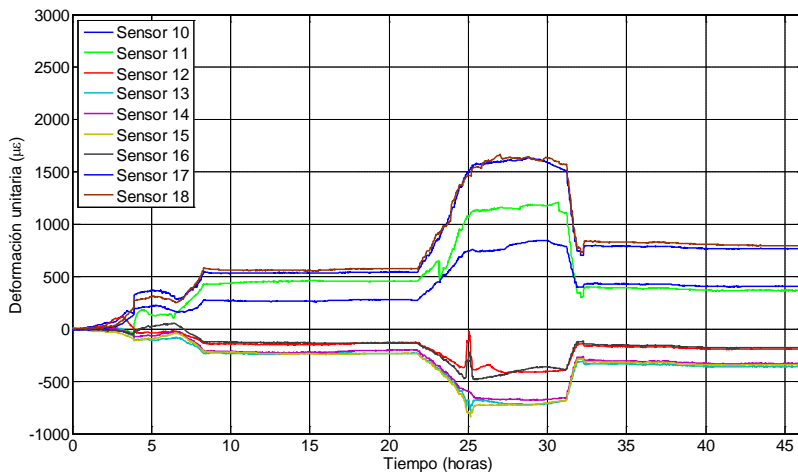


Figura 3.30. Curvas de deformación de los sensores de la sección D62.

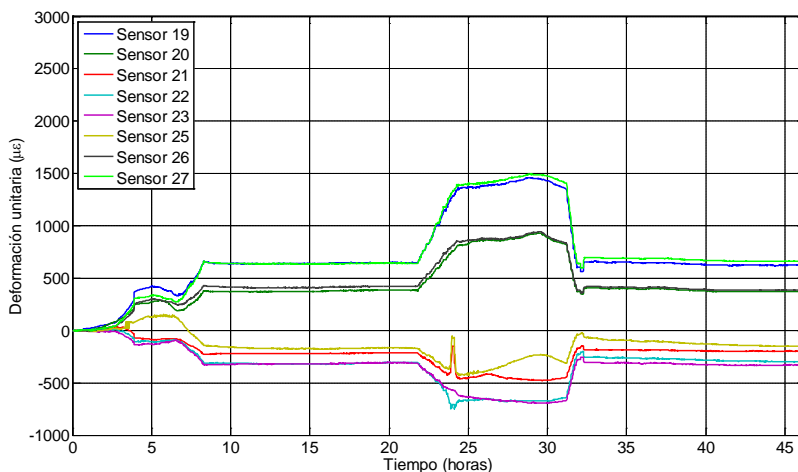


Figura 3.31. Curvas de deformación de los sensores de la sección D63.



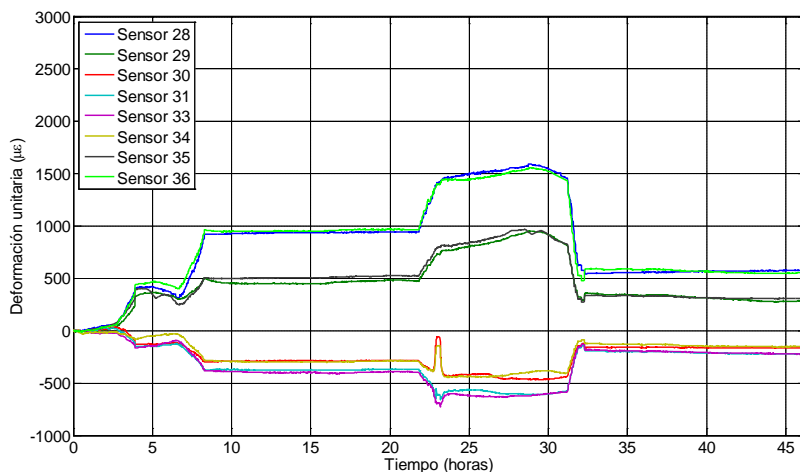


Figura 3.32. Curvas de deformación de los sensores de la sección D64.

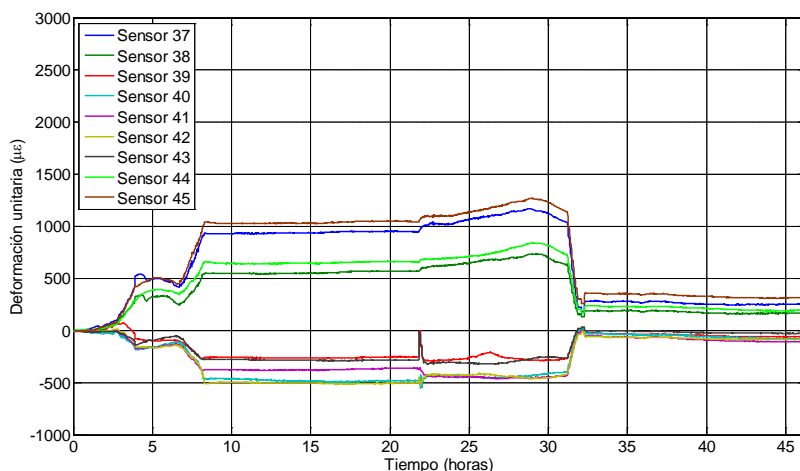
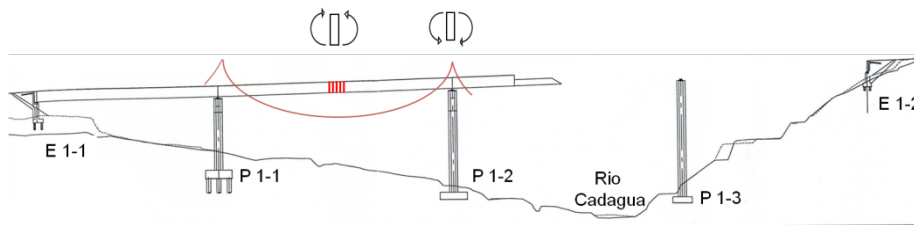


Figura 3.33. Curvas de deformación de los sensores de la sección D65.

### 3.5.4. Interpretación de los resultados

Inicialmente, el cajón se encuentra biapoyado entre las pilas P 1-1 y P 1-2, con la nariz en voladizo, estando las secciones monitorizadas en el centro del vano. En esta situación, las alas superiores del cajón sufren una deformación inicial de compresión mientras que la mitad inferior presenta una deformación inicial de

tracción. Es en este instante cuando se realiza la instalación de los sensores ópticos, por lo que esta situación se toma como “cero” de medida. El valor de estas deformaciones es máximo según la ley de momentos flectores, similar al de una viga de vanos sucesivos, y con un voladizo final, sometida a una carga uniforme (peso propio) tal y como se indica en la Figura 3.34.



**Figura 3.34. Ley de momentos flectores al inicio de la maniobra de lanzamiento.**

El empuje del cajón durante las primeras horas provoca su desplazamiento hasta que va quedando en voladizo, acercándose de este modo las secciones monitorizadas a la pila P 1-2. Puesto que la situación inicial es de deformación máxima, durante estas primeras horas ocurre una inversión de los momentos flectores, provocando que las alas superiores del cajón traccionen mientras que la mitad inferior del cajón se comprime. Esto es exactamente lo que registran los sensores de todas las secciones monitorizadas (Figuras 3.29 - 3.33). En todas las secciones se observa como los sensores instalados en las posiciones superiores del cajón (posiciones 1, 2, 8 y 9) presentan deformaciones positivas (tracciones), mientras que los sensores instalados en las posiciones inferiores del cajón (posiciones 3, 4, 5, 6 y 7) presentan deformaciones negativas (compresiones). Esto es debido a la existencia de una fibra neutra en la estructura. La fibra neutra se define como la superficie curva de un elemento sometido a flexotracción que no sufre deformación, y por lo tanto, separa las regiones de compresión y tracción. Esta fibra neutra pasa por el centro de gravedad de cada sección transversal del puente, siendo esta la causa del diferente comportamiento en deformación de los sensores de la parte superior respecto de los sensores de la parte inferior. Además, los sensores de una misma sección presentan mayor deformación absoluta cuánto más alejados están de la fibra neutra tal y como cabría esperar. De este modo, los sensores de las alas superiores (posiciones 1 y 9) registran una deformación de tracción mayor a los situados en las posiciones 2 y 8 en todas las secciones monitorizadas. De la misma manera, los sensores instalados en la base del cajón metálico (posiciones 4, 5 y 6) se ven sometidos a una deformación de compresión mayor que los situados en las posiciones 3 y 7.

Si comparamos los sensores instalados en la misma posición en diferentes secciones, vemos que los sensores de la sección D61 registran el valor de deformación absoluto (tanto en tracción como en compresión) más elevado y los sensores de la sección D65 presentan los valores más bajos. Por ejemplo, el sensor instalado en el alma superior derecha (sensor 9) de la sección D61 registra un valor máximo de deformación de aproximadamente 2600  $\mu\epsilon$ , mientras que el sensor instalado en la misma posición de la sección D65 (sensor 45) registra un máximo de

1260  $\mu\epsilon$ . Los sensores de las secciones intermedias presentan también esta tendencia, de modo que disminuye la deformación medida desde la sección D65 a la D61. Este comportamiento nos dice que las secciones monitorizadas del cajón metálico se encontraban en realidad más próximas a la pila P 1-2 que de la pila P 1-1 en el instante inicial, habiendo salvado por lo tanto más de la mitad de la distancia entre ambas pilas antes de comenzar la monitorización.

Además, podemos obtener información de la torsión de cada sección, ya que hay instalados sensores en ambos lados de cada sección. De este modo, se puede afirmar por ejemplo que la sección D62 está ladeada hacia el lado izquierdo, ya que los sensores del lado izquierdo (sensores 10, 11, 12 y 13) miden mayor deformación que los sensores instalados en el lado derecho (sensores 15, 16, 17 y 18) tal y como muestra la Figura 3.30. Esta diferencia es especialmente notable entre los sensores 11 y 17. Por el contrario, la sección D65 se encuentra ligeramente torsionada hacia la derecha, ya que los sensores de este lado (sensores 42, 43, 44 y 45) miden mayor deformación que los que se encuentran en el lado izquierdo (sensores 37, 38, 39 y 40) como se puede observar en la Figura 3.33. Por último, comentar que la sección D64 se encontraba totalmente recta ya que los sensores de esta sección instalados a la misma altura, pero en ambos lados miden deformaciones similares durante toda la monitorización, como muestra la Figura 3.32.

Si observamos los datos recogidos por los sensores de todas las secciones, puede comprobarse como durante las 4 primeras horas la estructura responde tal y como se ha comentado anteriormente. Esto es, los sensores de la parte superior de la sección (posiciones 1, 2, 8 y 9) miden deformaciones positivas (tracción) y los de la parte inferior miden deformaciones negativas (compresión). Entre las horas 4 y 7 puede observarse en los datos obtenidos por los sensores de todas las secciones un ligero cambio en la tendencia de las deformaciones medidas, volviendo a recuperar la tendencia a las 7 horas del comienzo de la toma de datos. La explicación a este comportamiento es la existencia de una maniobra de corrección, ya que el puente avanzaba ligeramente desviado y hubo que desplazar hacia atrás el cajón metálico unos pocos metros para después volver a lanzarlo hacia delante.

Cabe señalar que a partir de la hora 9 de iniciada la operación de lanzamiento se produce en todas las secciones un efecto de estabilización de las deformaciones en el cajón (Figura 3.37). Este efecto tiene una duración de aproximadamente 15 horas, y es debido a que la monitorización se llevó a cabo durante la noche del día 18 de noviembre, en el que el cajón no es lanzado y por tanto sus deformaciones permanecen constantes. Del mismo modo, se indica que a partir de la hora 33 ocurre el mismo fenómeno. Éste corresponde con la monitorización durante la noche del día 19 de noviembre de 2009. Cabe destacar en estos periodos de noche la correcta compensación térmica de los sensores de deformación, ya que éstos apenas muestran variación en la medida a pesar de las grandes variaciones de la temperatura ambiente a la que estaban sometidos.

Entre las horas 22 y 26, las secciones monitorizadas llegan a la pila P 1-2, siendo este fenómeno fácil de identificar en los datos recogidos por los sensores.

Puesto que la sección D65 es la más próxima a la nariz, esta será la sección que apoye primero en la pila. Como puede observarse en la Figura 3.33, esto ocurre en la hora 22, evidenciándose un pico de deformación en los sensores ubicados en la parte inferior del cajón. En todas las secciones monitorizadas, los sensores situados en las posiciones 4, 5 y 6 presentan un pico de compresión mientras que los sensores situados en las posiciones 3 y 7 presentan un pico de tracción. Las siguientes secciones van apoyando en la pila P 1-2, siendo la última en hacerlo la sección D61 en torno a las 26 horas. En esta última sección, el pico de de deformación correspondiente al paso por la pila P 1-2 aparece ensanchado en el tiempo debido a una nueva maniobra de corrección de la trayectoria del puente y de una breve pausa en el proceso de lanzamiento.

Después de este instante, las secciones monitorizadas quedan en voladizo. Las deformaciones que se obtienen a partir de este tienden a estabilizarse debido a que en cada sección el momento flector actuante depende del peso de cajón que tiene por delante de él, tal y como indica la Figura 3.35.

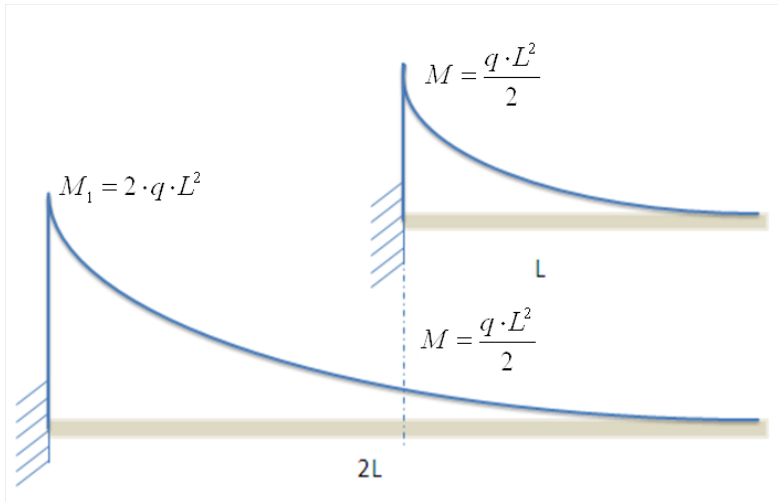


Figura 3.35. Voladizo y momentos flectores en una misma sección.

El momento flector de un voladizo se expresa mediante la ecuación 3.22:

$$M = \frac{q \cdot l^2}{2} \tag{3.22}$$

donde  $q$  es la intensidad de carga y  $l$  es la longitud que hay en voladizo. Según esta expresión, el momento flector de una viga en voladizo de longitud  $L$  en el apoyo es el mismo que el momento flector de una viga en voladizo de longitud  $2L$  en un punto alejado  $L$  del apoyo, es decir, que tenga una longitud  $L$  por delante, tal y como se aprecia en la Figura 3.38, de valor:

$$M = \frac{q \cdot L^2}{2} \quad (3.23)$$

A partir de la hora 31 de iniciada la operación de lanzamiento se produce un cambio brusco y repentino en la tendencia de las leyes que describen las deformaciones de los puntos del cajón (Figura 3.37). Ello se debe a la operación de recuperación de flecha, cuyo objetivo es alzar la punta de la nariz del cajón hasta la cota de apoyo de las pilas (Figura 3.36). Con esta maniobra, el cajón pasa de estar en voladizo, a que la punta de la nariz apoye sobre la pila P 1-3. De este modo, los sensores del extremo superior sufrirán deformaciones de compresión, mientras que los sensores correspondientes a la base del cajón, sufrirán deformaciones de tracción (vano biapoyado).



**Figura 3.36. Maniobra de recuperación de flecha, mediante el empleo de pórticos.**

Por último, es importante señalar que las deformaciones existentes no son absolutas. Se trata de deformaciones relativas. Ello indica que el material que forma la estructura ya posee una deformación preexistente de los lanzamientos anteriores y casos de carga, cuyos valores no se incluyen en estos resultados.

Los valores de deformación obtenidos nos indican que el material que conforma el cajón se encuentra trabajando en su régimen elástico y lineal. Las deformaciones máximas que se han obtenido corresponden con los puntos de las alas superiores de la sección D61, con un valor aproximado de 2600 *microstrain* en tracción.

El valor de deformación correspondiente a la plastificación del acero (en caso de alcanzarse este valor, la estructura se convertiría en un mecanismo y se produciría su colapso) es:

$$\sigma_e = E \cdot \varepsilon_e \rightarrow \varepsilon_e = \frac{\sigma_e}{E} \approx 2500 \mu\varepsilon \quad (3.24)$$

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la estructura presentaba una deformación inicial. En el caso de las alas superiores esta deformación era de compresión, y su valor absoluto se puede cuantificar en más de  $1000 \mu\epsilon$ . Puesto que esta deformación es de signo contrario a la máxima obtenida en el proceso de lanzamiento, la deformación máxima absoluta sería:

$$\epsilon_i \approx -1000 \mu\epsilon \rightarrow \epsilon_m \approx 2600 \mu\epsilon - 1000 \mu\epsilon = 1600 \mu\epsilon \quad (3.25)$$

Siendo un valor muy inferior a la deformación de plastificación del acero.

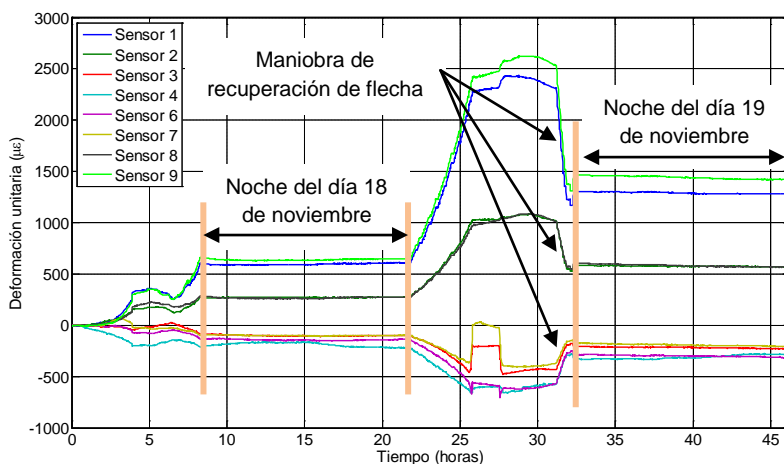


Figura 3.37. Identificación de sucesos ocurridos durante la monitorización de la sección D61.

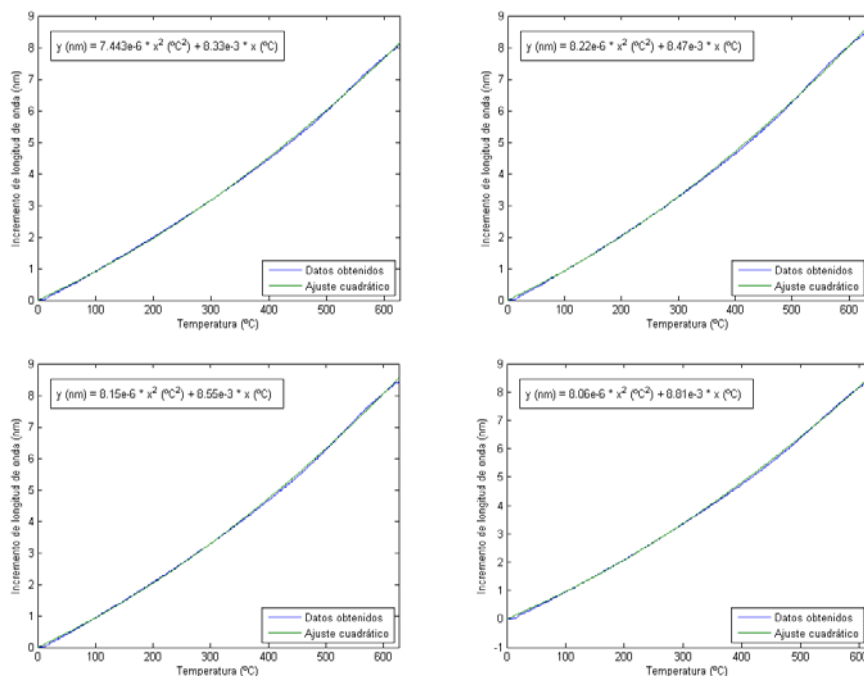
## 3.6. Sensores de alta temperatura

### 3.6.1. Introducción

Hasta ahora se han presentado sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg (FBG), para medir deformación y temperatura. Estos sensores son de inmediata aplicación práctica en estructuras que se encuentren en temperaturas moderadas, pero tienen el inconveniente de una pérdida de prestaciones a temperaturas más elevadas. Se podría establecer como temperatura límite los  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , a partir de la cual una FBG empieza a tener una pérdida considerable de reflectividad, haciéndose más patente este efecto conforme aumenta la temperatura.

Para comprobarlo, se realizó un ensayo que consistió en aplicar una rampa de temperatura a 4 FBGs diferentes y llevarlas hasta  $1000^\circ\text{C}$ . Se registró durante el ensayo tanto la longitud de onda de Bragg como la potencia reflejada a esa longitud de onda. Al realizar un ajuste de las curvas longitud de onda – temperatura, se comprueba que las FBGs tienen un comportamiento cuadrático que se hace más

patente a altas temperaturas. Calculando los coeficientes de la curva de ajuste cuadrático, obtenemos una calibración completa de estos dispositivos en todo su rango de funcionamiento (Tabla 3.4).



**Figura 3.38. Ajuste cuadrático de la relación longitud de onda – temperatura.**

	Coefficiente lineal (pm/°C)	Coefficiente cuadrático (pm/°C <sup>2</sup> )	Temperatura máxima (°C)
FBG 1	8.33	0.00744	646
FBG 2	8.47	0.00822	654
FBG 3	8.55	0.00815	646
FBG 4	8.81	0.00806	636
Media	<b>8.54</b>	<b>0.00797</b>	<b>645.5</b>

**Tabla 3.4 Coeficientes de calibración de las FBG a altas temperaturas.**

Aplicando los coeficientes obtenidos, se consigue la gráfica de la Figura 3.39, en la que se aprecia que las FBGs son capaces de medir la temperatura hasta aproximadamente el minuto 62, cuando la temperatura está alrededor de los 640 °C. Sin embargo, como ya se ha comentado anteriormente, la potencia reflejada por la FBG a la longitud de onda de Bragg decrece debido a una disminución de la reflectividad de la red de difracción. En la Figura 3.40 se puede apreciar la evolución de la potencia relativa, existiendo una caída de 3 dB a los 30 minutos, cuando la temperatura es de 320 °C.

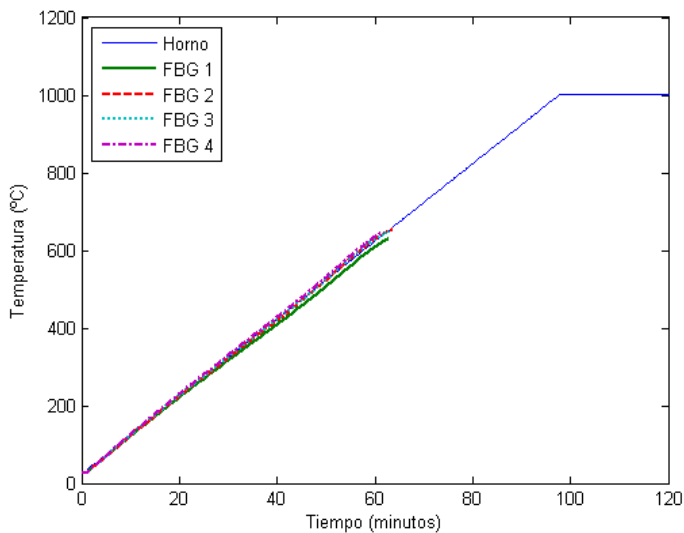


Figura 3.39. Temperatura medida por las FBGs.

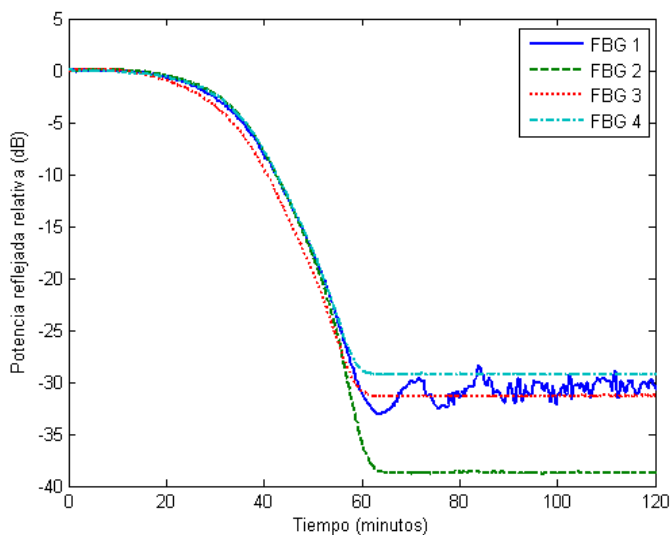


Figura 3.40. Potencia reflejada por las FBGs.

### 3.6.2. Ensayo con fuego real

En este apartado se describe el procedimiento de un ensayo realizado para la aplicación directa de los sensores de alta temperatura en hormigón. Para ello se instalaron este tipo de sensores embebidos en el interior de unas probetas estándar de hormigón que fueron sometidas a la acción del fuego. Por motivos comparativos,



se instalaron también sensores ópticos de temperatura basados en FBGs estándares y termopares eléctricos.

### 3.6.2.1. *Fabricación de los sensores*

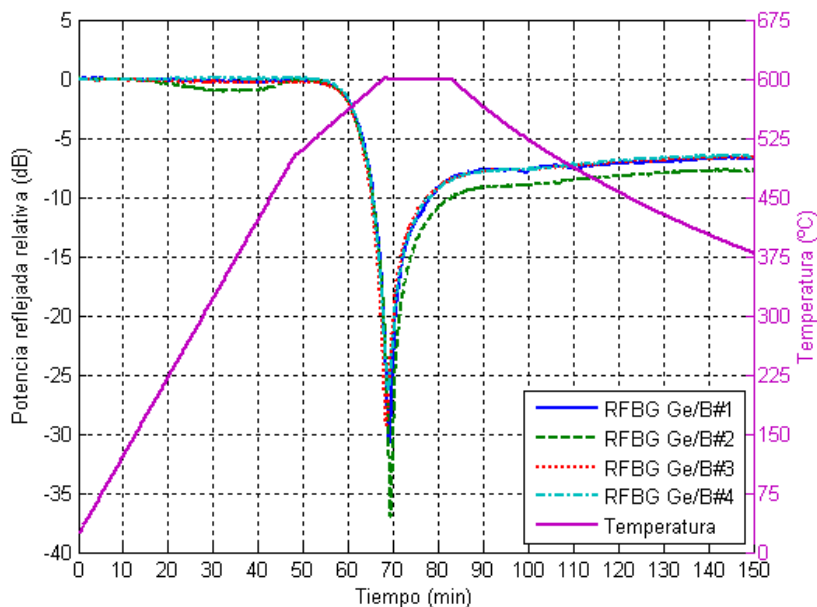
Todos los sensores ópticos usados en este ensayo están basados en FBG. Las redes de difracción fueron creadas mediante el método de máscara de fase utilizando un láser de Argón autodoblado en frecuencia que genera luz ultravioleta a una longitud de onda de 244 nm. Se usaron hasta 4 máscaras de fase diferentes para la creación de las redes de difracción con longitudes de onda de Bragg de 1529.4 nm, 1534.2 nm, 1539 nm y 1543.7 nm. La longitud física de estas FBGs era de 2 cm con un perfil de apodización gaussiano del índice de refracción para disminuir los lóbulos secundarios del espectro en reflexión y para mejorar la respuesta de los sensores.

Se utilizaron dos tipos de fibra óptica en la inscripción de FBGs: fibra óptica dopada con germanio y fibra óptica codopada con germanio y boro. Para la creación de sensores ópticos de alta temperatura se les aplicó a estas fibras una carga de hidrógeno a 25 bares durante los 15 días anteriores al proceso de inscripción de las FBG. En cuanto a los sensores ópticos de temperatura basados en FBG estándar se utilizó tan solo la fibra óptica dopada con germanio sin tratamiento previo.

Para conseguir finalmente los sensores de alta temperatura se aplicó a las FBG inscritas en fibra óptica hidrogenada un proceso de regeneración de la red de difracción. Este proceso consistió en la introducción de las fibras en un horno tubular y en la posterior aplicación de un patrón de temperatura. El patrón de temperatura que se aplicó estaba compuesto de 4 pasos:

Para la regeneración de FBGs inscritas en fibra óptica codopada con germanio y boro:

- Rampa de temperatura de pendiente 10 °C/min hasta llegar a una temperatura de 500 °C.
- Rampa de temperatura de 5 °C/min hasta aumentar la temperatura en 100 °C hasta llegar a los 600 °C, pasando de este modo por la temperatura de regeneración de este tipo de fibra (550 °C).
- Estabilización de temperatura durante 30 minutos a 600 °C.
- Apagado del horno para que disminuya la temperatura progresivamente.



**Figura 3.41. Proceso de regeneración de las FBG inscritas en fibra codopada con germanio y boro.**

Para la regeneración de FBGs inscritas en fibra óptica dopada con germanio:

- Rampa de temperatura de pendiente 10 °C/min hasta llegar a una temperatura de 900 °C.
- Rampa de temperatura de 5 °C/min hasta aumentar la temperatura en 100 °C hasta llegar a los 1000 °C, pasando de este modo por la temperatura de regeneración de este tipo de fibra (950 °C).
- Estabilización de temperatura durante 30 minutos a 1000 °C.
- Apagado del horno para que disminuya la temperatura progresivamente.

Como puede observarse en las Figuras 3.41 y 3.42, las redes de difracción pierden reflectividad tras el proceso de regeneración ya que la potencia reflejada para la longitud de onda de Bragg disminuye. Estas pérdidas de potencia están cuantificadas en la tabla 3.5.

Una vez creadas las FBGs y las RFBGs, es necesario encapsularlas para actuar como sensores de temperatura. Para ello, se utilizó el procedimiento descrito en el apartado 3.4, introduciendo la fibra óptica en el interior de un tubo metálico de modo que quedara suelta en su interior. Posteriormente se sellaron los orificios del tubo con adhesivo resistente a alta temperatura. Como medida excepcional, se le realizó al tubo una curvatura de 90° debido a las características de la instalación que se explicarán en el siguiente apartado.

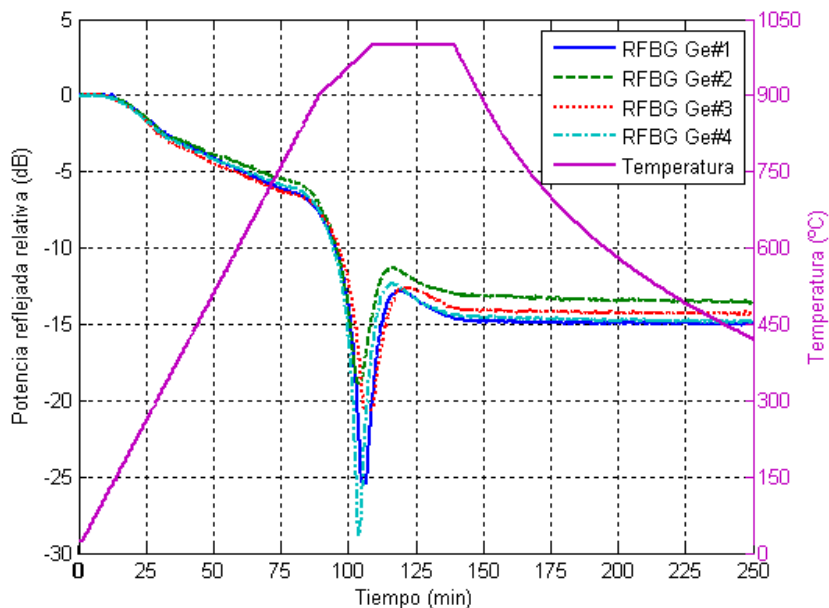


Figura 3.42. Proceso de regeneración de las FBG inscritas en fibra dopada con germanio.

FBGs inscritas en fibra óptica codopada con germanio y boro		FBGs inscritas en fibra óptica dopada con germanio	
<i>Nombre</i>	<i>Pérdidas</i>	<i>Nombre</i>	<i>Pérdidas</i>
RFBG Ge/B#1	6.8 dB	RFBG Ge#1	15 dB
RFBG Ge/B#2	7.8 dB	RFBG Ge#2	13.5 dB
RFBG Ge/B#3	6.6 dB	RFBG Ge#3	14.3 dB
RFBG Ge/B#4	6.5 dB	RFBG Ge#4	14.8 dB

Tabla 3.5 Pérdidas de potencia de pico reflejada por las FBGs regeneradas.

Para facilitar la instalación, se fabricaron 4 grupos de sensores, conteniendo cada uno de ellos:

- 1 sensor óptico de temperatura basado en FBG estándar, inscrito en fibra óptica codopada con germanio y boro.
- 1 sensor óptico de alta temperatura basado en RFBG, inscrito en fibra óptica dopada con germanio.
- 1 sensor óptico de alta temperatura basado en RFBG, inscrito en fibra óptica codopada con germanio y boro.
- 1 sensor eléctrico de temperatura, consistente en un termopar tipo K (capaz de medir hasta 1300 °C).

En la figura 3.43 se muestra el aspecto final de cada uno de estos grupos de sensores, así como la colocación de los mismos en el molde para la fabricación de probetas de hormigón, como se comentará en la sección siguiente.



Figura 3.43. Grupo de sensores fabricado para facilitar la instalación

### 3.6.2.2. Instalación de los sensores

Los grupos de sensores mencionados en el apartado anterior fueron instalados en el interior de 2 probetas cilíndricas de hormigón de 30 cm de alto y 15 cm de diámetro. En concreto, 2 grupos de sensores se instalaron en cada una de las probetas de hormigón en 2 puntos específicos: en el centro de gravedad (a 15 cm de altura y 7.5 cm de la superficie lateral) y en la superficie lateral, a 15 cm de altura. La Figura 3.47 muestra la localización de los sensores en estas dos probetas. Los sensores fueron etiquetados como FBG#1 a FBG# 4 para los sensores basados en FBG estándar, Ge#1 a Ge#4 para los sensores basados en RFBG inscritas en fibra óptica dopada con germanio y Ge/B#1 a Ge/B#4 para los sensores basados en RFBG inscritas en fibra codopada con germanio y boro. En cuanto a los termopares eléctricos, se etiquetaron como TC#1 a TC#4.

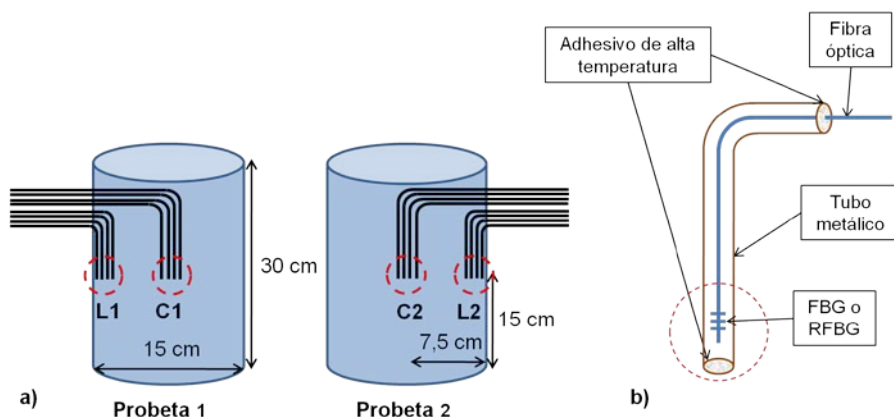


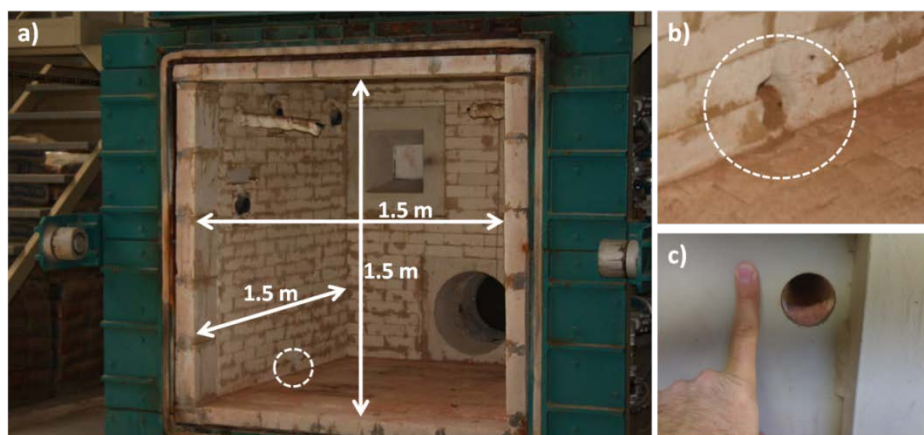
Figura 3.44. a) Localización de los sensores en el interior de las probetas de hormigón. b) Estructura de los sensores ópticos.

Muestra	Localización	Sensores instalados
Probeta 1	L1	Ge#1, Ge/B#1, FBG#1, TC#1
	C1	Ge#2, Ge/B#2, FBG#2, TC#2
Probeta 2	L2	Ge#3, Ge/B#3, FBG#3, TC#3
	C2	Ge#4, Ge/B#4, FBG#4, TC#4

**Tabla 3.6 Sensores instalados y su ubicación en el interior de las probetas de hormigón.**

Los grupos de sensores se fijaron a los moldes cilíndricos para la fabricación de probetas de hormigón, y posteriormente se vertió el hormigón de forma cuidadosa en cada uno de ellos, cubriendo completamente los sensores. Las probetas de hormigón se desmoldaron después de 48 horas, momento en que el hormigón alcanza el 80% de la dureza final. El último paso consistió en el traslado de las probetas a una sala de humedad controlada para el curado final del hormigón durante los siguientes 34 días, consiguiendo el hormigón de esta forma la máxima dureza.

Las dos probetas de hormigón fueron entonces trasladadas a las instalaciones del Instituto AIDICO (Instituto Tecnológico de la Construcción), situado en el Parque Tecnológico de Paterna, Valencia. Una vez allí, las probetas fueron colocadas en un horno industrial con el que se realizó el ensayo (Figura 3.45.a). Este horno tiene unas dimensiones de 1.5 m x 1.5 m x 1.5 m y dispone de 4 quemadores que son capaces de incrementar la temperatura por encima de los 1200 °C. Los quemadores están controlados por 4 termopares eléctricos situados en el interior del horno.



**Figura 3.45. Horno industrial de AIDICO. a) Vista frontal, b) vista interior del orificio de salida para la fibra óptica, c) vista exterior del orificio.**

La colocación de las probetas en el interior del horno se realizó de modo que éstas quedaron apoyadas en el suelo, y situadas en los extremos. El motivo de esta colocación se debió a que la fibra óptica tenía que salir al exterior por unos orificios circulares pasantes de 2 cm de diámetro situados en la base interior del horno (Figuras 3.45.b y 3.45.c). De este modo, se pudo introducir el mismo tubo metálico que hace la función de encapsulado del sensor en el orificio para salir al exterior del horno, donde se realizaron las conexiones a los equipos de medida.

Tras las operaciones de instalación de los sensores y de traslado de las probetas, el sensor etiquetado como Ge/B#1 estaba dañado de modo que no se podían tomar lecturas de él. Por lo tanto, el porcentaje de supervivencia de los sensores ópticos fue del 93.75%.

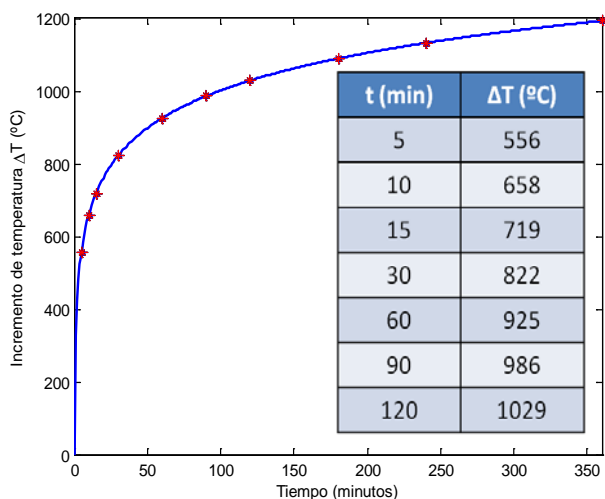
### 3.6.2.3. Resultados

Para el ensayo se programó el horno industrial para que siguiera la temperatura descrita por la norma de estandarización UNE-EN 1363-1, definido por AENOR como “Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales” para la evaluación de la resistencia al fuego de los materiales y elementos de construcción. Según esta norma, el incremento de temperatura durante el tiempo se rige por la ecuación (3.26):

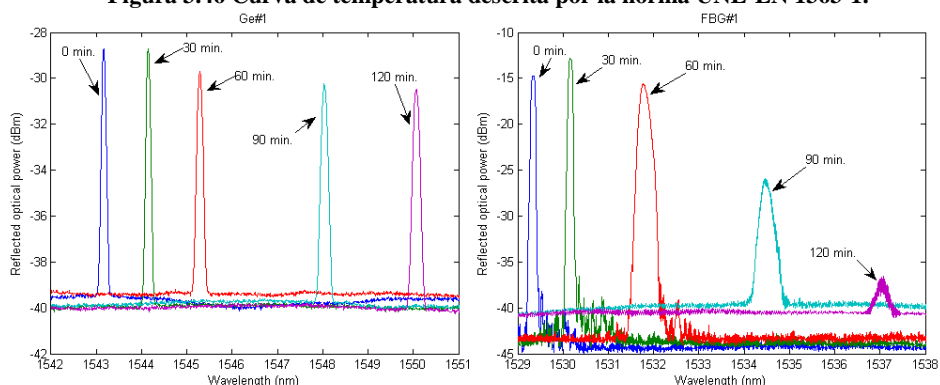
$$\Delta T = 345 \log(8t + 1) \quad (3.26)$$

donde  $\Delta T$  es el incremento de temperatura respecto del instante inicial en  $^{\circ}\text{C}$  y  $t$  es tiempo en minutos. La curva que describe esta ecuación se puede apreciar en la Figura 3.49. Como se puede observar, hay un incremento muy rápido de temperatura con el objetivo de simular el efecto inicial que tiene el fuego sobre el hormigón.

En cuanto a los sensores ópticos, se realizaron capturas del espectro óptico y se hizo un seguimiento continuo de la longitud de onda de Bragg para conocer la variación de temperatura en el interior de las probetas de hormigón. Para convertir los desplazamientos de longitud de onda en temperatura se aplicó una aproximación cuadrática. Para los sensores ópticos inscritos en fibra óptica codopada con germanio y boro se aplicó un coeficiente lineal de  $8.6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$  y un coeficiente cuadrático de  $7.97 \cdot 10^{-3} \text{ pm}/(^{\circ}\text{C}^2)$ . Para los sensores ópticos inscritos en fibra óptica dopada con germanio se aplicó un coeficiente lineal de  $11.79 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$  y un coeficiente cuadrático de  $2.45 \cdot 10^{-3} \text{ pm}/(^{\circ}\text{C}^2)$ . El espectro de los sensores ópticos fue capturado cada minuto para observar los cambios en el espectro que pudieran ocurrir. En la Figura 3.47 se muestra la evolución temporal de los espectros ópticos de 2 sensores ópticos representativos. En este caso se trata de una RFBG (Ge#1) y de una FBG (FBG#1). Se puede comprobar que para el caso del sensor FBG#1 el máximo del espectro disminuye más de 20 dB y además se produce un ensanchamiento considerable del mismo, mientras que el espectro del sensor Ge#1 permanece casi inalterado.



**Figura 3.46** Curva de temperatura descrita por la norma UNE-EN 1363-1.



**Figura 3.47.** Evolución temporal del espectro de los sensores Ge#1 (izquierda) y FBG#1 (derecha) durante el ensayo.

En las Figuras de la 3.48 a la 3.51 pueden verse la evolución de la temperatura registrada por los sensores ópticos y eléctricos (en la izquierda) y la potencia de pico normalizada reflejada por las redes de difracción de los sensores ópticos (en la derecha) durante el ensayo de fuego. Puede verse que en el centro de gravedad de ambas probetas de hormigón (puntos C1 y C2) la temperatura medida por los termopares eléctricos y por los sensores ópticos es muy similar, mientras que el perfil de temperatura es bastante diferente en la superficie lateral (puntos L1 y L2). Esto es debido a la localización de los sensores durante la instalación y al gradiente de temperatura en el interior de la probeta de hormigón. Los termopares eran los sensores más próximos a la superficie lateral en ambas probetas, por lo que eran los sensores más expuestos al fuego. Además, el gradiente de temperatura es mayor en la interfaz aire-hormigón durante el proceso de transferencia de calor [Luccioni03], estando los termopares instalados muy próximos a esta interfaz.

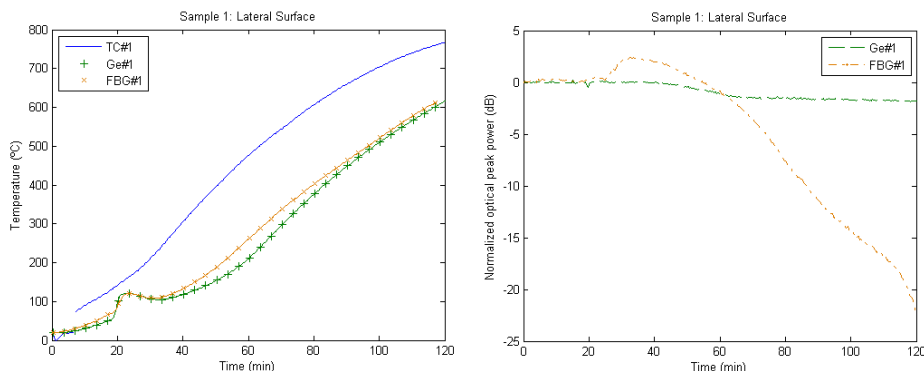


Figura 3.48. Probeta 1, superficie lateral (L1).

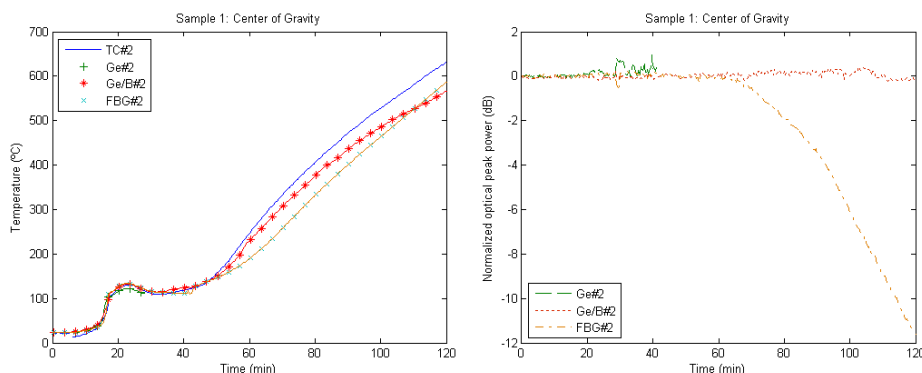


Figura 3.49. Probeta 1, centro de gravedad (C1).

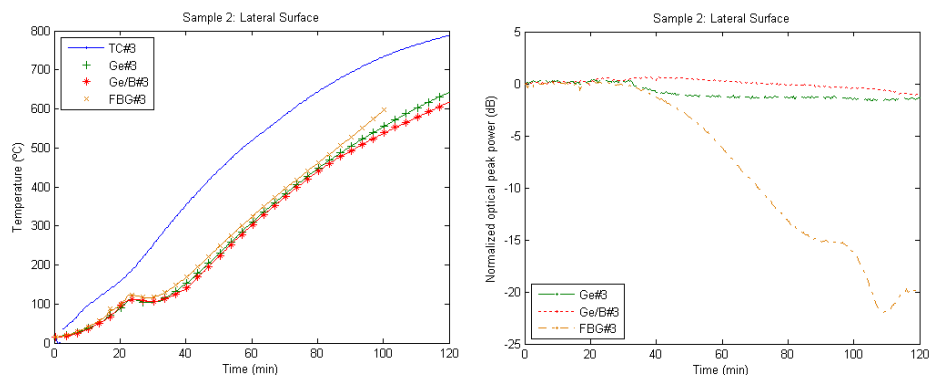
Se puede observar además en las Figuras de la 3.48 a la 3.51 en la izquierda, una rampa de temperatura registrada por los sensores ópticos alrededor de los 20 minutos. Esto es debido a la inercia térmica del hormigón [Ropelewski99], que consiste en un retardo temporal en la transferencia de calor a través del hormigón cuando la temperatura cambia de temperatura ambiente ( $\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a temperaturas superiores a  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  en solo 5 minutos.

Respecto a la probeta 1 en el punto L1 (Figura 3.48), la temperatura máxima registrada por el sensor FBG#1 fue de  $613.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  aunque su reflectividad decreció  $22.46\text{ dB}$  tras 118 minutos, por lo que la longitud de onda de Bragg dejó de estar claramente identificada por el algoritmo de búsqueda de picos usado. En la misma localización, el sensor Ge#1 muestra una temperatura máxima de  $615.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  después de 120 minutos con solo  $1.83\text{ dB}$  de pérdidas. El termopar TC#1 situado en este punto registró una temperatura máxima de  $767\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

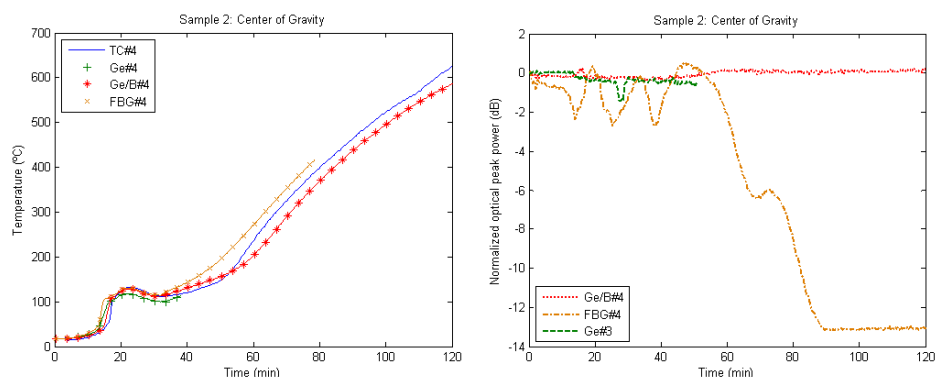
En cuanto a la probeta 1 en el punto C1 (Figura 3.49), se puede observar un comportamiento similar en todos los sensores situados en esta posición. Desafortunadamente, el sensor Ge#2 desaparece después de 42 minutos. Esto es debido a reflexiones de la señal óptica en el empalme de fibra óptica, ya que el nivel de ruido aumenta por encima de la potencia de pico reflejada por la red de



difracción del sensor, lo que conlleva que el espectro quede enmascarado y sea imposible registrar los desplazamientos de la longitud de onda de Bragg. El sensor Ge/B#2 registró una temperatura máxima de 566.5 °C y el sensor FBG#2 registró 587.4 °C. El termopar TC#2 alcanzó una temperatura máxima de 631 °C. Respecto a las pérdidas ópticas, el sensor Ge/B#2 experimentó solo 0.11 dB, mientras que el sensor FBG#2 tuvo 11.55 dB de pérdidas.



**Figura 3.50. Probeta 2, superficie lateral (L2).**



**Figura 3.51. Probeta 2, centro de gravedad (C2).**

En la probeta 2 en el punto L2 (Figura 3.50), las temperaturas máximas medidas por los sensores ópticos fueron: 641.7 °C por el sensor Ge#3, 617 °C por el sensor Ge/B#3 y 598.2 °C por el sensor FBG#3 (aunque este sensor desaparece después de 100 minutos), mientras que el termopar TC#3 midió una temperatura máxima de 788 °C. Las pérdidas ópticas sufridas por los sensores ópticos fueron: 1.4 dB por el sensor Ge#3, 1.01 dB por el sensor Ge/B#3 y 19.86 dB por el sensor FBG#3.

En el punto C2 de la probeta 2 (Figura 3.51), los resultados fueron similares a los obtenidos en el punto C1 de la probeta 1. El sensor Ge#4 desapareció en la primera mitad del ensayo, después de 52 minutos del inicio del mismo. Esto de nuevo es debido a los problemas originados en el empalme de fibra. Las temperaturas máximas registradas por el resto de los sensores ópticos fueron: 586.3

°C por el sensor Ge/B#4 y 417.9 °C por el sensor FBG#4 (aunque este sensor desaparece en el minuto 79 debido al borrado de la red de difracción por el efecto de la temperatura). El termopar TC#4 registró una temperatura máxima de 625 °C. Las pérdidas ópticas sufridas por los sensores ópticos fueron: 0.1 dB por el sensor Ge/B#4 y 13.03 por el sensor FBG#4.

Todos los resultados obtenidos de este ensayo están recogidos en las Tablas 3.7 y 3.8. En la Tabla 3.7 se recogen las temperaturas máximas registradas por los sensores ópticos y eléctricos, y en la Tabla 3.8 se presentan las pérdidas ópticas de la potencia de pico reflejada por las redes de difracción, normalizadas respecto del instante inicial.

	Probeta 1		Probeta 2	
	L1	C1	L2	C2
<b>RFBG Ge</b>	615.3°C	Desaparición de espectro	641.7°C	Desaparición de espectro
<b>RFBG Ge/B</b>	No disponible	566.5°C	617°C	586.3°C
<b>FBG</b>	613.9°C	587.4°C	Borrado en el minuto 100	Borrado en el minuto 80
<b>TC</b>	767°C	631°C	788°C	625°C

Tabla 3.7. Temperaturas máximas medidas por los sensores ópticos y eléctricos.

	Probeta 1		Probeta 2	
	L1	C1	L2	C2
<b>RFBG Ge</b>	1.83 dB	Desaparición de espectro	1.4 dB	Desaparición de espectro
<b>RFBG Ge/B</b>	No disponible	0.11 dB	1.01 dB	0.1 dB
<b>FBG</b>	22.46 dB	Más de 11.55 dB	Más de 19.86 dB	Más de 13.03 dB

Tabla 3.8. Pérdidas de potencia óptica de los sensores ópticos tras el ensayo.

### 3.6.2.4. Conclusiones

Los sensores ópticos han mostrado una gran coincidencia en la medida de temperatura con los sensores eléctricos en el centro de gravedad de ambas probetas de hormigón. En las superficies laterales hay algunas diferencias en la temperatura medida entre los sensores de ese punto. Esto es debido a la posición de los sensores

durante la instalación y al gradiente de temperatura dentro de las probetas de hormigón. En concreto, los termopares se instalaron muy próximos a la interfaz aire-hormigón, donde el gradiente de temperatura es mayor. Los sensores ópticos registraron temperaturas por encima de los 600 °C dentro de las probetas de hormigón, mientras la temperatura en el horno industrial estaba alrededor de los 1030 °C tras 120 minutos de ensayo.

Las FBG estándar se borraron durante el ensayo debido a las altas temperaturas a las que estaban sometidas, resultando en una disminución de la potencia de pico reflejada por la red de difracción por debajo del nivel de ruido. Sin embargo, los sensores basados en FBG estándar pueden ser usados en ensayos de alta temperatura si la duración del mismo es lo suficientemente corta.

Los sensores basados en FBG regeneradas inscritas en fibra óptica dopada con germanio y en fibra óptica codopada con germanio y boro han mostrado pérdidas ópticas mucho menores. Sin embargo, el proceso de fabricación de las RFBG es más complicado. Este tipo de sensor es de gran utilidad para aplicaciones de alta temperatura, tales como detección de incendios en el interior de un túnel, ya que pueden soportar temperaturas superiores a 1000 °C durante un periodo prolongado de tiempo [Bandyopadhyay08].

### 3.7. Referencias

[Bandyopadhyay08]: S. Bandyopadhyay, J. Canning, et al., "Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm", *Optics Letters* 33, pp. 1917-1919 (2008).

[Bertholds88]: A. Bertholds, R. Dändliker, "Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibers", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 6, No. 1, pp. 17-20 (1988).

[El-Diasty00]: F. El-Diasty, "Multiple-beam interferometric determination of Poisson's ratio and strain distribution profiles along the cross section of bent single-mode optical fibers", *Applied Optics*, Vol. 39, No. 19, pp. 3197-3201 (2000).

[García08]: Raimundo García Olcina, "Sistema de fabricación de altas prestaciones de redes de difracción de Bragg en fibra y aplicaciones al campo de los sensores ópticos y a los sistemas de comunicaciones ópticas", Tesis doctoral, ETSIT, UPV, Valencia (2008).

[Garg99]: V. K. Garg, J. E. Wilkes, "Principles & applications of GSM", Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies (1999).

[Göhler00]: Bernhard Göhler, Brian Pearson, "Incrementally launched bridges: design and construction", *Structural Engineering Practice*, Ed. Ernst & Sohn (2000).

[Hill78]: K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication", *Applied Physics Letters*, 32 (10), pp. 647-649 (1978).

[Kuang01]: K. S. C. Kuang, R. Kenny, M. P. Whelan, W. J. Cantwell, P. R. Chalker, “Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials”, *Composites Science and Technology* 61, pp. 1379-1387 (2001).

[LAB]: <http://www.ni.com/labview/esa/>

[Li06]: D. Li, H. Li, L. Ren, G. Song, “Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors”, *Optical Engineering* 45(2), 024402 (2006).

[Lorenzo94]: E. Lorenzo, G. Araujo, A. Cuevas, M. Egido, J. Miñano, R. Zilles, “Solar Electricity. Engineering of photovoltaic systems”, Ed. Progensa (1994).

[Luccioni03]: B. M. Luccioni, M. I. Figueroa, R. F. Danesi, “Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures”, *Engineering Structures* 25, pp. 729-742 (2003).

[Moyo05]: P. Moyo, J. M. W. Brownjohn, R. Suresh, S. C. Tjin, “Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure”, *Engineering Structures* 27, pp. 1828-1834 (2005).

[Ropelewski99]: L. Ropelewski, R. D. Neufeld “Thermal inertia properties of autoclaved aerated concrete”, *Journal of Energy Engineering*, August 1999, pp. 59-75 (1999).

[Smil91]: V. Smil, “General energetics. Energy in the biosphere and civilization”, Ed. John Willey & Sons, New York (1991).

[Torres11]: B. Torres, I. Payá-Zaforteza, P. A. Calderón, J. M. Adam, “Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for Structural Health Monitoring”, *Engineering Structures* 33, pp. 539-548 (2011).

# Capítulo 4

## Sensores de pH basados en fibra óptica

### 4.1. Introducción

En este capítulo se van a presentar dos tecnologías diferentes para sensado de pH basadas en fibra óptica. En concreto, se presentará un sensor de pH en fibra óptica que hace uso de la medida de intensidad de la señal óptica y otro que está basado en las variaciones de las resonancias en una cavidad Fabry-Pérot.

Así pues, el apartado 4.2 tratará sobre el sensado de pH con fibra óptica mediante la utilización de un material denominado hidrogel, siendo éste un polímero capaz de modificar sus propiedades físicas ante estímulos externos, que sirven de base a las dos topologías presentadas en los siguientes apartados. Se estudiarán 3 tipos de hidrogeles diferentes, seleccionando uno de ellos para

utilizarlo en los sensores de fibra óptica con los que posteriormente se realizarán los ensayos.

En el apartado 4.3 se presenta una topología basada en la medida de la intensidad óptica que varía debido a la existencia de unas pérdidas por curvatura de una fibra óptica. Se expone el diseño del sensor, explicando su funcionamiento y la elección de materiales para su fabricación. Se calibrará el funcionamiento del sensor y posteriormente se ensayará en unas probetas de hormigón para monitorizar la evolución del pH durante las 24 primeras horas de fraguado del mismo.

En el apartado 4.4 se presenta una topología basada en una estructura denominada cavidad Fabry-Pérot a la que se le ha añadido un taper en fibra para modificar las características espectrales de dicha cavidad. Se presentarán las ecuaciones que describen el funcionamiento del sensor y se explicará el proceso de fabricación de un taper en fibra. Por último se ensayará este tipo de sensor en la medida de pH en disoluciones de diferente pH.

Finalmente, en el apartado 4.5 se recopilan las conclusiones que se extraen de los resultados presentados en los apartados anteriores.

## 4.2. Sensor de pH en fibra mediante hidrogels

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una disolución. Indica la actividad del ión de hidrógeno ( $a_{H^+}$ ) presente en determinadas sustancias. De hecho, la sigla “pH” significa “potencial de hidrógeno”. Puesto que los valores de actividad del ión de hidrógeno son muy pequeños, se suele utilizar el logaritmo negativo de este valor, tal y como está expresado en la ecuación (4.1). De este modo, disoluciones con un alto valor de actividad del ión de hidrógeno tendrán un valor de pH bajo, y viceversa.

$$pH = -\log_{10}[a_{H^+}] \quad (4.1)$$

La medida del pH es muy importante para aplicaciones como monitorización de aguas residuales, análisis de sangre, biorremediación, procesos químicos y alimenticios, etc. La aplicación de la medida del pH que más interesa en construcción se está relacionada con el fenómeno de corrosión en las estructuras de hormigón armado, es decir, hormigón reforzado con barras o mallas de acero. El mecanismo de corrosión en estas estructuras consiste en una reacción electroquímica iniciada por la filtración de humedad que acaba dañando la integridad de la estructura. Algunos parámetros que indican el estado del proceso de corrosión además del pH son la calidad del agua, concentraciones químicas, temperatura y presencia de materia suspendida como sales disueltas [Brossia95]. En cuanto a la dependencia de la corrosión con el pH, se ha demostrado que existen tres zonas claramente diferenciadas [Garcés05]: en la zona básica ( $pH > 9$ ), la tasa de corrosión aumenta a medida que disminuye el pH, en la zona neutra ( $pH$  entre 5

y 9), la tasa de corrosión permanece prácticamente constante, y en la zona ácida ( $\text{pH} < 5$ ) vuelve a aumentar la tasa de corrosión con la disminución de pH. Teniendo en cuenta la naturaleza alcalina del hormigón armado ( $\text{pH} \approx 12.6$  [Pagey82]), una situación de corrosión hará disminuir inicialmente el pH hasta un valor de  $\text{pH} = 9$ , valor para el cual el fenómeno de corrosión es ya muy severo. Debido a este comportamiento, se han elegido como valores extremos para el funcionamiento de los sensores de pH los valores de  $\text{pH} = 9$  y  $\text{pH} = 13$ , ya que este rango pertenece a la zona básica del hormigón en el que la corrosión empieza a actuar, siendo el valor de  $\text{pH} = 9$  una situación de corrosión extrema irreversible. Se han desarrollado dos tipos de sensores basados en fibra óptica para la medida de pH que se presentarán posteriormente en los siguientes apartados. El primer tipo de sensor se presenta en el apartado 4.2.2 y se basa en la medida de la intensidad de la señal óptica. El segundo tipo se presenta en el apartado 4.2.3, estando basado en interferometría óptica por medio de una cavidad Fabry-Pérot. Ambas tipologías de sensor hacen uso de un tipo de polímero capaz de aumentar su volumen con el cambio de pH, denominado hidrogel.

Los hidrogeles son polímeros capaces de modificar su volumen y peso ante estímulos externos. Estos polímeros sensibles a estímulos son materiales plásticos hechos de cadenas moleculares en forma de retícula tridimensional. Se sintetizan mediante una reacción entrecruzada de las moléculas del polímero. Las moléculas del polímero consisten en pequeñas unidades denominadas monómeros, que pueden ser dispuestas en una secuencia para formar una cadena polimérica más larga. Generalmente, todos los polímeros son solvofílicos, es decir, que tienen afinidad a ciertos solventes. Debido a las interconexiones entre cadenas poliméricas entrecruzadas, estos polímeros son insolubles en agua, pero se hinchan mediante la absorción de un solvente. Si son capaces de hincharse en agua, se denominan hidrogeles. Por lo tanto, los cambios físicos de un hidrogel están provocados por la absorción o liberación de soluciones acuosas. Los primeros trabajos con hidrogeles se remontan a la década de 1950, cuándo sus descubridores W. Kuhn y A. Katchalsky [Katchalsky49, Kuhn50] expusieron el gran potencial de estos materiales. Años más tarde, el trabajo de T. Tanaka y sus compañeros reactivó la investigación sobre las características de los hidrogeles [Tanaka78, Suzuki90, Irie93], dando como resultado el desarrollo de multitud de estos materiales sensibles.

A continuación se presentan tres tipos de hidrogeles diferentes, de los que se han estudiado sus propiedades de hinchado respecto al pH para seleccionar el más apropiado para ser incorporado a los sensores de pH en fibra óptica que se presentarán en los apartados 4.3 y 4.4. Estos hidrogeles son el poli(N-isopropilacrilamida), el quitosano-g-poliacrilamida, y el quitosano-g-poli(ácido acrílico-co-acrilamida).

### 4.2.1. Poli(N-isopropilacrilamida)

El primero de los hidrogeles utilizados es el poli(N-isopropilacrilamida), conocido con las siglas PNIPAAm [Kaneko05]. Se trata de un polímero termorresponsivo capaz de aumentar su tamaño hasta unas 30 veces su tamaño original. Es ampliamente utilizado en aplicaciones como ingeniería del tejido y administración controlada de fármacos. La preparación del hidrogel se suele llevar a cabo usando el monómero N-isopropilacrilamida (NIPAAm) utilizando como iniciador persulfato de amonio (APS). Como entrecruzador se usa el N,N'-metilenobis(acrilamida) (MBA). Además, se puede añadir un acelerante de polimerización el N,N,N',N'-tetrametiletilenodiamina (TEMED).

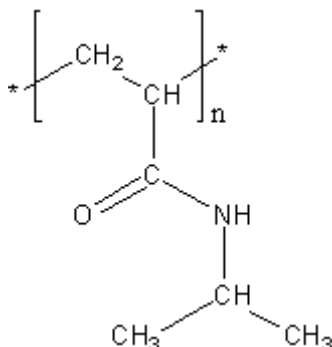


Figura 4.1. Estructura química del PNIPAAm.

Con este hidrogel se realizaron varios ensayos para calibrar el porcentaje de hinchado (% SW, *Swelling percentage*). Este porcentaje expresa la relación entre el peso del hidrogel en estado seco y el peso del hidrogel en estado hinchado sin que admita más absorción de agua mediante la ecuación (4.2).

$$\%SW = \left( \frac{W_w - W_d}{W_d} \right) \cdot 100 \quad (4.2)$$

Donde  $W_w$  corresponde al peso del hidrogel hinchado y  $W_d$  al peso del hidrogel seco. El procedimiento de medida consistió en sumergir muestras de hidrogel en disoluciones de distinto pH durante 24 horas y pesándolos posteriormente una vez que a los hidrogeles se les elimina la disolución sobrante. Como resultado, se obtuvo la cinética de hinchamiento que se muestra en la Figura 4.2. Se puede observar como el hidrogel se hincha más a medida que disminuimos el pH entre un rango de pH 9 a pH 13. En la figura 4.3 se muestra el estado final del hidrogel pNIPAAm ensayado cuando se hincha en una disolución de pH 13 (izquierda) y en una disolución de pH 9 (derecha).



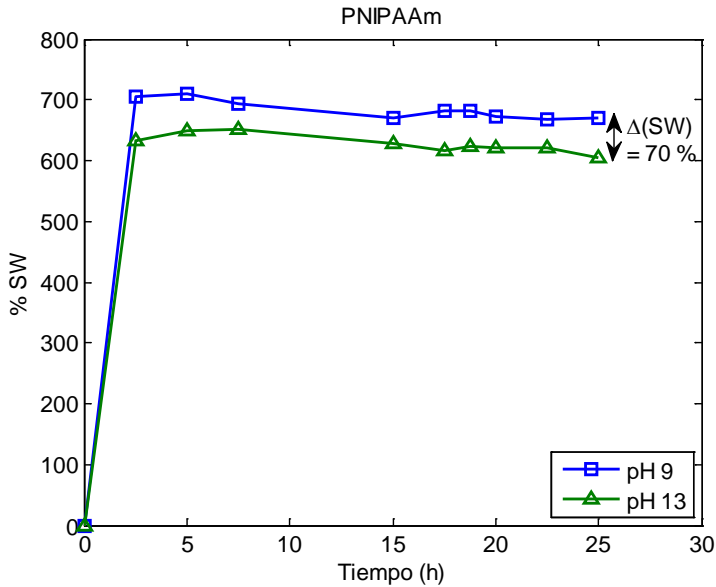


Figura 4.2. Hinchado del hidrogel PNIPAAm a diferentes valores de pH.

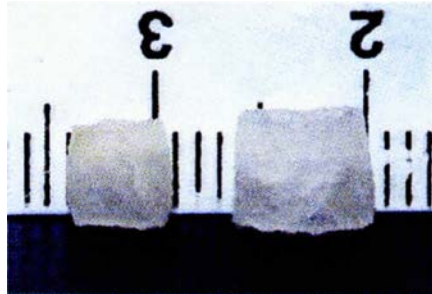


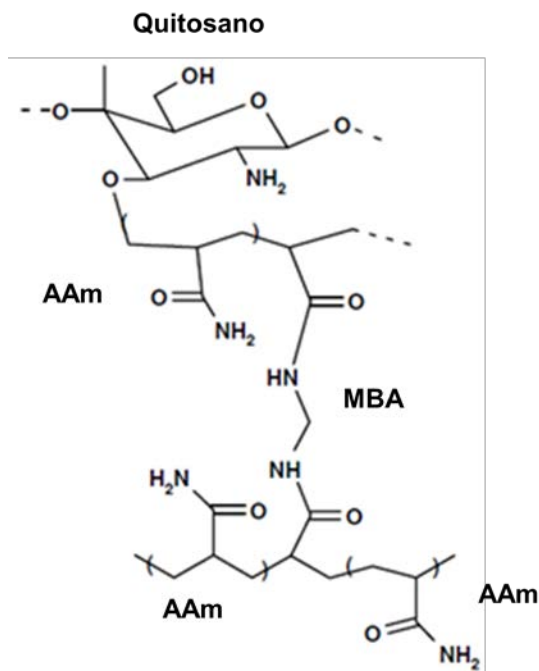
Figura 4.3. Hidrogel PNIPAAm hinchado a pH 13 (izquierda) y a pH 9 (derecha).

#### 4.2.2. Quitosano-g-poliacrilamida

El segundo de los hidrogeles utilizados es el denominado quitosano-g-poliacrilamida [Pourjavadi06], conocido con las siglas Ch-g-pAAm. Este hidrogel consiste en la copolimerización en injerto de monómeros de vinilo en un polisacárido, en este caso, el quitosano. El monómero utilizado en la reacción es la acrilamida (AAm). El quitosano, de fórmula química  $[C_6H_{11}NO_4]_n$  se produce comercialmente mediante la desacetilación de la quitina, que es un elemento estructural en el exoesqueleto de los crustáceos (cangrejos, gambas, langostas, etc.). Posee una ligera carga positiva y es soluble en medios ácidos o en soluciones neutras con dependencia de la carga del pH, siendo además biocompatible y

biodegradable. Las cualidades de purificación de los quitosanos están disponibles en multitud de aplicaciones biomédicas.

El hidrogel superabsorbente Ch-g-PAAm se preparó mediante copolimerización de injerto de acrilamida (AAm) en quitosano en presencia de bisacrilamida de metileno (MBA) como agente de entrecruzado. Se utilizó persulfato de amonio (APS) como iniciador para eliminar el hidrógeno de los grupos  $-OH$  de la estructura principal del quitosano. Este proceso crea centros activos capaces de inicializar la polimerización de AAm y formar un copolímero de tipo injerto.



**Figura 4.4.** Estructura química del Ch-g-PAAm. Copolimerización en injerto de acrilamida en quitosano en presencia de MBA.

Para calibrar este hidrogel, también se realizaron varios ensayos de hinchado. Este procedimiento consistió en sumergir muestras de hidrogel en disoluciones de distinto pH durante 24 horas y pesándolos posteriormente una vez que a los hidrogeles se le elimina la disolución sobrante. Como resultado, se obtuvo la cinética de hinchamiento que se muestra en la Figura 4.5. Se puede observar como el hidrogel se hincha más a pH 9 que a pH 13. En la Figura 4.6 (izquierda) se muestra una imagen del hidrogel Ch-g-pAAm hinchado tras sumergirlo en una disolución de pH 13 comparado con el hidrogel en estado seco. Por otro lado, en la Figura 4.6 (derecha) se muestra la comparativa del hidrogel Ch-g-pAAm seco con el mismo hidrogel hinchado tras sumergirlo en una disolución de pH 9. En este caso, el hinchamiento del hidrogel a pH 9 es tan grande que oculta en dicha figura al hidrogel seco.

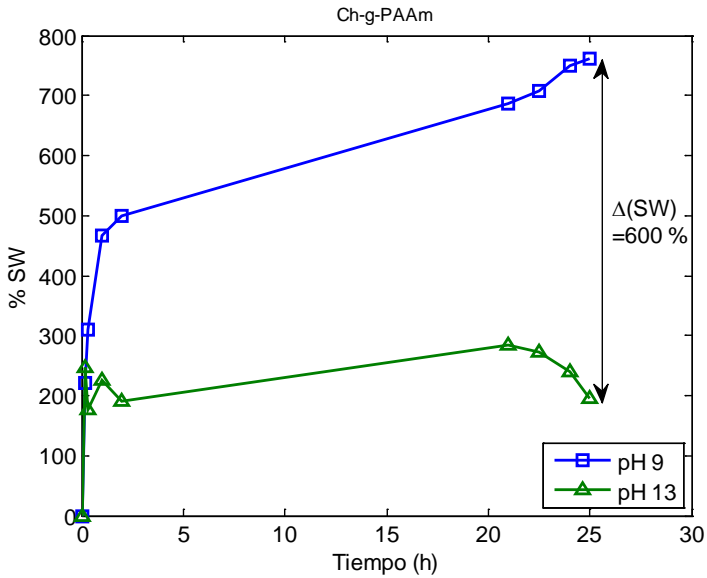


Figura 4.5. Hinchado del hidrogel Ch-g-pAAm a diferentes valores de pH.

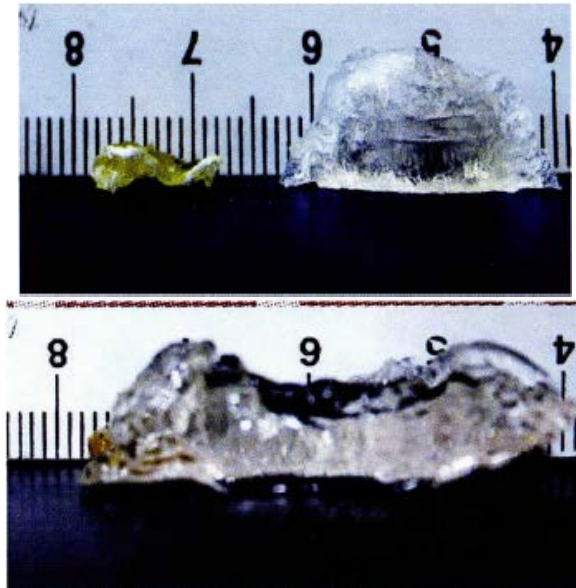


Figura 4.6. Hidrogel Ch-g-pAAm a pH 13 (izquierda) e hinchado a pH 9 (derecha) comparado con el mismo hidrogel en estado seco.

### 4.2.3. Quitosano-g-poli(ácido acrílico-co-acrilamida)

El tercero de los hidrogeles utilizados es el quitosano-g-poli(ácido acrílico-co-acrilamida) [Mahdavinia04], conocido por las siglas Ch-g-p(AA-co-AAm). De nuevo, este hidrogel utiliza el quitosano como base, al igual que en el segundo de los hidrogeles presentados. Se aprovecha de este modo la posibilidad de modificar el comportamiento de hinchado del quitosano al polimerizar mediante injerto monómeros de vinilo, en este caso, acrilamida (AAm) y ácido acrílico (AA).

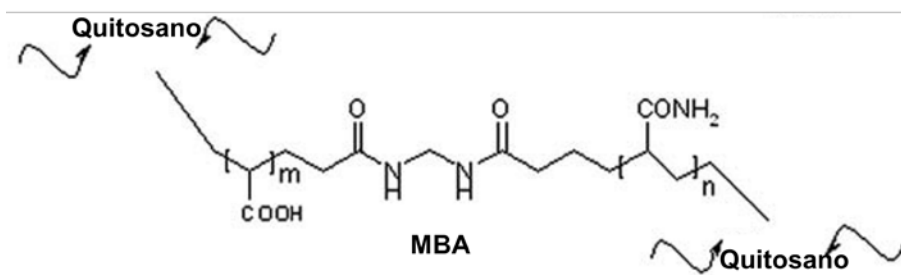


Figura 4.7. Mecanismo para copolimerización de injerto de acrilamida (AAm) y ácido acrílico (AA) sobre quitosano en presencia de bisacrilamida de metileno (MBA) como entrecruzador.

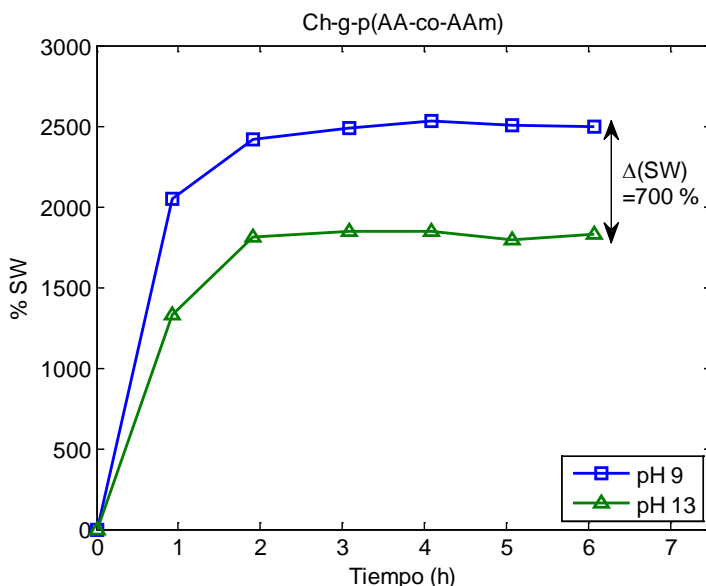


Figura 4.8. Hinchado del hidrogel Ch-g-p(AA-co-AAm) a diferentes valores de pH.

Para calibrar este hidrogel, también se realizaron varios ensayos de hinchado. Este procedimiento consistió en sumergir muestras de hidrogel en disoluciones de distinto pH durante 24 horas y pesándolos posteriormente una vez que a los hidrogeles se le elimina la disolución sobrante. Como resultado, se obtuvo la cinética de hinchamiento que se muestra en la Figura 4.8. Se puede observar como el hidrogel se hincha más a pH 9 que a pH 13 al igual que los anteriores hidrogeles, aunque este hidrogel se hincha en mucho menos tiempo, ya que en apenas 2-3 horas alcanza un hinchamiento estable que mantiene durante las horas posteriores.

Puesto que este último hidrogel presenta un mayor hinchamiento tanto a pH 9 (hinchamiento del 2500 %) como a pH 13 (hinchamiento del 1800 %), y sobre todo porque la diferencia entre los valores de pH extremos es la mayor ( $\Delta SW = 700 \%$ ) se eligió finalmente este hidrogel para incorporarlo al sensor de pH.

### 4.3. Sensor de intensidad

El primer tipo de sensor de pH desarrollado utiliza como material base la fibra óptica y su funcionamiento se basa en la medición de las variaciones de intensidad de la señal óptica captada, de manera que la variación de esta potencia óptica está relacionada con el valor de pH que se quiere medir. Por medio de un mecanismo transductor, la variación de pH provoca una curvatura en la fibra óptica que va acompañada de una disminución de la potencia que atraviesa dicha fibra óptica. De este modo, se ideó el dispositivo mostrado en la Figura 4.9.

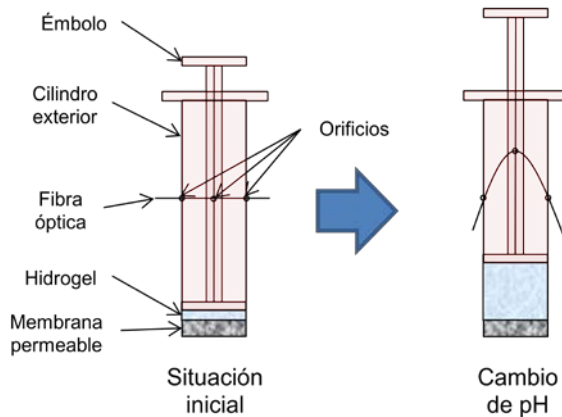


Figura 4.9. Estructura del sensor de pH basado en intensidad óptica.

Este dispositivo consiste básicamente en un cilindro hueco exterior y un émbolo en el interior del mismo que puede desplazarse hacia arriba y abajo. En el cilindro exterior y en el émbolo se practican unos orificios por los que se hace pasar la fibra óptica de modo que ésta queda en línea recta. Así, una elevación del émbolo

provocará una curvatura en la fibra óptica que repercutirá en unas pérdidas de potencia óptica. Para conseguir el desplazamiento vertical del émbolo se utiliza una pastilla de hidrogel como los presentados en el apartado 4.2, ya que una variación del pH hace variar el volumen del mismo. Para conseguir que el hidrogel pueda medir el pH de una disolución manteniendo su integración con el dispositivo hay que colocar una membrana inferior que sea permeable para dejar pasar la disolución de la que se quiere medir el nivel de pH.

### 4.3.1. Materiales

Debido a la fisonomía del dispositivo ideado, se optó por utilizar como base una jeringuilla médica, ya que ésta dispone de un cilindro con un émbolo en su interior. No obstante, hay que adaptar la parte inferior para alojar una pastilla de hidrogel y colocar una membrana inferior permeable.

Para la membrana inferior del dispositivo se barajaron en un principio varios materiales hasta que se encontró el material más adecuado. Los materiales ensayados fueron los siguientes:

- Tejido de microfibras: La microfibras es un producto textil fabricado a base de fibras ultrafinas, 2 veces más finas que la seda, 3 veces más finas que el algodón y 100 veces más finas que el cabello humano (en torno a 10 micras de diámetro). Generalmente están compuestas de poliéster 80 % y poliamida 20 %.
  - Ventajas: Es un material fácilmente mecanizable y deja pasar las disoluciones acuosas fácilmente y de manera casi inmediata.
  - Desventaja: Al absorber la disolución, se hincha, por lo que puede falsear la medida del sensor, ya que éste se basa en el hinchamiento del hidrogel. Además, este material no se hincha siempre igual.
  
- Filtro metálico: Se trata de un filtro en rejilla de un material metálico, como aluminio o acero. Se usa por lo general para filtrar los elementos sólidos de una disolución. Las dimensiones de los agujeros de la rejilla determinan el tamaño mínimo del sólido que se va a filtrar.
  - Ventajas: Son de un grosor muy pequeño y deja pasar las disoluciones acuosas de manera instantánea.
  - Desventajas: Es difícil de mecanizar a la hora de cortarlo. Además, el hidrogel en estado de gel se filtra por los agujeros y se cuele hasta la mezclarse con la disolución acuosa.
  
- Esponja sintética: La esponja es un material poroso que puede estar fabricada en fibras celulósicas o en polímeros plásticos (generalmente el poliuretano). Son especialmente buenas para absorber agua o productos líquidos.
  - Ventajas: Dejan pasar las disoluciones acuosas y actúan de barrera para el hidrogel. Son fáciles de encontrar y baratas.

- Desventajas: A pesar de ser un material hidrófilo, la absorción de disolución acuosa se produce de manera irregular, debido principalmente a la distribución irregular de los poros.
- Vidrio poroso: Se trata de un cristal con poros muy finos a través del cual pueden pasar gases o líquidos. Está compuesto por partículas de vidrio aglomeradas, formando un cuerpo sólido y poroso. Se suele utilizar para filtrar partículas sólidas o para precipitar residuos de un fluido.
  - Ventajas: Dejan pasar las disoluciones acuosas perfectamente y de manera inmediata y no aumentan de volumen. Están disponibles comercialmente en la forma y dimensiones requeridas.
  - Desventajas: Se requiere una limpieza de los poros cada cierto tiempo haciendo pasar por succión acetona o ácido clorhídrico.

Finalmente se decidió utilizar el vidrio poroso, ya que permite el paso inmediato y de forma repetitiva de disoluciones acuosas, no se hincha, el hidrogel no se filtra a través de sus poros y está comercialmente disponible en la forma y tamaño deseados para la aplicación directa al dispositivo.

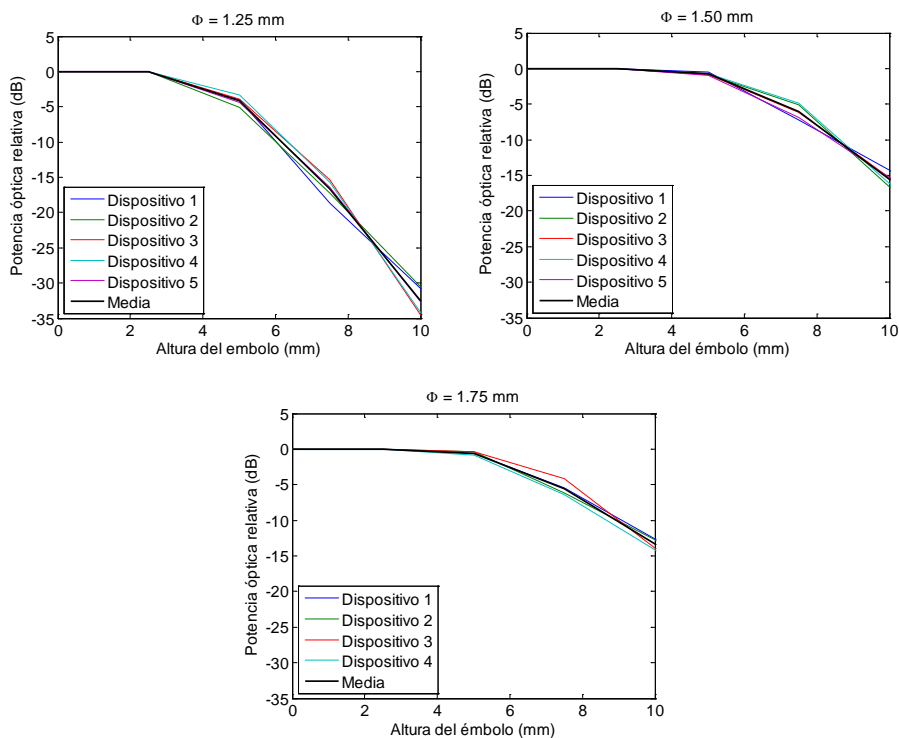
En cuanto a los orificios que se han de realizar en el cilindro exterior y en el émbolo, es importante resaltar que han de tener un diámetro adecuado, ya que de ello depende la sensibilidad del dispositivo. Si el diámetro es demasiado pequeño, se puede producir una curvatura demasiado grande con poca elevación del émbolo, y es demasiado grande podría no producir suficiente curvatura a pesar de un gran cambio de pH.

### 4.3.2. Calibración del dispositivo

Una vez decidido el diseño del dispositivo y los materiales de los que iba a estar hecho, es necesario calibrarlo para comprobar su funcionamiento. Para ello, hay que determinar la curva de respuesta de pérdida de potencia óptica respecto de la curvatura de la fibra óptica (que está relacionada con la altura del émbolo en el interior del cilindro). Además durante este proceso se ha de manejar una variable más, que es el diámetro de los orificios en el cilindro exterior y en el émbolo. En este sentido, se utilizaron brocas de diferentes diámetros para realizar los taladros, siendo los diámetros de estas brocas 1.25 mm, 1.5 mm y 1.75 mm.

El procedimiento que se llevó a cabo para caracterizar los dispositivos fue la de ir levantando el émbolo en pasos de 5 mm para ir aplicando curvatura a la fibra óptica. Para obtener las pérdidas ópticas producidas por esa curvatura, se podría haber utilizado una fuente óptica y un medidor de potencia en el otro extremo, aunque finalmente se optó por medir la potencia óptica en reflexión, de modo que al otro extremo se conectó una red de difracción de Bragg (FBG) y la potencia se medía en el camino de vuelta con un medidor de potencia habiendo sido previamente desviada la señal mediante un circulador óptico. Con este método se

consigue la ventaja de duplicar las pérdidas por curvatura, ya que éstas tienen lugar cuando la señal óptica viaja en el sentido de ida y posteriormente en el de vuelta, lo que consigue duplicar la sensibilidad del sensor.



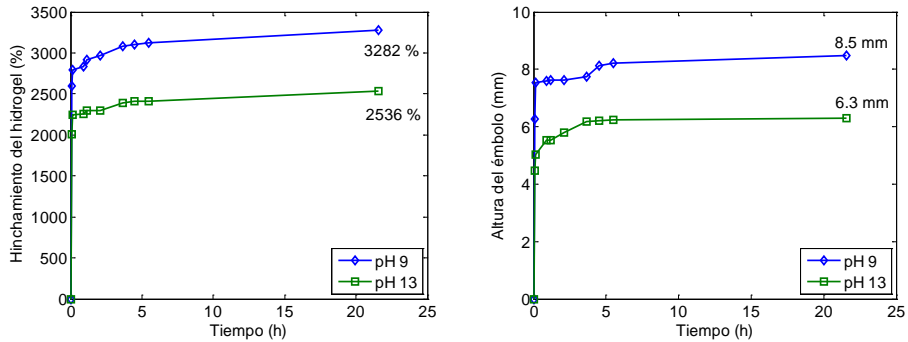
**Figura 4.10. Caracterización de los dispositivos con orificios de distinto diámetro.**

Se fabricaron varios dispositivos distintos para comprobar la repetitividad de los resultados (5 dispositivos diferentes con orificios de 1.25 mm y 1.5 mm cada uno, y 4 dispositivos diferentes con orificios de 1.75 mm), obteniendo unas curvas que relacionan la altura del émbolo (tomadas respecto de la altura inicial) con la potencia óptica reflejada respecto de la que se obtiene al inicio con la fibra óptica sin curvatura. En la Figura 4.10 se muestran los resultados de la caracterización del dispositivo con orificios de diferentes diámetros. Se puede observar la gran repetitividad de las curvas con solo unos pocos dispositivos diferentes. Cabe resaltar cómo para cualquier diámetro de orificio no existen pérdidas significativas hasta que el émbolo no se desplaza 2.5 mm. Esto es debido a que para este desplazamiento del émbolo, la curvatura no es suficiente para provocar pérdidas. Por otro lado, se observa que en el caso de los orificios de 1.25 mm de diámetro la potencia de la señal óptica cae de manera abrupta y con unas pérdidas mayores a los orificios de diámetro 1.5 mm y 1.75 mm. Tanto es así, que para desplazamientos del émbolo mayores a 10 mm, la potencia reflejada cae hasta el nivel de ruido de la fuente óptica, lo que indica una pérdida total de la señal óptica debido a la curvatura. A raíz de los resultados obtenidos, se decide escoger un diámetro de



orificio de 1.25 mm, ya que presenta una caída de señal más abrupta y amplia, lo que dota al sensor de mayor sensibilidad. Tan solo hay que limitar su funcionamiento de modo que el movimiento del émbolo debe estar limitado entre 2.5 mm y 10 mm.

Con la configuración final del dispositivo, se realizaron nuevas medidas de hinchado del hidrogel que se escogió para los ensayos, es decir, el quitosano-g-poli(AA-co-AAm), colocado en el interior del dispositivo para comprobar la elevación de émbolo que producía. La forma final en la que se fabricó el hidrogel fue en forma de disco de manera que se probaron diferentes pesos para que el hinchamiento estuviera dentro del margen de funcionamiento deseado. Finalmente, se decidió que el peso adecuado para el disco de hidrogel fuera entre 65 y 70 mg. El hinchamiento en peso y la elevación de émbolo que produce se han representado en la Figura 4.11.



**Figura 4.11. Evolución del hinchamiento del hidrogel (izquierda) y de la altura del émbolo debido al hinchamiento del hidrogel (derecha).**

Realizada la caracterización del dispositivo, se llevó a cabo un ensayo en el que ya se utilizó fibra óptica para poder monitorizar las pérdidas ópticas que se producen en el sensor de pH. El ensayo consistió en sumergir dos sensores de pH en sendas disoluciones en tampón de pH 9 y pH 13 respectivamente. El método de medida consistió como se comentó anteriormente en la medida de la potencia óptica en reflexión, por medio de la conexión de una FBG tras el dispositivo. De este modo, se monitorizó la potencia óptica durante un tiempo de 22 horas. En la Figura 4.12 se muestra la evolución de la potencia óptica durante el ensayo.

Puede observarse que se produce una caída rápida de la potencia en los primeros minutos de ensayo, a medida que el disco de hidrogel va absorbiendo la disolución en la que se halla inmerso. Tal y como se esperaba, esta pérdida de potencia óptica es mayor en el sensor que se ha sumergido en la disolución de pH 9 que el que se ha sumergido en la de pH 13. Esto es así ya que el hinchamiento y la consiguiente elevación del émbolo son mayores a pH 9 tal y como se pudo apreciar en la Figura 4.11, y por lo tanto, las pérdidas son mayores según la caracterización que muestra la Figura 4.10. Sin embargo, teniendo en cuenta esta última figura, las pérdidas que

se esperaban atendiendo al hinchamiento teórico del hidrogel debería haber sido de  $10.66 \pm 0.93$  dB para pH 13 y de  $22.98 \pm 0.45$  dB para pH 9. Esto es así porque el hinchamiento del hidrogel en este ensayo fue ligeramente menor al teórico, y que pudo comprobarse ya que se registró la altura del émbolo en varios instantes durante el ensayo, tal y como muestra la Figura 4.13.

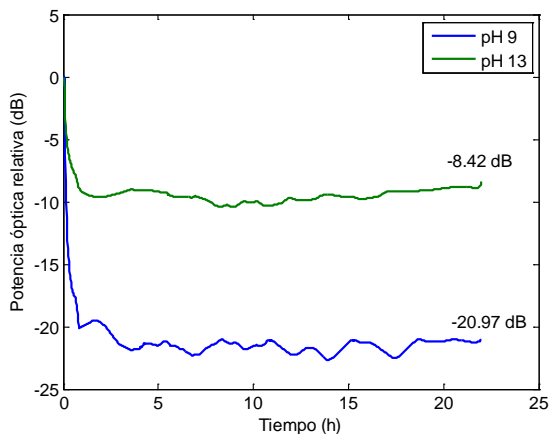


Figura 4.12. Evolución de la potencia óptica durante el ensayo de pH.

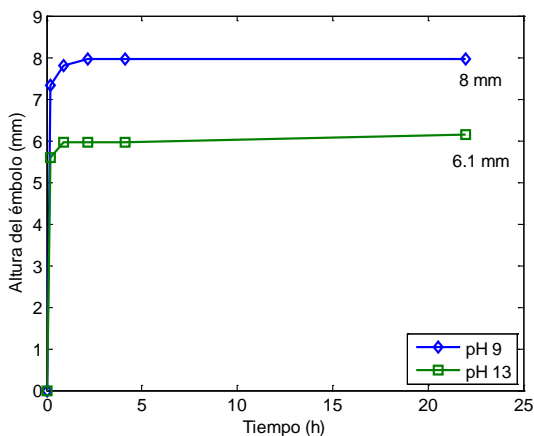


Figura 4.13. Altura del émbolo durante el ensayo con fibra óptica.

### 4.3.3. Ensayo en probetas de hormigón

Para comprobar el funcionamiento del sensor de pH basado en intensidad se realizó un ensayo introduciendo estos dispositivos en hormigón fresco y monitorizando la señal óptica durante las 24 horas siguientes. Estas primeras horas son críticas para el endurecimiento del hormigón, puesto que en las primeras 24 horas se alcanza el

50 % de la dureza final y los procesos que ocurren durante este periodo se reflejan en el pH del hormigón.

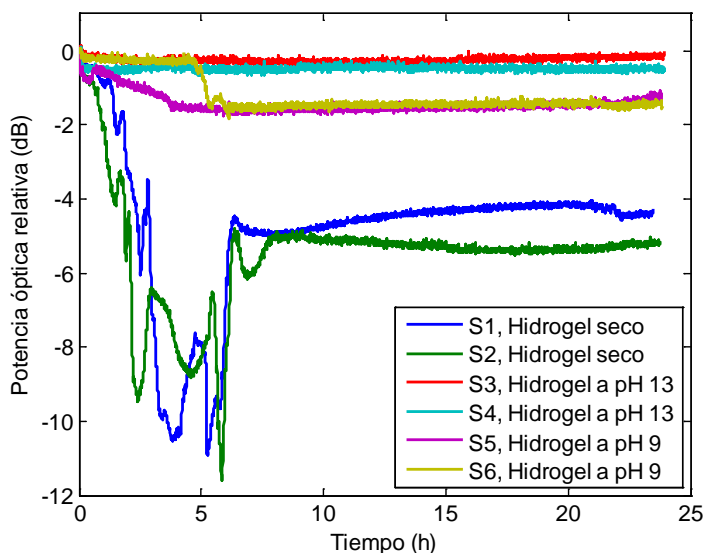
Se prepararon 6 dispositivos, de modo que el hidrogel alojado en su interior tenía unas condiciones iniciales diferentes: Los sensores 1 (S1) y 2 (S2) tenían el disco de hidrogel totalmente seco, los sensores 3 (S3) y 4 (S4) tenían el disco de hidrogel previamente hinchado a pH 13 y los sensores 5 (S5) y 6 (S6) tenían el disco de hidrogel previamente hinchado a pH 9. Los hidrogeles previamente hinchados se habían dejado sumergidos en disoluciones de pH 9 y pH 13 las 24 horas anteriores al inicio de este ensayo para que alcanzasen sin problema su máximo volumen. El hormigón utilizado en el ensayo se vertió en 3 moldes cúbicos para probetas de 10 cm de arista, de modo que en cada probeta se instaló cada tipo de sensor, tal y como se aprecia en la Figura 4.14. Al igual que en la calibración, se conectó una FBG después de cada sensor, de manera que se monitorizaba la potencia reflejada tras atravesar dos veces (ida y vuelta) cada uno de los sensores.



**Figura 4.14.** Instalación de los sensores ópticos de pH en las probetas de hormigón.

Los resultados de este ensayo se muestran en la Figura 4.15, donde se ha representado la potencia óptica relativa (respecto del instante inicial) que se refleja en función del tiempo de ensayo. Se puede observar que los sensores con el hidrogel inicialmente seco (sensores S1 y S2) registran una caída progresiva de potencia desde el principio de ensayo hasta las primeras 5-6 horas. Las pérdidas máximas registradas por el sensor S1 son de 10.93 dB y por el sensor S2 de 11.59 dB. A partir de este instante, la señal óptica recupera parte de su potencia, registrando ambos sensores unas pérdidas de en torno a 5 dB a las 8 horas. Desde este punto hasta el final del ensayo, los sensores S1 y S2 sufren una ligera variación de la potencia óptica reflejada hasta que se estabiliza a las 24 horas en unos valores

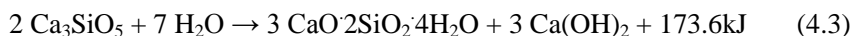
de pérdidas de 4.37 dB en el sensor S1 y de 5.15 dB en el sensor S2. Respecto a los sensores con hidrogel previamente hinchados a pH 13 (sensores S3 y S4), estos sensores registran unas pérdidas ópticas muy pequeñas durante el tiempo del ensayo, sin que se produzca ningún evento significativo. Después de 24 horas de ensayo, las pérdidas registradas son de 0.13 dB por parte del sensor S3 y de 0.51 dB por parte del sensor S4. En los sensores con hidrogel previamente hinchado a pH 9 (sensores S5 y S6), se observan unas pérdidas de 1.25 dB en el sensor S5 y de 1.49 dB en el sensor S6, aunque con un comportamiento diferente. En el caso del sensor S5 existe una caída inicial de potencia muy rápida los primeros 30 minutos, seguida de una caída más lenta hasta las 4 horas, cuando la potencia se estabiliza. En el sensor S6 por el contrario, la potencia reflejada permanece prácticamente constante hasta que empieza a caer la potencia a las 5 horas, estabilizándose tan solo 1 hora después.



**Figura 4.15.** Potencia óptica relativa registrada por los sensores ópticos durante las 24 primeras horas del hormigón.

#### 4.3.4. Análisis de los resultados

La explicación a los resultados obtenidos viene determinada por la variación de pH en el hormigón durante el tiempo de fraguado y endurecimiento temprano. Inicialmente, el hormigón tiene un pH en torno a 7 pero en los primeros minutos se produce un aumento rápido del pH debido a la hidratación de los compuestos del cemento, principalmente silicatos cálcicos. Las reacciones predominantes durante las primeras 24 horas son las derivadas de la hidratación del silicato tricálcico, como se muestra en la ecuación (4.3).



Según esta expresión, la adición de agua al silicato tricálcico provoca una reacción que genera silicato cálcico hidratado, hidróxido de calcio y calor. La generación de iones hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) es la causante del rápido aumento del pH en los minutos iniciales hasta un valor de entre 12 y 13. Estas reacciones continúan hasta que el sistema se satura, momento en el que empieza la cristalización del hidróxido de calcio, permaneciendo el pH constante a partir de este instante [Barneyback81].

Debido a este comportamiento del pH consistente en un rápido crecimiento y estabilización en un valor alto, los sensores S1 y S2 presentan una caída rápida de potencia inicial y una estabilización posterior en un valor de pérdidas de alrededor de 5 dB. Puesto que el valor de pH final en el hormigón se sitúa entre 12 y 13, cabría esperar unas pérdidas mayores, aunque es posible que no haya habido suficiente disolución atravesando el orificio inferior del sensor por lo que el hidrogel no tendría en ese caso suficiente disolución para hincharse. Por otro lado, los sensores S3 y S4 registran unas pérdidas muy pequeñas porque ya tenían el hidrogel previamente hinchado a pH 13, por lo que el cambio de pH para ese hidrogel es insignificante. Finalmente, los sensores S5 y S6 registran unas pérdidas ópticas moderadas, en torno a 1.5 dB, estando el hidrogel previamente hinchado a pH 9 y cambiando a una situación de pH entre 12 y 13. Teniendo en cuenta las cinéticas de hinchamiento de este hidrogel (Figura 4.8) un aumento de pH provoca una disminución en el volumen del mismo que provocaría una bajada del émbolo del sensor. Atendiendo al diseño del sensor (Figura 4.9), una bajada del émbolo también provoca curvatura a la fibra óptica que atraviesa el sensor, y por lo tanto, provoca pérdidas ópticas. Al ser el deshinchamiento de pH 9 a pH 13 menor que el hinchamiento de hidrogel seco a pH 13, se explica de este modo unas pérdidas inferiores a las registradas por los sensores S1 y S2. Este fenómeno explicaría también el alto tiempo de respuesta del dispositivo S6, ya que la bajada del émbolo en la estructura supone un movimiento irregular.

#### **4.4. Sensor de pH basado en cavidad Fabry-Pérot**

En este apartado se presenta una segunda tipología para desarrollar un sensor de pH mediante fibra óptica. Este sensor utiliza una estructura en fibra denominada cavidad Fabry-Pérot que consiste en enfrentar dos elementos reflectores de modo que se produzcan fenómenos de interferencia constructiva y destructiva. Esto provoca una serie de resonancias en el espectro óptico cuyas propiedades dependen tanto de las dimensiones físicas de fabricación de la cavidad como del tipo de fibra óptica. Para poder interactuar externamente con estas resonancias mediante un cambio de pH del material que rodea a la cavidad Fabry-Pérot se ha fabricado un elemento denominado *taper* que consiste en una reducción del diámetro original de la fibra óptica en el tramo comprendido entre reflectores. De este modo se consigue hacer sensible a la fibra a cambios externos del medio que la rodea. A continuación se describen las estructuras utilizadas, así como el diseño final del sensor y su utilización en un ensayo para comprobar su funcionamiento.

### 4.4.1. Cavity Fabry-Pérot

Una cavity Fabry-Pérot es una estructura interferométrica multirayo que fue construida por primera vez por Charles Fabry y Alfred Pérot en 1897 de quienes toma nombre. Esta estructura está compuesta por dos espejos enfrentados y separados una distancia, de modo que la luz se refleja entre ambos espejos, creando interferencias constructivas y destructivas dependiendo de la longitud de onda de la luz. La función de transferencia de una cavity Fabry-Pérot que consta de dos espejos de reflectividad  $R_1$  y  $R_2$  separados una distancia  $d$ , viene determinada por la expresión (4.4)[Barmenkov06].

$$T = \frac{(1 - R_1) \cdot (1 - R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 \cdot R_2})^2 + 4 \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2} \cdot \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (4.4)$$

Siendo  $\phi$  el camino óptico que recorren los rayos entre un espejo y otro. Para una incidencia sobre la estructura de un rayo con una longitud de onda  $\lambda$ , un ángulo de incidencia  $\alpha$  y siendo  $n$  el índice de refracción efectivo entre espejos, este valor viene definido por la ecuación (4.5):

$$\phi = \frac{2d}{\cos(\alpha)} k = \frac{4\pi nd}{\lambda \cos(\alpha)} \quad (4.5)$$

Habitualmente se tiene una incidencia normal ( $\alpha=0$ ) del rayo incidente. Además, normalmente los dos espejos son iguales, por lo que  $R_1=R_2$ , quedando finalmente la función de transferencia:

$$T = \frac{(1 - R)^2}{(1 - R)^2 + 4 \cdot R \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi nd}{\lambda}\right)} \quad (4.6)$$

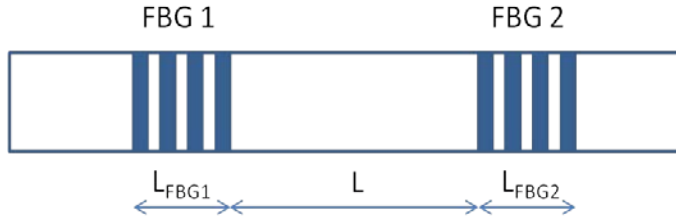
Esta función es periódica debido a la existencia de la función seno del denominador. Por lo tanto, presenta máximos cuando este seno es igual a 0, es decir, cuando el argumento es múltiplo de  $\pi$ . La separación entre máximos en esta estructura se denomina rango espectral libre (en adelante FSR, *Free Spectral Range*) y tiene como expresión:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nd} \quad (4.7)$$

### 4.4.2. Cavity Fabry-Pérot en fibra

Una cavity Fabry-Pérot se puede construir mediante dos espejos enfrentados, como se ha comentado en el apartado anterior. Este tipo de estructura se puede fabricar también en una fibra óptica, utilizando redes de difracción de Bragg (FBG), ya que éstas actúan como espejos para la luz que se propaga en el interior de la fibra

óptica. Para ello, habría que situar en la fibra dos FBG con idéntica longitud de onda de Bragg y separadas físicamente una cierta distancia.



**Figura 4.16. Cavidad Fabry-Pérot en fibra óptica.**

En la Figura 4.16 se muestra una cavidad Fabry-Pérot en fibra mediante dos FBG de longitud  $L_{FBG1}$  y  $L_{FBG2}$  de reflectividad  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente. Normalmente, se fabrican las dos FBG de manera idéntica, por lo que  $L_{FBG1} = L_{FBG2} = L_{FBG}$  y  $R_1 = R_2 = R$ . Hay que tener en cuenta que la distancia entre espejos no es la suma de longitudes físicas, ya que en el caso de FBG el punto donde se considera que se producen las reflexiones de la luz tienen lugar en una longitud  $L_{eff} < L_{FBG}$ . El valor de  $L_{eff}$  depende de la reflectividad y de la longitud física de la FBG [Barmenkov06], siendo su expresión:

$$L_{eff} = L_{FBG} \frac{\sqrt{R}}{2 \cdot \operatorname{atanh}(\sqrt{R})} \quad (4.8)$$

Y por lo tanto la distancia efectiva entre espejos es:

$$d = L_{eff1} + L_{eff2} + L = 2L_{eff} + L = L + L_{FBG} \frac{\sqrt{R}}{\operatorname{atan}(\sqrt{R})} \quad (4.9)$$

Para obtener la función de transmisión de una cavidad FP en fibra mediante FBG, hay que tener en cuenta que las propias FBG van a modular la función de transferencia de la cavidad con su propia función de transmisión. En concreto, la expresión de la función de reflexión de la cavidad se puede aproximar por la siguiente expresión [Miridonov01]:

$$R_{FP} = 2 \left[ \kappa L_{FBG} \operatorname{sinc} \left( \frac{\Delta k(\lambda) \cdot L_{FBG}}{2\pi} \right) \right]^2 \cdot [1 + \cos(\phi)] \quad (4.10)$$

$$\kappa = \frac{\pi \Delta n_1}{\lambda}$$

$$\Delta k(\lambda) = 4\pi n \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right)$$

$$\phi = \frac{4\pi n L_{FP}}{\lambda}$$

$$L_{FP} = 2L_{eff} + L$$

Siendo  $\kappa$  la constante de acoplo de la FBG que puede ser calculado mediante la amplitud de modulación del índice de refracción efectivo,  $\Delta n_1$ .  $\Delta k(\lambda)$  es un parámetro que caracteriza el desajuste entre la longitud de onda actual,  $\lambda$ , y la longitud de onda de Bragg de la FBG,  $\lambda_B$ . El argumento  $\phi$  representa el desfase de los rayos reflejados entre ambas FBG, al igual que ocurría en la ecuación (4.5). La función de transmisión de la cavidad FP en fibra se puede obtener mediante la ecuación (4.11).

$$T_{FP} = 1 - R_{FP} \quad (4.11)$$

Finalmente, la expresión del FSR quedaría como la ecuación (4.12).

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nd} = \frac{\lambda^2}{2nL_{FP}} = \frac{\lambda^2}{2n(2L_{eff} + L)} \quad (4.12)$$

### 4.4.3. Tapers

Un taper consiste en un tramo de fibra óptica a la que se le ha reducido el diámetro respecto del diámetro inicial. Consta de varias partes diferenciadas como puede verse en la figura 4.17. El tramo de fibra con sección reducida de diámetro  $D_w$  se denomina cintura (*waist*), y tiene una longitud  $L_w$ . Un taper también consta de dos zonas de transición, con una longitud  $L_t$ , a ambos lados de la cintura. Esta transición entre el diámetro inicial de la fibra  $D_i$  y el diámetro de cintura  $D_w$  puede ser más o menos abrupta. Según este criterio, los tapers se pueden dividir en adiabáticos (transición poco abrupta) y no adiabáticos (transición abrupta).

- Tapers adiabáticos: La mayor parte de la potencia permanece en el modo fundamental ( $LP_{01}$ ) y no se acopla a modos de orden superior mientras se propaga por el taper. Es decir, el cambio local relativo del radio del taper ha de ser muy pequeño (ángulo de taper pequeño).
- Tapers no adiabáticos: El acoplo de potencia se produce principalmente entre el modo fundamental de la fibra normal y los dos primeros modos de la guía de ondas en el taper ( $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$ ), dónde



debido a la gran diferencia de índices de refracción entre el aire y el sílice, el taper soporta más de un modo. La luz se propaga en la interfaz aire-cubierta de la región de la cintura del taper, en cuyo caso la fibra monomodo se convierte en fibra multimodo.

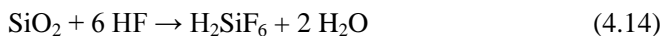
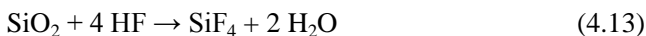


Figura 4.17. Partes de un taper en fibra óptica.

Existen varios métodos para conseguir fabricar esta estructura y conseguir esta reducción, de modo que se pueden clasificar en tres grupos. El primero de ellos se denomina calentado y estirado (*heat-pulling*), ya que consiste en calentar la zona de la fibra en donde se quiere realizar el taper hasta que ésta se reblandezca y entonces estirar. Normalmente se suele llevar a cabo esta técnica mediante máquinas empalmadoras de fusión para fibras ópticas [Bariáin00], ya que estas máquinas disponen de unos electrodos que aplican un arco eléctrico a dos extremos de fibra para que se unan mediante fusión. Si en vez de aplicar el arco eléctrico en dos extremos, se aplica en mitad de una fibra óptica, al estirar se consigue la forma de un taper. Existen otros métodos para calentar la fibra y proceder a su estirado, como por ejemplo mediante la aplicación a la fibra óptica de un rayo de una fuente láser de  $\text{CO}_2$  [Valaskovic95], o mediante la aplicación de una llama que se desplaza (*travelling burner*) [Brambrilla04, Clohessy05].

El segundo método de creación de tapers consiste en el pulido lateral (*side-polishing*) de la fibra óptica [Tseng92, Navneet03]. Para llevar a cabo esta técnica, se coloca la fibra óptica en un molde, generalmente hecho con cristal de silicio o de cuarzo, y se le aplica un lijado con papel de lija de grano muy fino ( $1-3 \mu\text{m}$  de tamaño de grano), de modo que se va puliendo la fibra óptica hasta dejar el núcleo de la misma al descubierto. Puesto que el pulido es lateral, el taper resultante no tiene geometría cilíndrica, sino que tiene forma de “U”.

El último método consiste en el atacado químico (*chemical-etching*) de la fibra, que normalmente se lleva a cabo mediante ácido fluorhídrico (HF). Este ácido es una solución de fluoruro de hidrógeno en agua, siendo una sustancia volátil, tóxica, altamente corrosiva y miscible con agua que ataca el silicato del vidrio, ya que éste reacciona con el HF formando tetrafluoruro de silicio ( $\text{SiF}_4$ ) o ácido hexafluorosilicato ( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ ) respectivamente, de acuerdo con las siguientes reacciones químicas [Zaatar00]:



Los tapers creados mediante atacado con HF tienen la característica de ser de geometría cilíndrica en la cintura y de tener una transición suave. Además, en este caso el atacado de la fibra óptica reduce solo el diámetro de la cubierta, dejando el núcleo inalterado hasta llegar a un diámetro de aproximadamente 9 μm, instante en el que el HF empieza a atacar al núcleo, reduciendo entonces el diámetro del mismo. Esta capacidad de poder reducir el diámetro de la fibra óptica hasta dejar al descubierto el núcleo, con una geometría cilíndrica, hace que mediante esta técnica se consigan unos tapers con mayor sensibilidad a agentes externos.

De las tres técnicas principales para la obtención de tapers se ha escogido la del atacado químico mediante HF, ya que presenta la ventaja de conseguir tapers más sensibles y de geometría cilíndrica de forma sencilla, sin ningún elemento adicional. Tiene sin embargo la desventaja de tener que trabajar con un material tóxico y corrosivo, por lo que hay que tomar las precauciones necesarias para trabajar con él. Entre las medidas de seguridad están el uso de guantes, mascarilla y gafas, y trabajar en una cámara de ventilación para evitar la inhalación de los gases tóxicos que desprende el HF.

En la tabla 4.1 se muestra una comparación entre las 3 técnicas de fabricación de tapers mencionadas, en la que se observan el perfil del taper, la sección de la cintura, las ventajas y desventajas de cada técnica

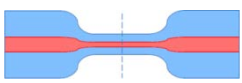
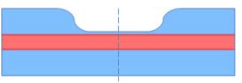
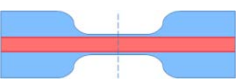

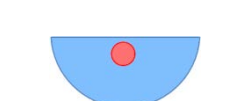

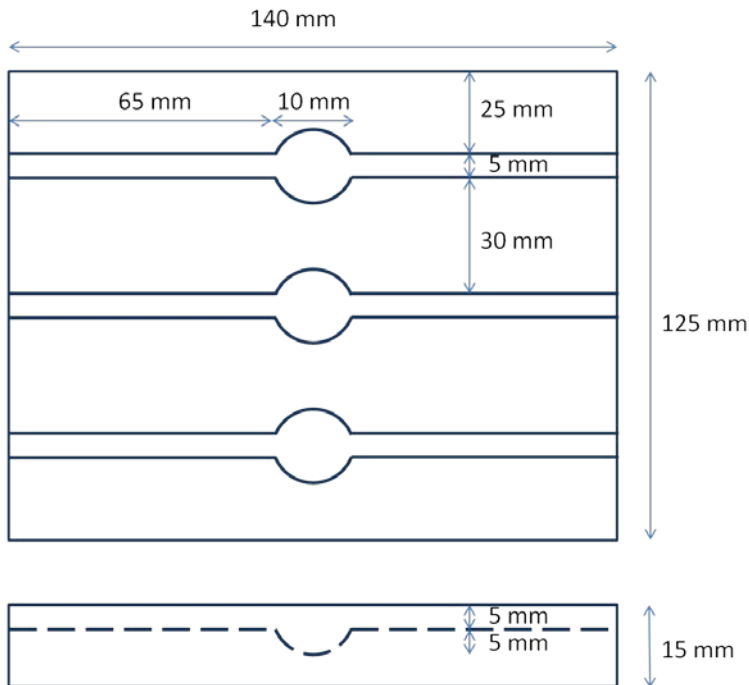
	Heat-pulling	Side-polishing	Chemical-etching
Perfil			
Sección de cintura			
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil de fabricar</li> <li>- Tapers reproducibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Accede al núcleo por un extremo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Accede al núcleo en 360°.</li> <li>- Tapers reproducibles</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se accede al núcleo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fabricación más compleja.</li> <li>- Menos reproducibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manejo de sustancias tóxicas y corrosivas.</li> </ul>

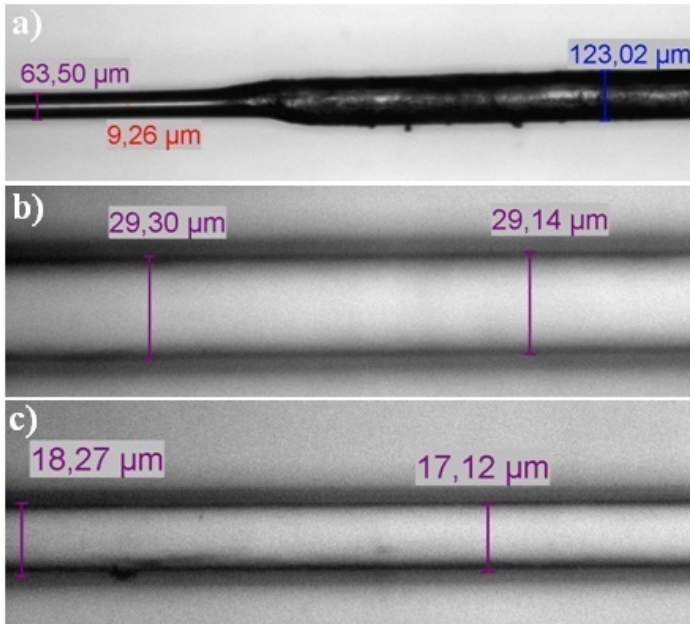
Tabla 4.1. Comparación entre las diferentes técnicas de fabricación de tapers.

Para la fabricación de tapers mediante la técnica de atacado químico, se construyó una estación de atacado hecha de teflón ya que éste es un material que no se ve afectado por el ácido fluorhídrico. En la figura 4.18 se muestra la geometría y las dimensiones de la estación de atacado. Ésta dispone de tres canales para poder fabricar tres tapers de forma simultánea. Estos canales tienen una sección de 5 mm de anchura por 5 mm de profundidad y una longitud de 140 mm, sirviendo de guía para la fibra óptica. En la mitad de la longitud del canal se ha realizado un taladrado para conseguir una cavidad semiesférica de 10 mm de diámetro. En esta cavidad se deposita una gota de HF, de modo que la fibra óptica queda completamente rodeada por esta gota.



**Figura 4.18.** Alzado y perfil de la estación de atacado con ácido fluorhídrico para fibra óptica.

Se realizaron multitud de ensayos de atacado de fibra óptica mediante HF con una concentración al 40 % para calibrar completamente el proceso de fabricación de tapers. Para ello se colocaron varias fibras ópticas en la estación de atacado químico y se detuvo el proceso de atacado en diferentes instantes. Para detener el proceso de atacado, primero se seca el recipiente de HF y posteriormente se lava la fibra con una disolución de pH elevado, en este caso, de pH 13. Este proceso se repite varias veces para eliminar todo el HF que pueda quedar sobre la fibra. Las fibras ópticas resultantes de estos ensayos se llevaron a un microscopio de barrido electrónico (SEM) y se realizaron unas capturas para medir el diámetro resultante del atacado con HF. En la figura 4.19 se muestran algunas de estas capturas en donde se puede apreciar el diámetro de la cintura del taper para diferentes tiempos de atacado.

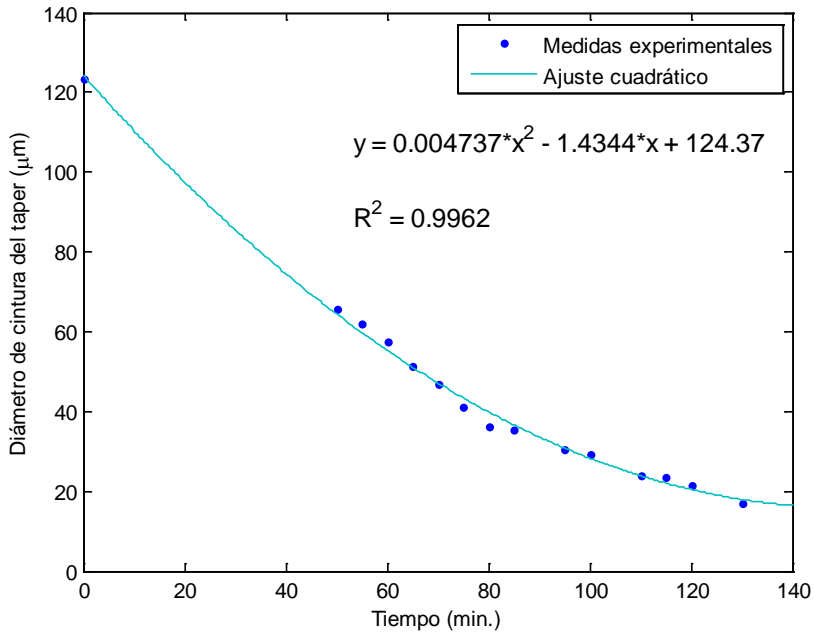


**Figura 4.19. a) Transición del taper transcurridos 55 minutos. b) Cintura del taper transcurridos 100 minutos. c) Cintura del taper transcurridos 130 minutos.**

Con los datos obtenidos se puede realizar una gráfica de diámetro de cintura del taper respecto del tiempo. En la figura 4.20 se han representado tanto los datos experimentales como una curva de ajuste cuadrático de dichos datos. El coeficiente de correlación de esta curva de ajuste tiene un valor de 0.9962, lo que significa que existe una fuerte dependencia cuadrática de los datos respecto del tiempo. Este resultado es diferente a otros resultados teóricos y experimentales realizados anteriormente [Lee84, Haddock03] en los que se demostraba una dependencia lineal del tiempo de atacado con la reducción de diámetro. Esta discrepancia es debida a que en este caso se utiliza tan sólo una gota de HF en vez de un baño como se ha venido haciendo hasta ahora. La variación del diámetro de cintura del taper varía con la relación 4.15 [Zhang10].

$$D(t) = D(t = 0) \cdot \left[ \frac{C_{HF}(t)}{C_{HF}(t = 0)} \right] \quad (4.15)$$

Donde  $D(t)$  es el diámetro de cintura del taper en el instante  $t$ ,  $D(t=0)$  es el diámetro de cintura en el instante inicial (en torno a  $125 \mu\text{m}$ ),  $C_{HF}(t)$  es la concentración de ácido fluorhídrico en el instante  $t$ , y  $C_{HF}(t=0)$  es la concentración de ácido fluorhídrico en el instante inicial. Al utilizar tan solo una gota de HF la relación entre superficie y volumen es muy alta, hecho que resulta en una disminución de la concentración de HF durante el tiempo de atacado. Es por ello que el diámetro de la fibra óptica no se reduce de manera lineal, ya que al disminuir progresivamente la concentración de HF con el tiempo, también lo hace la tasa de atacado de la fibra.

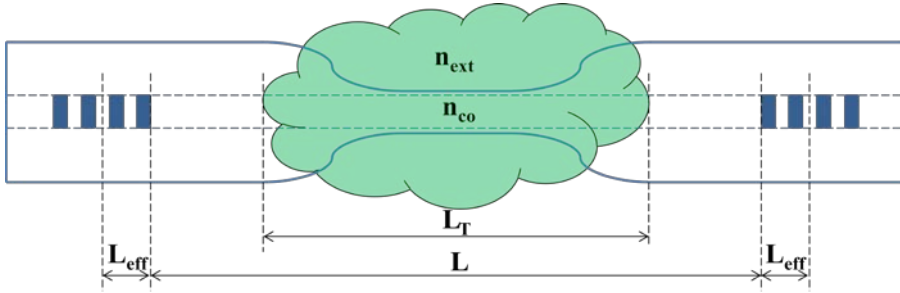


**Figura 4.20.** Evolución temporal del diámetro de cintura del taper durante el ataque químico con HF al 40 %.

#### 4.4.4. Diseño del sensor

Habiendo presentado las características de una cavidad Fabry-Pérot en fibra óptica, se expone en este apartado las razones de incorporar un taper en medio de la misma, es decir, entre FBG. El motivo principal es que se quiere desarrollar un sensor novedoso que utilice esta estructura, de modo que se modifiquen sus características espectrales para la medida de una magnitud, en este caso concreto pH. En este sentido, la misión del taper es la de medir el pH de un elemento que se encuentre rodeándolo. Este elemento transductor es el hidrogel, material que ya se ha presentado anteriormente. Por lo tanto, se va a estudiar el modo que tiene de interactuar el medio exterior con la respuesta espectral de una cavidad Fabry-Pérot

En primer lugar, se ha demostrado que la separación entre máximos en la respuesta en reflexión (mínimos en la respuesta en transmisión) viene determinada por la expresión (4.12). Ahora bien, el índice de refracción efectivo no es el mismo en toda la cavidad, ya que en la zona del taper, éste estará influenciado por el índice de refracción del medio exterior.



**Figura 4.21.** Diseño del sensor de pH basado en cavidad F-P para la medida del índice de refracción exterior.

Para calcular el índice de refracción efectivo en la zona del taper, haremos uso de la teoría de fibras de tres regiones [Snyder91], puesto que en dicha zona tenemos normalmente una estructura compuesta por 3 capas: núcleo, cubierta y medio exterior (Figura 4.21). Según esta teoría, la constante de propagación del modo fundamental en la zona del taper  $\beta_T$  viene dado por:

$$\beta_T = \beta + k\eta_p(n_{ext} - n_{cl}) \quad (4.16)$$

Donde,  $\beta$  es la constante de propagación del modo fundamental de la fibra óptica sin que existiera el taper,  $k$  es el número de onda con un valor de  $k=2\pi/\lambda$ , el índice de refracción del medio exterior se denota por  $n_{ext}$  y el índice de refracción de la cubierta por  $n_{cl}$ . El coeficiente  $\eta_p$  es la fracción de la potencia total del modo fundamental que atraviesa el área de la sección en la zona de cintura del taper,  $A_p$ . La ecuación (4.16) se puede escribir en términos de índice de refracción:

$$n_T = n + \eta_p(n_{ext} - n_{cl}) \quad (4.17)$$

En donde  $n_T$  es el índice de refracción efectivo en la zona del taper,  $n$  es el índice de refracción efectivo en la fibra óptica con el diámetro original. Respecto del coeficiente  $\eta_p$ , éste tiene un valor de:

$$\eta_p = \frac{\int_{A_p} \psi^2 dA}{\int_{A^\infty} \psi^2 dA} \quad (4.18)$$

Para los modos fundamentales en fibras ópticas circulares con guiado débil, se puede substituir  $F_0$  por  $\psi$  en la ecuación (4.18):

$$F_0 = \frac{J_0(\tilde{U}R)}{J_0(\tilde{U})} \quad 0 \leq R \leq 1 \quad (4.19)$$

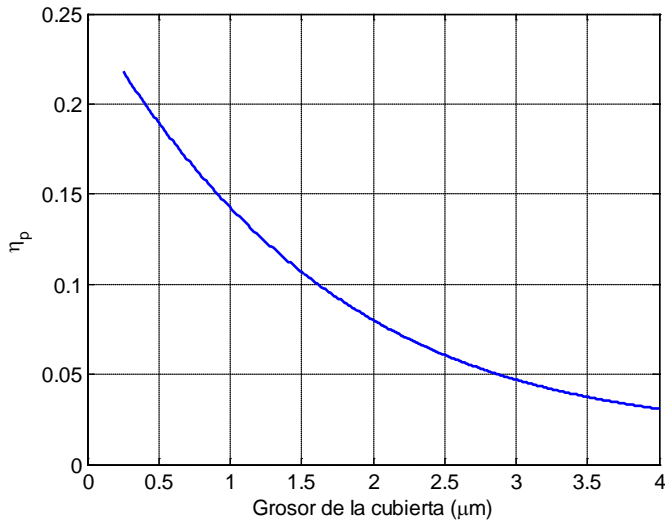
$$F_0 = \frac{K_0(\tilde{W}R)}{K_0(\tilde{W})} \quad 1 \leq R \leq \infty \quad (4.20)$$

Donde  $R = r/a$ , siendo  $a$  el radio del núcleo,  $J_0$  la función de Bessel de primera especie de orden cero, y  $K_0$  la función de Bessel modificada de segunda especie de orden cero. Los parámetros modales escalares  $\tilde{U}$  y  $\tilde{V}$  para el núcleo y la cubierta de la fibra óptica respectivamente, están relacionados con la frecuencia normalizada  $V$  mediante:

$$V^2 = \tilde{U}^2 + \tilde{W}^2 \quad (4.21)$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (4.22)$$

Haciendo uso de los datos del fabricante de la fibra óptica [FIB], tales como radio del núcleo  $a = 4.1 \mu\text{m}$  y diferencia entre índices de refracción del núcleo y la cubierta de 0.36%, obtenemos  $V=2.07$ . A este valor de frecuencia normalizada le corresponden unos valores de parámetros modales escalares para núcleo y cubierta de  $\tilde{U} = 1.545$  y  $\tilde{V} = 1.347$  respectivamente [Snyder91]. Conocidos estos parámetros, se puede representar una curva del valor del coeficiente  $\eta_p$  respecto del grosor de la cubierta en la cintura del taper, tal y como se muestra en la Figura 4.22.



**Figura 4.22: Coeficiente  $\eta_p$  respecto del grosor de la cubierta en la zona del taper.**

Finalmente, con estas consideraciones, la ecuación (4.10) aplicada a una cavidad Fabry-Pérot en la que se ha fabricado un taper en su interior sigue teniendo la misma expresión, pero cambia la fase del coseno de la función que modula al espectro de la FBG, quedando como en la ecuación (4.23):

$$\phi = \frac{4\pi n L_{FP}}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \left[ \bar{n} (2L_{eff} + L - L_T) + (\bar{n} + \eta_p (n_{ext} - n_{cl})) L_T \right] \quad (4.23)$$

Por lo tanto, también se verá modificada la expresión del FSR que se presentó en la ecuación (4.12), pasando a tener la expresión mostrada en la ecuación (4.24).

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nL_{FP}} = \frac{\lambda^2}{2n_T L_T + 2\bar{n} [2L_{eff} + (L - L_T)]} = \frac{\lambda^2}{2[\bar{n} + \eta_p (n_{ext} - n_{cl})] L_T + 2\bar{n} [2L_{eff} + (L - L_T)]} \quad (4.24)$$

### 4.4.5. Ensayo

El ensayo llevado a cabo para la medición de pH con el sensor basado en cavidad Fabry-Pérot en fibra consistió en primer lugar en la inscripción de las FBG en la fibra óptica. Los espectros en transmisión y en reflexión de una de ellas se capturaron con un analizador de espectros ópticos y se muestran en la Figura 4.23 (izquierda), cuyas características principales son: longitud de onda de Bragg  $\lambda_B = 1530.128$  nm, ancho de banda a -3 dB (en adelante FWHM, *Full Width at Half Maximum*) de 0,18 nm y reflectividad del 58%. En cuanto a dimensiones físicas, las FBG tenían una longitud de 5 mm y una separación entre ellas de 20 mm. El espectro en transmisión de la cavidad Fabry-Pérot resultante al inscribir ambas FBG en la fibra se capturó con el mismo analizador de espectros ópticos y se muestra en la Figura 4.23 (derecha), teniendo un FSR de 29.43 pm. Teniendo en cuenta los parámetros de fabricación, el FSR teórico según la expresión (4.12) es de 31.23 pm, aunque la pequeña diferencia con el resultado experimental puede ser debido a una mayor separación real entre FBGs y a una longitud de las mismas un poco mayor a lo esperado debido a pequeñas inexactitudes del sistema de fabricación (variaciones de apenas décimas de milímetro podrían suponer la diferencia existente entre el valor teórico y el experimental).

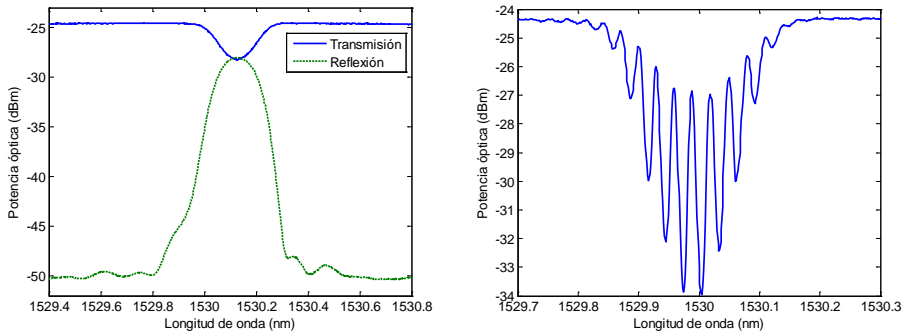
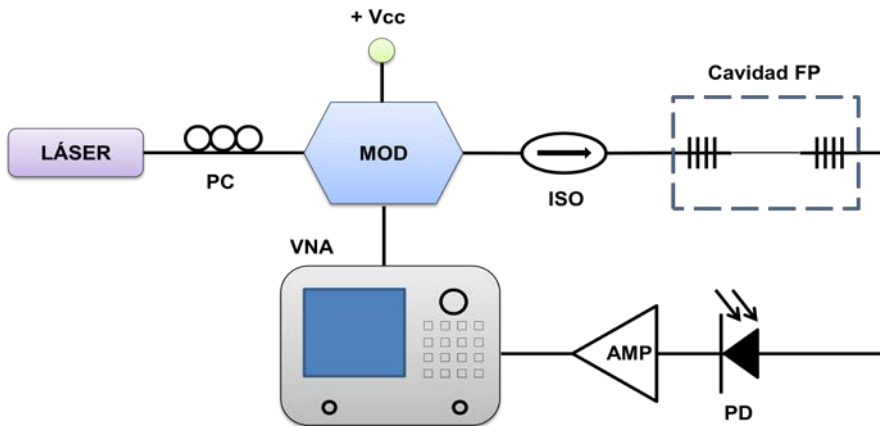


Figura 4.23. Espectro en transmisión y en reflexión de las FBGs inscritas (izquierda) y cavidad Fabry-Pérot creada (derecha).



Una vez fabricada la cavidad Fabry-Pérot, ésta se conecta al sistema de medida que se muestra en el esquema de la Figura 4.24. Este esquema tiene como finalidad aumentar la resolución de medida del espectro óptico, ya que los analizadores de espectros ópticos disponibles tenían una resolución de 10 pm, siendo insuficiente para medir pequeñas variaciones del FSR, que se esperaban por debajo de este valor. El montaje consta de un láser sintonizable en longitud de onda conectado a un modulador de amplitud a través de un controlador de polarización (PC, *Polarization Controller*). La señal eléctrica de modulación proviene del puerto 1 de un analizador de redes vectorial (VNA, *Vector Network Analyzer*). La salida del modulador pasa por un aislador óptico (ISO, *Optical Isolator*) y por la cavidad Fabry-Pérot (Cavidad FP) para llegar a un fotodetector (PD, *photodetector*). La salida del PD llega a un amplificador de radiofrecuencia (AMP) de 30 dB, conectándose a la salida con el puerto 2 del VNA.

El láser se sintoniza en una longitud de onda aproximadamente 130 pm inferior al centro del espectro de la cavidad FP. El motivo es que al modulador de amplitud le llega como señal de modulación una señal de radiofrecuencia procedente del VNA que realiza un barrido continuo entre 45 MHz y 50 GHz, de modo que la banda lateral de modulación se bate con el espectro de la cavidad FP al fotodetectar en el PD. Por lo tanto, en la pantalla del VNA aparecerá una señal eléctrica reflejo de la señal óptica que se encuentra entre 0.36 pm y 400 pm a partir de la longitud de onda de sintonización del láser. Esta ventana es suficiente para mostrar el espectro completo de la cavidad FP como se demostrará más adelante.

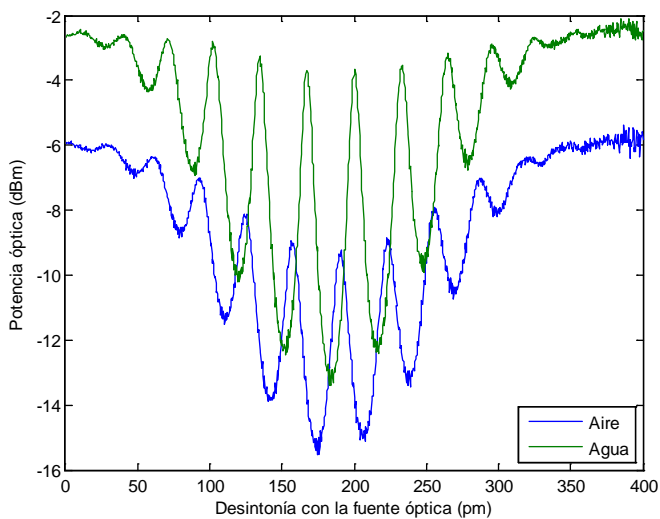


**Figura 4.24. Montaje experimental para la medición de pH mediante una cavidad Fabry-Pérot.**

Con el montaje ya realizado, se tomó un espectro de referencia con el taper al aire y otro espectro con el taper rodeado de agua destilada. Estos espectros se muestran en la Figura 4.25. Puede verse como al añadir agua, el espectro de la cavidad FP aumenta de potencia más de 3 dB y aumenta la visibilidad de las resonancias. Además, las resonancias están desplazadas con respecto al espectro tomado con el taper al aire, sin que haya un desplazamiento del espectro de la

cavidad FP. Esto es debido a que existe un cambio en el índice de refracción del medio exterior, al pasar de ser aire ( $n = 1$ ) a agua ( $n = 1.333$ ). Al aumentar el índice de refracción exterior se produce un mejor guiado de la potencia que va por la cubierta de la fibra óptica al ser este índice de refracción más cercano al valor del índice de refracción de la cubierta. El desplazamiento de las resonancias es debido a que un cambio del índice de refracción exterior produce un cambio en el índice de refracción efectivo en la región del taper, como se vio en la expresión (4.17), de modo que la luz que se refleja entre las FBGs encuentra un camino óptico diferente. El FSR presenta un valor de 31.97 pm para el taper al aire y de 31.57 pm para el taper con agua.

Posteriormente, se procedió a secar los alrededores del taper de modo que el medio exterior volvió a ser aire. Después, se rodeó al taper del hidrogel Ch-g-p(AA-co-AAm) en forma de polvo para que pudiera rodear al taper completamente. Una vez hecho esto, el siguiente paso fue humedecer al hidrogel en polvo con una disolución en tampón de pH 13 hasta que el hidrogel no absorbía más disolución porque se encontraba en un estado de saturación. Tras esta operación, se monitorizó el espectro durante el tiempo, capturándolo en varios instantes. En la Figura 4.26 se muestran los espectros capturados junto con el espectro de referencia del taper en agua.



**Figura 4.25. Espectros de la cavidad FP con el taper al aire y rodeado de agua destilada.**

Esta comparación se hace porque teóricamente el índice de refracción del hidrogel irá aproximándose de forma gradual al índice de refracción del agua ( $n_{\text{agua}} = 1,333$ ) a medida que éste vaya absorbiendo más agua. Sin embargo, no se ve cambio significativo en el FSR medido en los diferentes espectros, siendo su valor de 31.57 pm después de 5 minutos, 31.97 pm después de una hora y 31.97 después de dos horas. La misma operación se realizó pero humedeciendo el hidrogel con

una disolución en tampón de pH 9 una vez que el hidrogel se había secado completamente. Los espectros capturados se muestran en la Figura 4.27. Nuevamente se observa que el FSR no presenta cambios significativos, teniendo valores de 31.97 pm después de 5 minutos, 31.57 pm después de una hora y 31.57 después de dos hora. Además, en ambos casos, tanto para pH 9 como para pH 13 se observa en el espectro un desplazamiento de las resonancias, sin que haya desplazamiento de la envolvente del espectro. Esto es debido al cambio de índice de refracción exterior, al igual que ocurrió cuando el taper pasó de estar al aire a estar rodeado de agua.

Después de haber realizado los ensayos y una vez secado el hidrogel, se tomaron unas capturas de la cavidad FP con un microscopio electrónico de barrido (SEM, *Scanning Electron Microscope*). Estas capturas se muestran en la Figura 4.28, donde se puede observar en a) que el diámetro en la cintura del taper es de tan solo 10.1  $\mu\text{m}$ , lo que supone una reducción de la cubierta de hasta 0.9  $\mu\text{m}$  de grosor, teniendo en cuenta que el diámetro del núcleo es de 8.3  $\mu\text{m}$ . En b) se aprecia la transición del taper desde la zona de cintura hasta que la fibra óptica recupera su diámetro original. Como se puede observar, la transición es muy suave y no presenta saltos abruptos de diámetro. En c) se puede ver una ampliación del hidrogel en estado seco, envolviendo en parte la zona de cintura del taper.

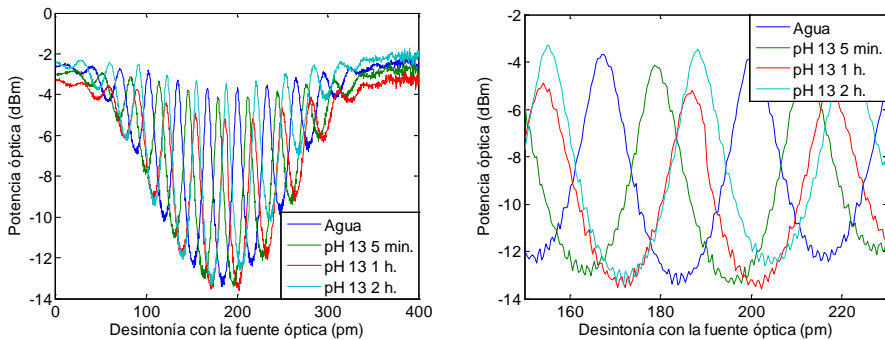


Figura 4.26. Espectros de la cavidad FP con el hidrogel a pH 13.

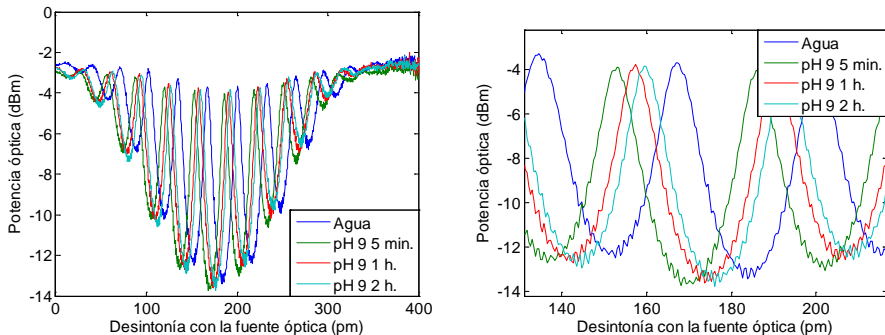


Figura 4.27. Espectros de la cavidad FP con el hidrogel a pH 9.

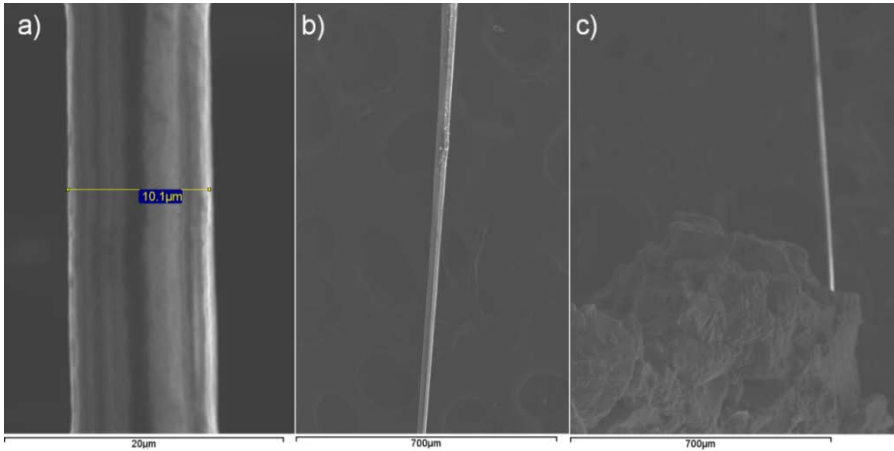


Figura 4.28. Capturas tomadas con el SEM de a) cintura del taper, b) transición del taper, c) hidrogel seco envolviendo la zona de cintura del taper.

#### 4.4.6. Discusión de los resultados

El motivo de no apreciar cambios significativos en el FSR es debido a que el cambio que éste experimenta es muy pequeño para el rango de índice de refracción exterior que existe en el ensayo. Además, la resolución del sistema es de 0.4 pm al disponer de 1000 puntos para un espectro de 400 pm. La Figura 4.29 muestra el FSR teórico de la cavidad FP en fibra con un taper en medio de las FBG mediante la ecuación (4.24) con los parámetros del ensayo. El coeficiente  $\eta_p$  se obtiene mediante la gráfica de la Figura 4.22, utilizando un valor de grosor de la cubierta de  $0.9 \mu\text{m}$  extraído de las capturas del SEM (Figura 4.31.a). De este modo, el coeficiente  $\eta_p$  tiene un valor de 0.15. En la Figura 4.29 puede observarse una variación del FSR de la cavidad FP de tan sólo 0.7 pm en un rango de índice de refracción exterior entre 1 y 1.6. Una resolución de 0.4 pm es insuficiente para medir esta variación de FSR

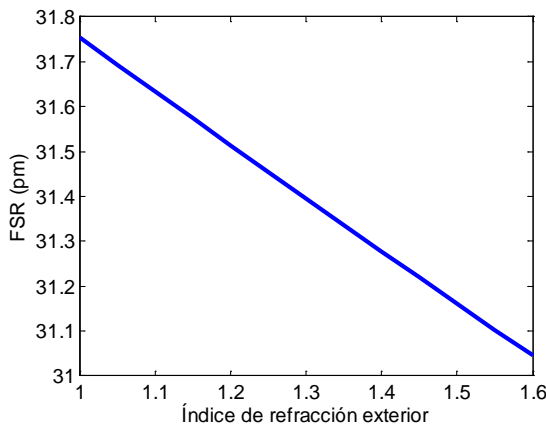
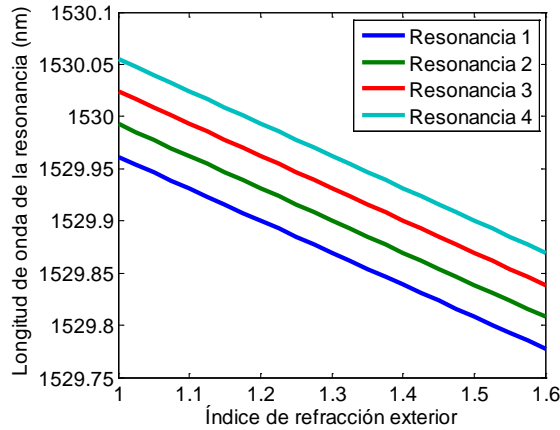
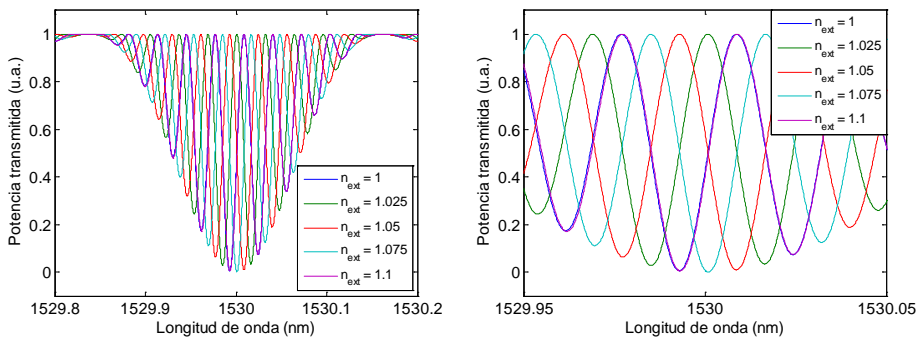


Figura 4.29. FSR teórico de la cavidad FP con los datos del ensayo real.



**Figura 4.30. Desplazamiento teórico de las resonancias con respecto al índice de refracción exterior.**



**Figura 4.31. Espectro teórico de la cavidad FP para valores del índice de refracción exterior comprendidos entre 1 y 1.1.**

Con respecto al desplazamiento de las resonancias de la cavidad FP, se muestra en la Figura 4.30 el desplazamiento teórico con los valores reales del ensayo respecto del índice de refracción exterior para las 4 resonancias centrales en el espectro de  $n_{ext} = 1$ . Se observa como las resonancias se desplazan a longitudes de onda inferiores de manera lineal, aunque cada resonancia con una pendiente diferente. Estas pendientes tienen unos valores de  $-307$  pm/RIU,  $-308.5$  pm/RIU,  $-310$  pm/RIU y  $-311.5$  pm/RIU para las resonancias 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Siendo estas pendientes diferentes, la diferencia entre las resonancias (es decir, el FSR) irá disminuyendo progresivamente, tal y como muestra la Figura 4.29.

Ya que las resonancias se desplazan hacia longitudes de onda menores, una resonancia puede desplazarse hasta una longitud de onda en la que se hallaba otra resonancia. En ese caso, existe una incertidumbre, ya que la forma del espectro es la misma. En la Figura 4.31 se han representado 5 espectros para índices de refracción

comprendidos entre 1 y 1.1. Puede observarse que para  $n_{\text{ext}} = 1$  y para  $n_{\text{ext}} = 1.1$  la forma del espectro es casi idéntica. No es exactamente la misma, puesto que las resonancias ubicadas en longitudes de onda superiores tienen un mayor desplazamiento, reduciendo progresivamente el FSR. Sin embargo, esta situación provoca incertidumbre en la medida.

### 4.5. Conclusiones

En este capítulo se han presentado dos tipos diferentes de sensores de pH mediante fibra óptica con la incorporación de un hidrogel. El mecanismo transductor del primer tipo de sensor convierte las variaciones de pH en variaciones de la potencia óptica a través del aumento de volumen del hidrogel. El segundo tipo de sensor presentado utiliza las variaciones de las características espectrales de las resonancias propias de una cavidad Fabry-Pérot provocadas por el cambio de índice de refracción del hidrogel al absorber mayor o menor cantidad de disoluciones con diferente pH.

Se han caracterizado tres hidrogeles diferentes y se ha comprobado que estos materiales son unos buenos candidatos para la medida de pH, ya que varían ampliamente su volumen y peso ante disoluciones de diferentes pH. La utilización de hidrogel como mecanismo transductor se ha realizado de manera satisfactoria para realizar sensores de pH habiéndose realizado ensayos para los supuestos de aplicación de un hormigón en buen estado (pH 13) y un hormigón armado con un proceso de corrosión muy avanzado (pH 9). Finalmente se ha elegido uno de estos hidrogeles, concretamente el Ch-g-p(AA-co-AAm) ya que presenta el mayor hinchamiento y con una mayor diferencia entre pH 13 y pH 9 y con un tiempo de respuesta menor.

Se ha desarrollado un dispositivo que transforma las variaciones de volumen del hidrogel en pérdidas ópticas por curvatura, habiéndose llevado a cabo la calibración de dicho dispositivo. Además, se ha aplicado esta topología a un ensayo con hormigón real, monitorizando las variaciones de pH durante las primeras 24 horas de vida del hormigón. Los resultados experimentales se han comparado con el comportamiento teórico y se ha encontrado una buena correspondencia de los datos recogidos por los sensores con los datos esperados. De esta forma, se pueden registrar las variaciones de pH durante el tiempo de curado del hormigón para conocer los tiempos de las fases que corresponden a las diferentes reacciones químicas que tienen lugar. Diferentes tipos de hormigones y con diferentes aditivos pueden ser monitorizados con este sensor.

Por otro lado, para la segunda tipología desarrollada para fabricar un sensor de pH se ha realizado con éxito la fabricación de una estructura compuesta de dos FBG de idénticas características separadas una distancia, entre las que se ha conseguido reducir el diámetro mediante atacado químico con ácido fluorhídrico, consiguiendo unos tapers de transición suave y repetitivos. Sin embargo, con este sensor se han

---

encontrado una serie de limitaciones, ya que no se ha conseguido calibrar la variación del FSR o del desplazamiento de las resonancias. En primer lugar, la reducción de diámetro de la fibra óptica (conocida como taper) que se ha conseguido no parece ser suficiente para que el sensor tuviera la sensibilidad deseada respecto del índice de refracción exterior. Una mayor reducción del diámetro del núcleo de la fibra óptica hubiera supuesto una mayor parte de la potencia que se guía por la cubierta en la zona del taper, aumentando el efecto del medio exterior sobre el índice de refracción efectivo de la estructura que actúa como sensor. Sin embargo, se ha comprobado como el diferente grado de hinchamiento del hidrogel tiene efecto sobre las propiedades espectrales de la cavidad F-P, tanto en la variación del FSR como al desplazamiento en longitud de onda de las resonancias.

## 4.6. Referencias

[Bariáin00]: C. Bariáin, I. R. Matías, F. J. Arregui, M. López-Amo, "Optical fiber humidity sensor based on a tapered fiber coated with agarose gel", *Sensors and Actuators B*, Vol. 69, pp. 127-131 (2000).

[Barmenkov06]: Y. O. Barmenkov, D. Zalvidea, S. Torres-Peiró, J. L. Cruz, M. V. Andrés, "Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings", *Optics Express*, Vol. 14, No. 14, pp. 6394-6399 (2006).

[Barneyback81]: R. S. Barneyback, S. Diamond, "Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, pp. 279-85, (1981).

[Brambilla04]: G. Brambilla, V. Finazzi, D. J. Richardson, "Ultra-low-loss optical fiber nanotapers", *Optics Express*, Vol. 12, No. 10, pp. 2258-2263 (2004).

[Brossia95]: C. S. Brossia, E. Gileadi, R. G. Kelly, "The electrochemistry on iron in methanolic solutions and its relation to corrosion", *Corrosion Science*, Vol. 37, pp. 1455-1471 (1995).

[Clohessy05]: A.M. Clohessy, N. Healy, D.F. Murphy, C.D. Hussey, "Short low-loss nanowiretapers on singlemodefibres", *Electronic Letters*, Vol. 41, pp. 27-29 (2005).

[FIB]:Fibercore photosensitive optical fiber, PS1250/1500 series.

<http://www.fibercore.com/Products/PSSeries/tabid/91/agentType/View/PropertyID/266/Default.aspx>

[Garcés05]: P. Garcés, M. C. Andrade, A. Saez, M. C. Alonso, "Corrosion of reinforcing steel in neutral and acid solutions simulating the electrolytic environments in the micropores of concrete in the propagation period", *Corrosion Science*, Vol. 47, No. 2, pp. 289-306, (2005).

[Irie93]: M. Irie, Y. Misumi, T. Tanaka, "Stimuli-responsive polymers: chemical induced reversible phase separation of an aqueous solution of poly(N-isopropylacrylamide) with pendent crown ether groups", *Polymer*, Vol. 34, No. 21, pp. 4531-4535 (1993).

[Kaneko05]: T. Kaneko, T. Asoh, M. Akashi, "Ultrarapid molecular release from poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels perforated using silica nanoparticle networks", *Macromolecular Chemistry and Physics*, Vol. 206, pp. 566-574 (2005).

[Katchalsky49]: A. Katchalsky, "Rapid swelling and deswelling of reversible gels of polymeric acids by ionization", *Experientia*, Vol. 5, No. 8, pp. 319-320 (1949).

[Kuhn50]: W. Kuhn, B. Hargitay, A. Katchalsky, H. Eisenberg, "Reversible dilation and contraction by changing the state of ionization of high-polymer acid networks". *Nature*, 165, pp. 514-516 (1950).

[Mahdavinia04]: G. R. Mahdavinia, A. Pourjavadi, H. Hosseinzadeh, M. J. Zohuriaan, "Modified chitosan 4. Superabsorbent hydrogels from poly(acrylic-co-acrylamide) grafted chitosan with salt- and pH-responsiveness properties", *European Polymer Journal*, Vol. 40, pp. 1399-1407 (2004).

[Miridonov01]: S. V. Miridonov, M. G. Shlyagin, D. Tentori, "Twin-grating fiber optic sensor demodulation", *Optics Communications*, Vol. 191, pp. 253-262 (2001).

[Pagey82]: C. L. Pagey, K. W. J. Treadaway, "Aspects of the electrochemistry of steel in concrete", *Nature*, Vol. 297, No. 5862, pp. 109-115, (1982).

[Pourjavadi06]: A. Pourjavadi, G. R. Mahdavinia, "Superabsorbency, pH-sensitivity and swelling kinetics of partially hydrolyzed chitosan-g-poly(acrylamide) hydrogels", *Turkish Journal of Chemistry*, Vol. 30, pp. 595-608 (2006).

[Sharma03]: N. K. Sharma, B. D. Gupta, "Fabrication and characterization of pH sensor based on side polished single mode optical fiber", *Optics Communications*, Vol. 216, pp.299-303 (2003).

[Snyder91]: A. W. Snyder, J. D. Love, "Optical waveguide theory", Ed. Chapman & Hall, London, pp. 313-379 (1991).

[Suzuki90]: A. Suzuki, T. Tanaka, "Phase-transition in polymer gels induced by visible-light", *Nature*, 346, pp. 345-347 (1990).

[Tanaka78]: T. Tanaka, "Collapse of gels and the critical endpoint", *Physical Review Letters*, Vol. 40, No. 12, pp. 820-823 (1978).

[Tseng92]: S. M. Tseng, C. L. Chen, "Side polished fibers," *Applied Optics*, Vol. 31, No. 18, pp. 3438-3447 (1992).

[Valaskovic95]: G.A. Valaskovic, M. Holton, G.M. Morrison, "Parameter control, characterization, and optimization in the fabrication of optical fiber nearfield probes", *Applied Optics*, Vol. 34, pp. 1215-1228 (1995).

[Zaatar00]: Y. Zaatar, D. Zaouk, J. Bechara, A. Khoury, C. Llinares, J-P. Charles, "Fabrication and characterization of an evanescent wave fiber optic sensor for air pollution control", *Materials Science and Engineering*, Vol. 74, pp. 296-298 (2000).

[Zhang10]: E. J. Zhang, W. D. Sacher, J. K. S. Poon, "Hydrofluoric acid flow etching of low-loss subwavelength-diameter biconical fiber tapers", *Optics Express*, Vol. 18, No. 21, pp. 22593-22598 (2010).



# Capítulo 5

## Sensor de temperatura basado en puntos cuánticos embebidos en PMMA

### 5.1. Introducción

Recientemente ha aumentado el interés en desarrollar una gran variedad de dispositivos fotónicos integrados debido a su aplicación en campos como la telecomunicación y el sensado. Para este propósito, los puntos cuánticos coloidales (en adelante QD, *Quantum Dots*) han resultado ser unos materiales muy atractivos como medio activo para ser integrados en dispositivos fotónicos. Estas nanoestructuras añan el confinamiento tridimensional de la función de onda, característica de los QD, con la viabilidad de los métodos químicos, capaces de conseguir un radio de las nano-estructuras desde 1 nm hasta 10 nm con una

dispersión de tamaño tan baja como el 6 % [Klimov03], [Tomczak09]. Puesto que el tamaño de los puntos cuánticos es muy pequeño, los estados electrónicos son mucho mayores que la energía térmica y la emisión de los QD se vuelve independiente con la temperatura. Es más, los QD ofrecen la posibilidad de sintonizar su longitud de onda de emisión cambiando no solo el tamaño sino también el material base, sin modificar químicamente su superficie. De este modo, la elección apropiada de dos o más QD diferentes proporciona la emisión de múltiples longitudes de onda (o emisión “multicolor”) siendo una propiedad muy potente y atractiva, ya que permite la posibilidad de multiplexar en longitud de onda varios sensores ópticos [Goldman04].

Durante la última década, numerosos investigadores han estudiado el uso de la fluorescencia de los QD en aplicaciones biológicas (tales como etiquetado en bioanálisis y diagnóstico [Chan02], [Alivisatos04], codificación para proteínas e inmunoensayos de ADN [Riegler04], o para etiquetas compatibles para estudios de imágenes in-vivo [Smith04]) ya que pueden modificar su superficie mediante conjugación con las biomoléculas apropiadas. Además, también se han desarrollado sensores químicos ya que se puede obtener la sensibilidad a una molécula determinada adaptando químicamente la superficie exterior de los QD. De este modo, se han desarrollado un sensor selectivo a iones para la medida de los cationes  $Zn^{2+}$  y  $Cu^{2+}$  [Chen02], y se ha presentado un sensor para la medida de moléculas explosivas tales como TNT o nitrobenzeno [Shi08].

Para poder realizar la integración de las propiedades de los QD en dispositivos optoelectrónicos, una aproximación usual es la de incorporarlos en un material huésped. Estos materiales multi-componentes son conocidos como *nanocomposites*. Walker et al. caracterizaron por primera vez la respuesta con la temperatura de la fotoluminiscencia (en adelante PL, *Photoluminescence*) de QD coloidales inmovilizados dentro de una matriz de polilauril metacrilato (PLMA) [Walker03], demostrando la idoneidad de los QD como sensores de temperatura para aplicaciones de sensado basadas en PL. Otros autores también han informado del uso de diferentes polímeros como material base tales como poliestireno (PS) [Valerini05], o polimetil metacrilato (PMMA) [Song07] para embeber los QD, e incluso se ha utilizado la ayuda de fibra óptica para llevar a cabo el acoplo de luz [Jorge05]. Todos estos trabajos usan la PL de los QD como el parámetro de sensado, pero ninguno de ellos integra la respuesta de PL en una guía de ondas óptica, que es el paso clave para desarrollar un sensor de temperatura en de un dispositivo fotónico.

En este capítulo se presenta un sensor de temperatura basado en la dependencia con la temperatura de la PL guiada procedente de QD de seleniuro de cadmio (CdSe) y de telururo de cadmio (CdTe) embebidos en láminas de PMMA. Se describe el proceso de fabricación de guías de onda planas basadas en QD y se presenta el montaje experimental llevado a cabo para realizar los ensayos de temperatura. Finalmente, se muestra la caracterización con la temperatura de la PL guiada en ambas guías de CdSe-PMMA y CdTe-PMMA desde 25 °C hasta 50 °C. La intensidad de pico de la PL guiada muestra un comportamiento cuadrático

decreciente en ambas guías. Entre las dos guías ensayadas, la guía CdTe-PMMA muestra la mayor sensibilidad en temperatura.

## 5.2. Fabricación de las guías de onda

Los materiales activos elegidos para fabricar las guías fueron QD de seleniuro de cadmio (CdSe) y telururo de cadmio (CdTe) incorporados en una matriz de polimetil metacrilato (PMMA). La síntesis de los QD de CdSe se realizó mediante el procedimiento desarrollado por el grupo de X. Peng [Yu02]. Los QD de CdTe se sintetizaron de un modo similar, usando una disolución de telurio-trioctilfosfina. Una vez preparados los QD, se obtuvieron las disoluciones de CdSe-PMMA y CdTe-PMMA mezclando los QD con PMMA, ambos diluidos en tolueno. La concentración de los QD en el polímero se eligió de acuerdo con un estudio previo [Suárez11], donde factores de llenado de  $5 \cdot 10^{-4}$  se encontraron óptimos para el guiado. Para llevar a cabo la fabricación de las guías de onda, las disoluciones se depositaron mediante la técnica de *spin-coating* sobre substratos de dióxido de silicio sobre sílice ( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ), tal y como se muestra en la Figura 5.1, y calentadas a  $80^\circ\text{C}$  y  $150^\circ\text{C}$  durante 2 minutos. La capa de  $\text{SiO}_2$  se preparó por medio de la técnica “sol-gel” [S-G] resultando en una lámina de 600 nm de grosor, actuando como una cubierta de bajo índice de refracción para los modos ópticos del núcleo a las longitudes de onda de interés (400 nm-600 nm). Finalmente, se realizó un corte perpendicular en los bordes de las guías para posibilitar el acoplamiento de luz por el canto, quedando las dimensiones físicas de la misma en 5 mm de ancho y 10 mm de largo.

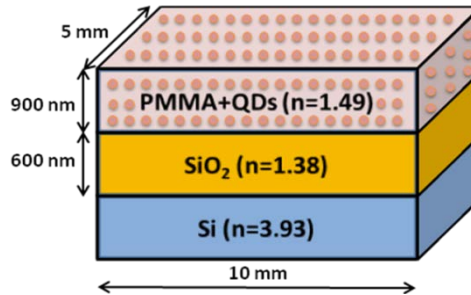
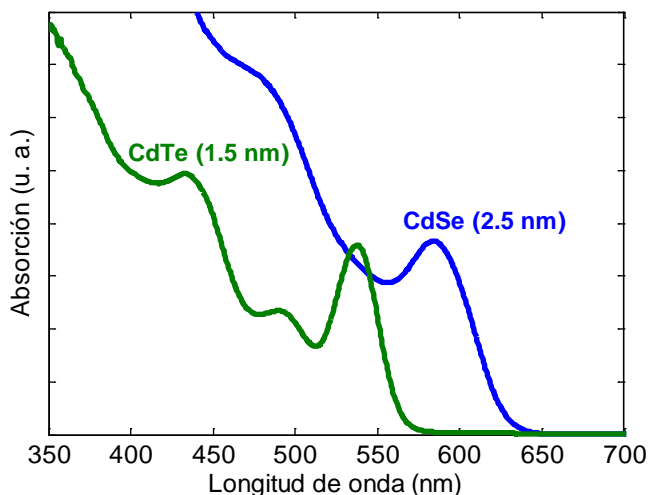


Figura 5.1. Estructura de la guía de onda plana fabricada (no está en escala).

El espectro de absorción de las disoluciones que contienen los QD de CdSe y CdTe se muestra en la Figura 5.2. El espectro de absorción de los puntos cuánticos de CdSe (línea azul) tiene un pico de absorción correspondiente a la transición del excitón al estado relajado alrededor de 580 nm, mientras que se observa una transición al estado excitado alrededor de 473 nm. La absorción es despreciable para longitudes de onda mayores a 650 nm y se incrementa de forma continua para longitudes de onda menores. De forma similar, los puntos cuánticos de CdTe (línea

verde) tienen un pico de absorción correspondiente a la transición del excitón al estado relajado alrededor de 537 nm, mientras que se observan dos transiciones al estado excitado alrededor de 490 nm y 430 nm. La absorción es despreciable para longitudes de onda mayores a 570 nm y se incrementa de forma continua para longitudes de onda menores. De acuerdo con los datos de absorción publicados por otros autores, el pico del excitón a 580 nm para los puntos cuánticos de CdSe y a 537 nm para los de CdTe corresponderían a radios de las nanopartículas de alrededor de 2.5 y 1.5 nm respectivamente [Yu03, Mello09].



**Figura 5.2. Espectros de absorción para los puntos cuánticos de CdSe y CdTe en la disolución coloidal.**

En la Figura 5.3 se muestra el espectro de PL a 25 °C de los QD de CdSe (líneas azules) y de CdTe (líneas verdes) medidos en la disolución coloidal de tolueno (línea continua) y en el nanocomposite de PMMA (línea punteada). Estas medidas se tomaron mediante la retro-dispersión de un diodo láser de GaN (centrado a 404 nm) que iluminaba las guías. El espectro de PL de los puntos cuánticos de CdSe en la solución coloidal está centrado en 620 nm y tiene un FWHM de 40 nm, mientras que el espectro de PL de los puntos cuánticos de CdTe en la solución coloidal está centrado en 560 nm y tiene un FWHM de 30 nm. El desplazamiento de la PL hacia longitudes de onda mayores con respecto a la resonancia de absorción se conoce como el desplazamiento de Stokes y es una característica típica de las nanoestructuras de semiconductor [Demchenko11]. Cuando se incorporan los QD al polímero, las curvas de absorción son similares a las mostradas en la Figura 5.2, excepto por un desplazamiento de Stokes menor debido al hecho de que una cierta proporción de nano-partículas pueden aglomerarse. Las curvas de PL de los QD de CdSe y CdTe en el nano-composite están centradas en 600 nm y 545 nm respectivamente, habiéndose desplazado a longitudes de onda más pequeñas. Estos desplazamientos son un signo visible de la influencia de los alrededores sobre la emisión de los QD.

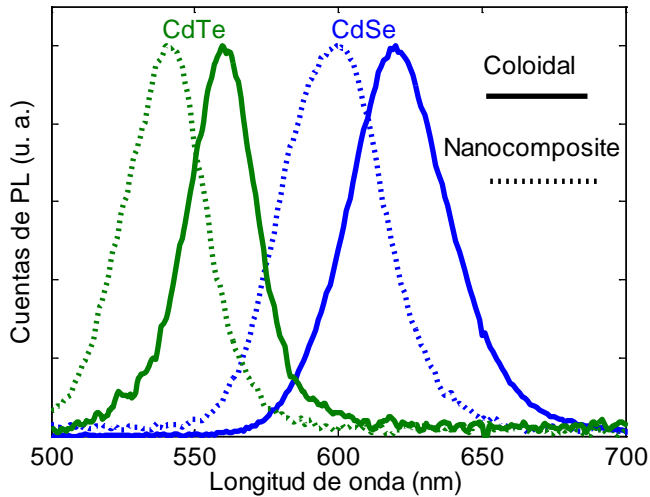


Figura 5.3. Espectro de PL de los QD de CdSe y CdTe en la disolución coloidal e incorporados en el nanocomposite de PMMA.

### 5.3. Montaje experimental

El montaje experimental se muestra en el esquema de la Figura 5.4. El guiado de la PL fue caracterizado mediante el acoplo de luz de un diodo láser de GaN centrado a 404 nm sobre ambas guías planares de CdSe-PMMA y CdTe-PMMA. El haz del láser se enfocó hacia la superficie de las guías planares desde la dirección vertical con un ángulo de incidencia de  $90^\circ$  respecto a éstas, mediante el uso de una lente semicilíndrica. Como resultado, el haz quedó enfocado en una fina línea a lo largo de la guía. En esta condición, los puntos cuánticos son bombeados por igual a lo largo de toda la longitud de la guía, acoplándose la PL a los modos de la guía, tal y como fue discutido en [Suárez11]. Las guías de onda se colocaron encima de una resistencia cerámica capaz de aumentar la temperatura cuándo la corriente eléctrica pasa a través de ella por efecto de Joule. La resistencia cerámica utilizada tenía un valor de resistencia de  $22\text{ K}\Omega$  y una potencia de disipación máxima de 5 W, con unas dimensiones de 5 mm de ancho y 15 mm de largo. La temperatura de la parte superior de la resistencia se obtuvo mediante un sensor eléctrico de tipo PT100 con una resolución de  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$  y era controlada por un controlador de temperatura modelo CAL9300 del fabricante CAL Controls. El principio de operación de este controlador está basado en la conmutación de un relé eléctrico conectado a una fuente de corriente, abriendo o cerrando los contactos en función de la temperatura objetivo y de la temperatura actual. Tras las guías, un objetivo recoge la luz y la dirige hacia el sistema de detección. Este objetivo se montó en un sistema de posicionamiento tridimensional de resolución micrométrica para mejorar el acoplamiento de luz desde las guías. Finalmente, se enfoca la PL colimada mediante una lente semicilíndrica para acoplarla a la entrada de una fibra óptica

multimodo conectada a un espectrómetro (StellarNet EPP2000). Este espectrómetro es capaz de adquirir espectros entre 256 nm y 1100 nm con una resolución de 0.5 nm. Se colocó un filtro paso alto con una frecuencia de corte de 450 nm después del objetivo para evitar la saturación del espectrómetro que hubiera podido resultar en la avería del instrumento. Finalmente, el espectro de PL capturado mediante fue registrado por un programa informático de control que se ejecutó en un ordenador personal.

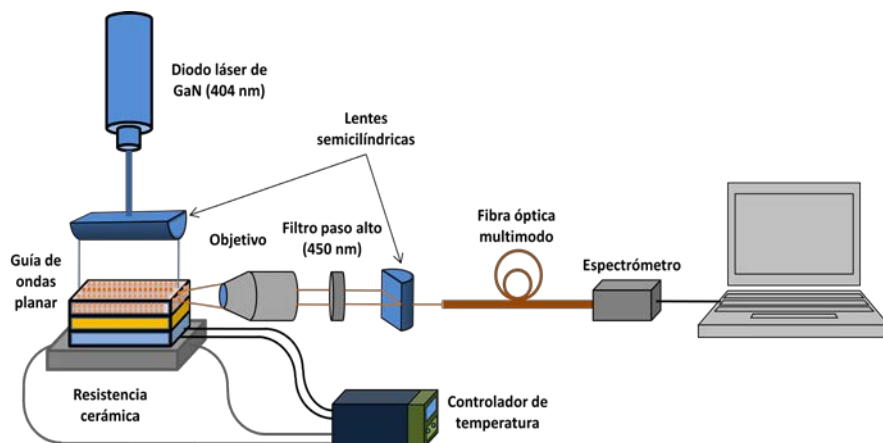
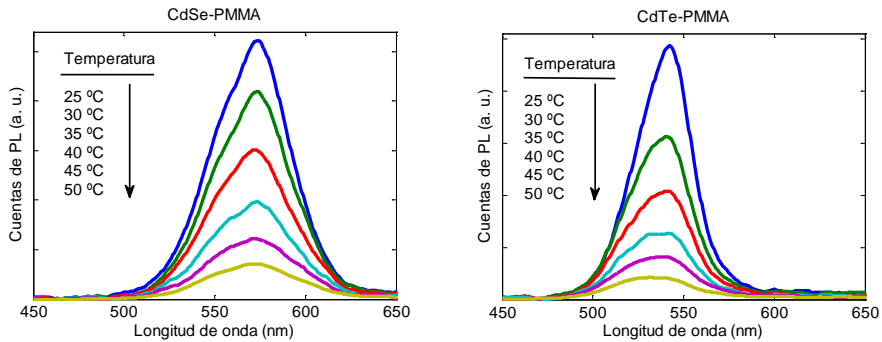


Figura 5.4. Esquema del montaje experimental llevado a cabo para las medidas de temperatura.

## 5.4. Resultados

Como primer paso, se colocaron las guías de CdSe-PMMA y CdTe-PMMA encima de la resistencia cerámica y se tomó un espectro de PL de referencia a temperatura ambiente (alrededor de 25 °C). El espectro de PL guiada presenta algunas diferencias comparado con el espectro de PL del nano-composite debido al efecto de guiado a través de las guías. La luz que se propaga en las guías puede experimentar un fenómeno de reabsorción, resultando en un desplazamiento hacia longitudes de onda inferiores y en un ensanchamiento del espectro de PL guiada [Suárez11]. En la guía de CdSe-PMMA se midió un desplazamiento del pico de PL de 30 nm hacia longitudes de onda inferiores y un FWHM de 52 nm. En la guía de CdTe-PMMA, el espectro de PL guiada está centrado en 540 nm y tiene un FWHM de 38 nm.

Posteriormente, las guías se colocaron encima de la resistencia cerámica y se calentaron en pasos de 5 °C hasta una temperatura máxima de 50 °C. En la Figura 5.5 (izquierda) se muestran los espectros de PL de la guía de CdSe-PMMA para cada temperatura objetivo.

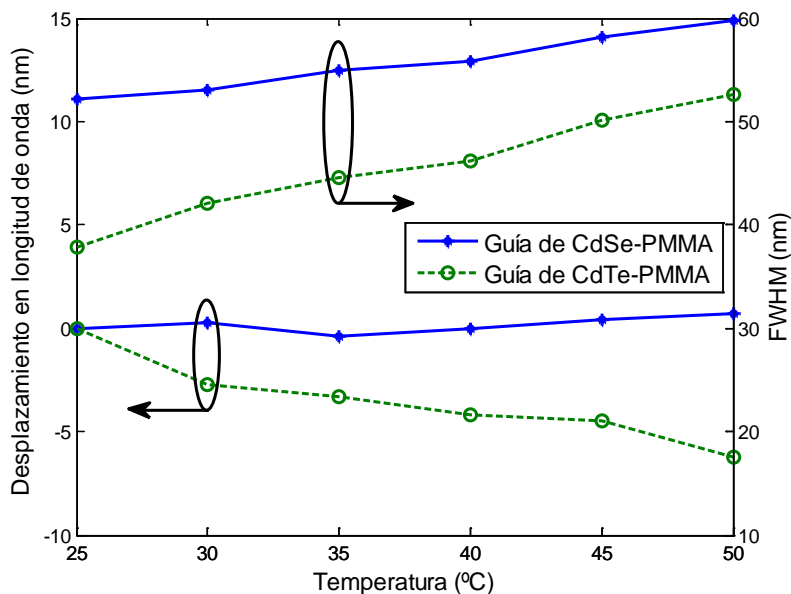


**Figura 5.5. Espectros de PL capturados en las guías de CdSe-PMMA (izquierda) y CdTe-PMMA (derecha) para cada temperatura objetivo.**

Como se puede observar, la intensidad de PL decrece fuertemente con el aumento de temperatura de la guía. No hay un desplazamiento en longitud de onda apreciable del espectro de PL, aunque se observa un claro ensanchamiento de 7.6 nm desde 25 °C hasta 50 °C, como se muestra en la Figura 5.6. La guía de CdTe-PMMA se colocó encima de la resistencia cerámica de igual modo que la guía anterior. En esta guía también se observa una fuerte disminución de la intensidad de la PL cuando se calienta de 25 °C a 50 °C, como se observa en la Figura 5.5 (derecha). Sin embargo, el espectro de PL de la guía de CdTe-PMMA experimenta no solo un ensanchamiento de 14.9 nm sino también un desplazamiento del espectro de 6.2 nm hacia longitudes de onda menores, lo que supone una tasa de desplazamiento de  $-0.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . Respecto del FWHM del espectro de PL, ambas guías exhiben un ensanchamiento, siendo las tasas de ensanchamiento de  $0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  y  $0.6 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  para las guías de CdSe-PMMA y CdTe-PMMA respectivamente. Ya que los QD coloidales muestran típicamente un suave desplazamiento de longitud de onda hacia longitudes de onda mayores con el incremento de la temperatura, la PL medida entre 25 °C y 50 °C puede ser atribuida principalmente a las variaciones con la temperatura de las propiedades ópticas (índice de refracción) y morfológicas (rugosidad de la lámina) de la matriz de PMMA [Ma02].

Aunque el rango de temperatura estudiado está lejos de la temperatura de transición vítrea del PMMA (alrededor de 105 °C), el calentamiento puede provocar la migración de las nano-partículas o incluso la modificación de la superficie de los QD, resultando en una disminución de la intensidad de PL. De hecho, se ha demostrado previamente la disminución de la PL en nano-composites de CdSe-PMMA [Yu10], [Chi08] y de poliestireno con QD de CdSe/ZnS [Valerini05] con el calentamiento. Este comportamiento se puede explicar con la tensión inducida en los QD debido a la expansión térmica de las cadenas del polímero. De hecho, en estos trabajos la disminución de la PL viene acompañada de un aumento del FWHM y de un desplazamiento en longitud de onda del pico de emisión hacia longitudes de onda mayores. En este caso, la guía de CdSe-PMMA no sufre ningún desplazamiento, mientras que la guía de CdTe-PMMA experimenta un desplazamiento hacia longitudes de onda menores. Sin embargo, en este caso la PL guiada está también influenciada por las propiedades de guiado (grosor, índice de

refracción, pérdidas, etc.). El índice de refracción de los polímeros decrece con la temperatura a una tasa de  $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  [Ma02], [Yu10], por lo que cuando se calienta la guía, es de esperar que los modos de longitud de onda mayores estén al corte, propiciado un desplazamiento del espectro hacia longitudes de onda menores. Además, ya que una guía de ondas puede propagar una mayor cantidad de modos a longitudes de onda menores, es razonable que este efecto sea más fuerte en la guía de CdTe-PMMA.



**Figura 5.6.** Dependencia con la temperatura del desplazamiento en longitud de onda y del FWHM del espectro de PL.

La figura 5.7 muestra los datos experimentales de la intensidad de pico de la PL respecto de la temperatura para ambas guías de CdSe-PMMA y CdTe-PMMA. Se han aplicado ajustes cuadráticos de los datos, obteniendo las expresiones polinomiales de  $\text{PL}(\%) = 0.058 \cdot T(^{\circ}\text{C})^2 - 7.87 \cdot T(^{\circ}\text{C}) + 260.33$  para la guía de CdSe-PMMA y  $\text{PL}(\%) = 0.13 \cdot T(^{\circ}\text{C})^2 - 13.18 \cdot T(^{\circ}\text{C}) + 349.53$  para la guía de CdTe-PMMA. Estos coeficientes polinomiales plantean una mayor sensibilidad con la temperatura de la guía de CdTe-PMMA. Los coeficientes de correlación obtenidos son 0.9978 para la guía de CdSe-PMMA y 0.9973 para la guía de CdTe-PMMA, demostrando un excelente ajuste de los datos experimentales.



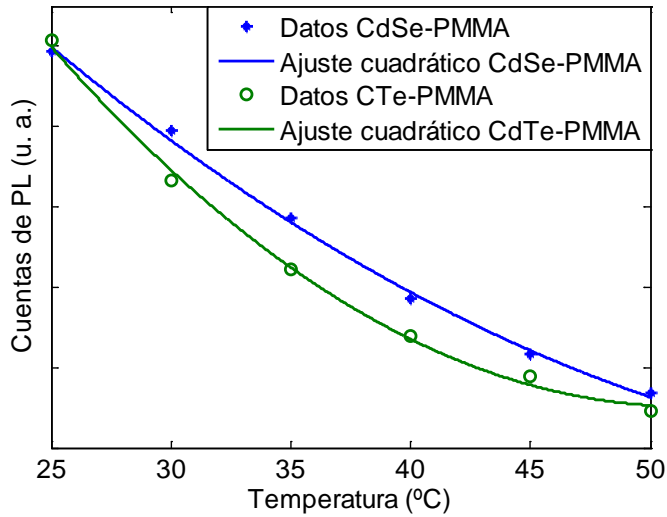


Figura 5.7. Datos experimentales y ajuste cuadrático para las guías de CdSe-PMMA y CdTe-PMMA.

## 5.5. Conclusiones

En este capítulo se ha demostrado la viabilidad de un sensor de temperatura basado en guías de onda hechas de un nano-composite. Los recientes avances en la fabricación de QD coloidales hacen posible la integración fotónica de estas nano-estructuras en materiales de polímero. Al variar el entorno desde la solución coloidal hasta la matriz de polímero, el espectro de PL se vuelve dependiente con la temperatura debido a los efectos de guiado y reabsorción de la luz viajando a través de las guías de onda.

Se han caracterizado unos sensores basados en QD de CdSe y CdTe incorporados en PMMA. Las guías se han calentado desde 25 °C hasta 50 °C y la caracterización en temperatura de la PL guiada muestra una disminución en su intensidad con una dependencia cuadrática con la temperatura. Es interesante apuntar que la guía de CdTe presenta mayor sensibilidad y además el espectro de PL se desplaza en longitud de onda a razón de  $-0.25 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ , mientras que permanece inalterado en la guía de CdSe-PMMA. La posibilidad de multiplexado en longitud de onda que ofrece este tipo de sensores integrados permite su utilización en un gran número de aplicaciones para la medida de temperatura.

## 5.6. Referencias

- [Alivisatos04]: P. Alivisatos, "The use of nanocrystals in biological detection", *Nature Biotechnology*, Vol. 22, pp. 47-52, 2004.
- [Chan02]: W. C. Chan, D. J. Maxwell, X. Gao, R. E. Bailey, M. Han, and S. Nie, "Luminescent quantum dots for multiplexed biological detection and imaging", *Curr. Opin. Biotechnol.*, Vol. 13, pp. 40-46, 2002.
- [Chen02]: Y. Chen and Z. Rosenzweig, "Luminescent CdS quantum dots as selective ion probes", *Anal. Chem.*, Vol. 74, pp. 5132-5138, 2002.
- [Chi08]: T. T. K. Chi, U. T. D. Thuy, N. Q. Liem, M. H. Nam, and D. X. Thanh, "Temperature-dependent photoluminescence and absorption of CdSe quantum dots embedded in PMMA", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 52, pp. 1510-1513, 2008.
- [Demchenko11]: A. P. Demchenko, "Advanced fluorescence reporters in chemistry and biology III: Applications in sensing and imaging", Ed. Springer, Vol. 10, 2011.
- [Goldman04]: E. R. Goldman, A. R. Clapp, G. P. Anderson, H. T. Uyeda, J. M. Mauro, I. L. Medintz, and H. Mattoussi, "Multiplexed toxin analysis using four colors of quantum dot fluororeagents", *Anal. Chem.*, Vol. 76, pp. 684-688, 2004.
- [Jorge05]: P. A. S. Jorge, M. Mayeh, R. Benrashid, P. Caldas, J. L. Santos, and F. Farahi, "Self-referenced intensity based optical fiber temperature probes for luminescent chemical sensors using quantum dots", *Proc. SPIE* 5855, Vol. 42, 2005.
- [Klimov03]: V. I. Klimov, "Nanocrystal quantum dots: from fundamental photophysics to multicolor lasing", *Los Alamos Science*, No. 28, 2003.
- [Ma02]: H. Ma, A. K. Y. Jen, and L. R. Dalton, "Polymer-based optical waveguides: materials, processing and devices", *Advanced Materials*, Vol. 14, pp. 1339-1365, 2002.
- [Mello09]: C. de Mello and R. Koole, "Size dependence of the spontaneous emission rate and absorption cross section of CdSe and CdTe quantum dots", *J. Phys. Chem. C*, Vol. 113, pp. 6511-6520, March 2009.
- [Riegler04]: J. Riegler and T. Nann, "Application of luminescent nanocrystals as labels for biological molecules", *Anal. Bioanal. Chem.*, Vol. 379, pp. 913-919, 2004.
- [S-G]: [www.solgel.com](http://www.solgel.com)
- [Shi08]: G. H. Shi, Z. B. Shang, Y. Wang, W. J. Jin, and T. C. Zhang, "Fluorescence quenching of CdSe quantum dots by nitroaromatic explosives and their relative compounds", *Spectrochimica Acta A*, Vol. 70, No. 2, pp. 247-252, 2008.
- [Smith04]: A. M. Smith and S. Nie, "Chemical analysis and cellular imaging with quantum dots", *Analyst*, Vol. 129, pp. 672-677, 2004.
- [Song07]: H. Song and S. Lee, "Photoluminescence (CdSe)ZnS quantum dot-polymethylmethacrylate polymer composite thin films in the visible spectral range", *Nanotechnology*, Vol. 18, 055402 (6pp), 2007.

[Suárez11]: I. Suárez, H. Gordillo, R. Abargues, S. Albert, J. Martínez-Pastor, "Photoluminescence waveguiding in CdSe and CdTe QDs-PMMA nanocomposite films", *Nanotechnology*, Vol. 22, 435202 (8 pp.), (2011).

[Tomczak09]: N. Tomczak, D. Janczeuski, M. Han, and J. Vancso, "Designer polymer-quantum dot architectures", *Progress in Polymer Science*, Vol. 34, No. 5, pp. 393-430, 2009.

[Valerini05]: D. Valerini, A. Cretí, and M. Lomascolo, "Temperature dependence of the photoluminescence properties of colloidal CdSe/ZnS core/shell quantum dots embedded in a polystyrene matrix", *Physical Review B*, Vol. 71, 235409 (6pp), 2005.

[Walker03]: G. W. Walker, V. C. Sundar, C. M. Rudzinski, A. W. Wun, M. G. Bawendi, and G. Nocera, "Quantum-dot optical temperature probes", *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 17, pp. 3555-3557, 2003.

[Yu02]: W. W. Yu, X. Peng, "Formation of high-quality CdS and other II-VI semiconductor nanocrystals in noncoordinating solvents: tunable reactivity of monomers", *Angewandte Chemie International Edition*, Volume 41, Issue 13, pp. 2368-2371, (2002).

[Yu03]: W. W. Yu, L. Qu, W. Guo and X. Peng, "Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe and CdS nanocrystals", *Chem. Mater.*, Volume 15, pp. 2854-2860, April 2003.

[Yu10]: H. C. Y. Yu, S. G. Leon-Saval, A. Argyros, and G. B. Warton, "Temperature effects of emission of quantum dots embedded in polymethylmethacrylate", *Applied Optics*, Vol. 49, pp. 2749-2752, 2010.



# Capítulo 6

## Conclusiones y líneas futuras

### 6.1. Conclusiones

En esta tesis se han desarrollado y aplicado sensores ópticos para la tarea de monitorización estructural en el ámbito de la ingeniería civil. De este modo, se han presentado varios sensores de deformación, temperatura y pH capaces de tomar medidas en tiempo real para conocer el estado de una estructura o de los elementos de la misma, aportando grandes ventajas respecto de los sensores eléctricos tradicionales. Además, se ha propuesto un sistema de interrogación novedoso basado en correlación de pulsos para la medida integrada de deformación. También se ha realizado el desarrollo de un sistema de monitorización autónomo tanto para alimentación como para tareas de guardado de datos.

En el capítulo 1 se ha realizado una introducción del estado del arte actual en sensores ópticos, evidenciando la gran actividad investigadora y comercial en este campo. Para ello no solo se ha hecho un análisis de las más recientes investigaciones llevadas a cabo por universidades e institutos de investigación, sino que también se han analizado los diferentes productos comerciales desarrollados por empresas especializadas en el sector de los sensores ópticos.

En el capítulo 2 se ha presentado un sistema de interrogación de sensores ópticos mediante la técnica de correlación de pulsos ópticos. Este esquema de interrogación permite la combinación de dos tipos de sensado como son el puntual y distribuido, considerándose por tanto a este sistema de interrogación como un sistema híbrido. De este modo, se ha explicado el principio básico de funcionamiento, haciendo hincapié en cada una de las etapas del sistema y en la función que desempeña cada uno de los elementos. También se han analizado las variaciones de los parámetros del sistema y su influencia en el rendimiento del mismo. Se ha introducido la necesidad de separación en regiones de la zona a monitorizar, presentando dos posibles alternativas para llevar a cabo esta tarea: mediante reflectores selectivos en longitud de onda (WSR) y mediante reflectores parciales de intensidad (IPR). Se han llevado a cabo ensayos para la medida de deformación mediante cada una de estas técnicas, comprobando su funcionamiento lineal y la falta de interferencia entre las medidas de diferentes regiones. Finalmente se ha realizado una comparación de ambas tecnologías, llegando a la conclusión de que la separación de regiones mediante WSR tiene las ventajas de alta sensibilidad y una mayor velocidad en la medida, mientras que la técnica mediante IPR tiene las ventajas de independencia a la polarización y coste potencial menor.

En el capítulo 3 se han presentado los sensores de deformación y temperatura basados en FBG creados en el Grupo de Comunicaciones Ópticas del iTEAM. Se ha analizado el funcionamiento de una FBG como sensor a través de las ecuaciones que relacionan las magnitudes de deformación y temperatura con la variación en longitud de onda de su resonancia. Asimismo, se ha presentado el desarrollo de las ecuaciones de compensación térmica de los sensores de deformación basados en FBG. Posteriormente se ha presentado el software que se ha desarrollado para la captura de datos en tiempo real con la funcionalidad de aviso por alarmas al sobrepasar un umbral. También se ha desarrollado con éxito un sistema de alimentación fotovoltaica para funcionamiento autónomo en entornos con dificultad para el suministro de energía eléctrica para los equipos de medida. Los sensores de deformación y temperatura basados en FBG han sido aplicados con éxito a la construcción de una estructura real como ha sido un puente cerca de Bilbao construido mediante la técnica de lanzamientos por incrementos sucesivos en el que se ha monitorizado las deformaciones ocurridas durante las maniobras de lanzamiento del mismo. En la última parte del capítulo se ha abordado el problema de borrado de las FBG cuando están sometidas a altas temperaturas (por encima de 300 °C), y de cómo las FBG regeneradas (RFBG) superan esta limitación. Para demostrarlo, se han presentado los resultados de un ensayo llevado a cabo con sensores de temperatura embebidos en probetas de hormigón y sometidos a la acción del fuego durante 120 minutos.

En el capítulo 4 se han presentado dos sensores diferentes para el sensado de pH basado en fibra óptica y utilizando FBG. Uno de ellos hace uso de la medida de intensidad de la señal óptica y el otro está basado en las variaciones de las resonancias en una cavidad Fabry-Pérot. Se ha presentado un material denominado hidrogel, siendo éste un polímero capaz de modificar sus propiedades físicas (peso y volumen) ante cambios de pH externos. Se han estudiado 3 tipos de hidrogeles diferentes, seleccionando uno de ellos para utilizarlo en los sensores de fibra óptica con los que posteriormente se han realizado los ensayos. Se ha desarrollado un dispositivo para la medida de pH mediante la intensidad óptica que varía debido a la existencia de unas pérdidas por curvatura de una fibra óptica, habiéndose ideado un mecanismo de transducción para convertir las variaciones de volumen del hidrogel en curvatura de la fibra óptica. Se ha calibrado el funcionamiento del sensor y se ha ensayado satisfactoriamente en unas probetas de hormigón para monitorizar la evolución del pH durante las 24 primeras horas de fraguado del mismo. Por otro lado, también se ha presentado un sensor basado en una estructura denominada cavidad Fabry-Pérot a la que se le ha añadido un taper en fibra para modificar las características espectrales de dicha cavidad. Se ha explicado el proceso de fabricación de un taper en fibra y se han desarrollado las ecuaciones que describen el funcionamiento del sensor. Por último se ha ensayado este tipo de sensor en la medida de pH en disoluciones de diferente pH.

En el capítulo 5 se ha demostrado la viabilidad de un sensor de temperatura basado en guías de onda hechas de un nano-composite con la incorporación de puntos cuánticos coloidales para llevar a cabo la integración fotónica de estos sensores de temperatura en dispositivos optoelectrónicos. Se ha comprobado que el espectro de fotoluminiscencia se vuelve dependiente con la temperatura debido a los efectos de guiado y reabsorción de la luz viajando a través de las guías de onda. Se han caracterizado unos sensores basados en puntos cuánticos de CdSe y CdTe incorporados en PMMA. Las guías se han calentado desde 25 °C hasta 50 °C y la caracterización en temperatura de la PL guiada muestra una disminución en su intensidad con una dependencia cuadrática con la temperatura. Se ha descubierto que la guía de CdTe presenta una mayor sensibilidad a la temperatura y que además el espectro de fotoluminiscencia se desplaza en longitud de onda a razón de  $-0.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , mientras que permanece inalterado en la guía de CdSe-PMMA. Con estos resultados, se ha demostrado la posibilidad de multiplexado en longitud de onda que ofrece este tipo de sensores integrados que permite su utilización en un gran número de aplicaciones para la medida de temperatura.

## 6.2. Líneas futuras

Habiéndose desarrollado y aplicado sensores ópticos para la medida de magnitudes como deformación, temperatura y pH de forma separada, se propone como objetivo para el futuro el desarrollo de un sensor multiparamétrico que sea capaz de medir todas estas magnitudes de forma simultánea en un solo dispositivo. Puesto que la monitorización de la salud estructural consiste en la medida de varias magnitudes

para la identificación de diversos fenómenos que pueden degradar la estructura, resulta sumamente interesante el poder reducir la cantidad de elementos sensores (así como longitud de fibra óptica) que son necesarios para el correcto diagnóstico de problemas que puedan surgir.

Ya se han aplicado con éxito los sensores basados en FBG para la medida de deformación y temperatura en una estructura real, aunque aún no se ha realizado lo mismo con el sistema de monitorización basado en correlación de pulsos. Puesto que los ensayos llevados a cabo con este sistema se han restringido solo al ámbito del laboratorio, se postula como muy interesante la aplicación del sistema a una construcción real.

En cuanto a los sensores de pH, sería interesante realizar ensayos a muy largo plazo, de meses o incluso años, para la medida de la corrosión real en estructuras de hormigón armado. Puesto que este es un fenómeno muy lento y de larga duración, haría falta llevar a cabo una monitorización continuada en el tiempo para el seguimiento del nivel de pH existente en el interior del hormigón. Puesto que el sensor de pH basado en cavidad Fabry-Pérot no ha conseguido tener la sensibilidad esperada, habría que llevar a cabo un rediseño del mismo, ya sea mejorando la técnica de creación de tapers para conseguir un diámetro de fibra óptica más reducido si se quiere medir variaciones de FSR, o incluso desarrollar un sistema de seguimiento individualizado de cada resonancia si se opta por medir el desplazamiento en longitud de onda de estas resonancias.



# Anexo 1

## Publicaciones científicas del autor

### A1.1. Publicaciones científicas en revistas

- **A. Bueno**, K. Nonaka, S. Sales, “Hybrid Interrogation System for Distributed Fiber Strain Sensors and Point Temperature Sensors Based on Pulse Correlation and FBGs”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 21, No. 22, pp. 1671-1673, 2009.
- **A. Bueno**, B. Torres, D. Barrera, P. A. Calderón, J. M. Lloris, M. J. López, S. Sales, “Optical fiber sensors embedded in concrete for measurement of temperature in a real fire test”, *Optical Engineering*, Vol. 50, No. 12, pp. 124404-124404-7, 2011.

- **A. Bueno**, I. Suárez, R. Abargues, S. Sales, J. P. M. Pastor, "Temperature sensor based on colloidal Quantum Dots-PMMA nanocomposite waveguides", *IEEE Sensors Journal*, artículo enviado.
- X. Xu, **A. Bueno**, K. Nonaka, S. Sales, "Fiber strain measurement for wide región quasidistributed sensing by optical correlation sensor with region separation techniques", *Journal of Sensors*, Vol. 2010, Article ID 839803, 10 pages, 2010.

## **A1.2. Contribuciones científicas en congresos**

- **A. Bueno**, K. Nonaka, S.Sales, "Novel system to interrogate distributed fiber strain sensors and point temperature sensors based on pulse correlation and FBGs", *20<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-20), Proceedings of SPIE*, Vol. 7503, 75032L, Edinburgh (Scotland), 2009.
- **A. Bueno**, B. Torres, D. Barrera, P. Calderon, S. Sales, "Monitoring of a steel incrementally launched bridge construction with strain and temperature FBGs sensors", *SPIE Photonics Europe, Proceedings of SPIE*, Vol. 7726, 772620, Brussels (Belgium), 2010.
- **A. Bueno**, B. Torres, D. Barrera, P. Calderón, J. M. Lloris, M. J. López and S. Sales, "Fiber Bragg grating sensors embedded in concrete samples for a normalized fire test", *21<sup>st</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-21), Proceedings of SPIE*, Vol. 7753, 77538R, Ottawa (Canada), 2011.
- **A. Bueno**, C. Gamón, P. Díaz, J. M. Lloris, D. Barrera, M. J. López, S. Sales, "Sensor de pH en fibra óptica basado en hidrogel", *VII Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL'11*, Sesión 1, S1-48, Santander (Spain), 2011.
- R. Ferrando, **A. Bueno**, C. Gamón, D. Barrera, P. Díaz, J. M. Lloris, M. J. López, S. Sales, "Sensor de fibra óptica basado en un hidrogel sensible al pH", *XXV Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, Bilbao (Spain), 2010.
- B. Torres, I. Payá-Zaforteza, **A. Bueno**, S. Sales, J. M. Adam, P. A. Calderón, "Early age concrete temperature and shrinkage monitoring by using Fiber Bragg Gratings", *XXXVII IAHS World Congress on Housing Science, Design, Technology, Refurbishment and Management of Buildings*, pp. 9-16, Santander (Spain), 2010.
- D. Barrera, V. Finazzi, G. Coviello, **A. Bueno**, S. Sales, V. Pruneri, "Chemical composition gratings in Germanium doped and Boron-Germanium co-doped

fibers", *SPIE Photonics Europe, Proceedings of SPIE*, Vol. 7726, 772607, Brussels (Belgium), 2010.

- D. Barrera, V. Finazzi, G. Coviello, **A. Bueno**, S. Sales, V. Pruneri, "Wavelength encoded fiber sensor for extreme temperature range", *4th European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS'04), Proceedings of SPIE*, Vol. 7653, 76530E, Oporto (Portugal), 2010.
- B. Torres, I. J. Payá, **A. Bueno**, P. A. Calderón, S. Sales, R. López-Tola, "Aplicaciones de los sensores de fibra óptica desarrollados por la Universidad Politécnica de Valencia (U.P.V.) para la medida de deformaciones y temperaturas en estructuras", *V Congreso de ACHE. Congreso Internacional de Estructuras*, pp. 1-10, Barcelona (Spain), 2011.

### **A1.3. Participación en proyectos de investigación**

- **Proyecto DONAS** (Desarrollo de Nuevos Dispositivos y Aplicaciones Basadas en FBGs y SOAs):
  - o **Entidad financiadora:** Ministerio de Educación y Ciencia.
  - o **Duración:** 2007 - 2010.
  - o **Importe:** 261.602 Euros.
- **Proyecto SOPROMAC** (Desarrollo de Sensores Avanzados de Fibra Óptica para la Determinación de Propiedades de Materiales y Salud Estructural):
  - o **Entidad financiadora:** Ministerio de Fomento.
  - o **Duración:** 2009 - 2011.
  - o **Importe:** 152.890 Euros.
- **Convenio de colaboración con SACYR** (Sensores Ópticos Aplicados a la Instrumentación de Estructuras para Conocimiento de Su Comportamiento en Tiempo Real):
  - o **Empresa financiadora:** Sacyr-Vallehermoso.
  - o **Duración:** 2008 - 2011.
  - o **Importe:** 126.358 Euros.



# Hybrid Interrogation System for Distributed Fiber Strain Sensors and Point Temperature Sensors Based on Pulse Correlation and FBGs

Antonio Bueno, Koji Nonaka and Salvador Sales, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**— A hybrid interrogation scheme for distributed strain sensors and point temperature sensors is proposed and its feasibility is demonstrated. It exploits the advantages of distributed sensors and point sensors simultaneously. The proposed interrogation scheme uses a wavelength tunable pulse source and wavelength dependent reflectors for region selective sensing. Experimental results confirm its linear response and a resolution of 0.02% of the total dynamic range, that in our experiment it is over 2000 microstrains for sensing regions of around 0.5 meter length. The stability of the measurements is over 99.8%. Finally, the high input power from the signal source and the limited losses from the reflectors allow the usage of a high number of sensors in a fiber.

**Index Terms**— optical fiber sensors, strain and temperature sensors, pulse correlation, FBG.

## I. INTRODUCTION

The monitoring of the possible damage on the civil structures is becoming a growing research field for civil engineers. Optical fiber sensors have showed a good performance for the health monitoring of these structures. A quite number of sensing techniques have been proposed. These techniques can be sorted into two types depending on the way to measure the physical magnitude: the point and the distributed sensing techniques. The point sensing technique consists in the point measurement of a physical magnitude in a large number of locations with a large number of sensors, whereas distributed sensing technique consists in the measurement along a fibre link that can be as long as several meters or more. The most popular point sensing techniques are the Fiber Bragg Gratings (FBGs) [1] and the Extrinsic Fabry Perot interferometers (EFPI) [2]. Their main drawback is the missing of the degradation measurement between each sensor. On the other hand, the most common distributed sensing techniques are based on Stimulated Brillouin Scattering (SBS) [3], Stimulated Raman Scattering (SRS) [4], Optical Time Domain Reflectometer [5] and

---

interferometers [6]. These techniques have the advantages of fewer requirements for fiber preparation, a higher range in the dynamic detectable strain and the possibility of sense in any section of the fiber. However, they require more complex information handling, and they have slower time response and typically higher input optical power requirement.

In this paper, a simple technique that combines the advantages of the point and the distributed sensing techniques using the correlation of a pulse train and Wavelength Selective Reflectors (WSRs) is presented. Distributed strain measurements are obtained in multiple regions by using standard fiber links. Fiber Bragg Gratings (FBGs) are used as WSRs. They permit the separation of the sensing strain regions and also provide an effective sensor to measure the temperature in the desired points. Besides, this novel technique does not require expensive components and a high performance has been obtained in terms of: signal-to-noise ratio, linearity, resolution and stability.

## II. PRINCIPLE OF OPERATION

The interrogation system scheme for point temperature sensors and multi-region distributed strain measurement based on pulse correlation technique [7] is shown in Fig. 1. The light source is a wavelength tunable laser. It generates a pulse train. The pulse repetition rate is determined by the modulation frequency. The pulse train is coupled into two different ports named “*reference port*” and “*measuring port*”. In the measuring port, the pulses path through an optical circulator and then enter in a cascade of Strain Sensing Regions (SSRs) separated by the Wavelength Selective Reflectors (WSRs). The SSRs are fixed along the structure to monitor the strain changes induced in the structure. The WSRs are released free from the fixed structure. The WSRs change their resonance following the temperature variations acting as a point temperature sensor [1]. The scanning of the wavelength of the pulse source allows to interrogate the temperature point sensors, but also to monitor the different SSRs. In essence, if the pulse is reflected in the WSR1, the pulse round-trip is until the region SSR1 and it only contains information about the strain changes in this region, whereas the reflected pulse in the WSR 2 crosses both SSR1 and SSR2 regions. Using the reflected signals from WSR1 and WSR2, the information of the strain changes in SSR 2 can be retrieved. This scheme can be easily upgraded up to the SSRn region.

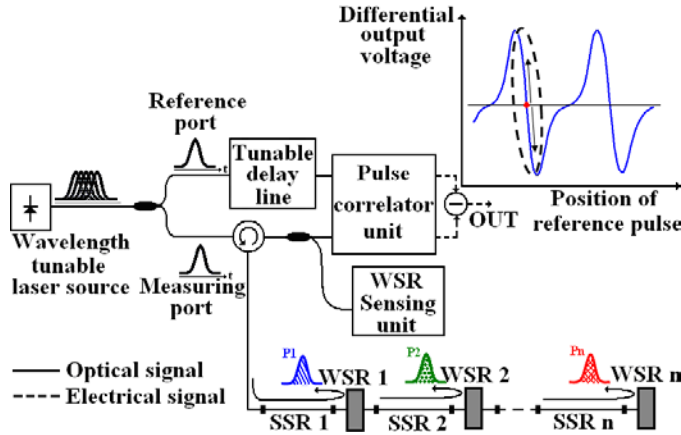


Fig. 1: Schematic of point temperature and distributed strain measurement based on pulse correlation and differential detection technique.

The reflected pulses return to reach one input port of the pulse correlator unit. The other input of the correlator unit is fed with the pulses that traverse the reference port. The reference pulses and the measuring pulses arrive at different time position due to the different lengths of the optical paths. A tunable delay line is placed in the reference arm to allow a partial overlap of both train pulses. The tunability range of the tunable delay line has to be half of the inverse of the frequency repetition rate. If the strain in a sensing region is changed, the optical path in the measuring branch produces a time drift between reference and measuring pulses trains and there is a change in the overlapped energy between both train pulses. This change can be monitored by the optical pulse correlation unit [7]. Differential detection technique is used after the pulse correlation unit. The differential detection technique has been chosen because it provides several advantages: it indicates not only the time drift value, but also the drift direction to distinguish compression and elongation. Its resolution is nearly double that of a single channel detection. The differential detection suppresses the impact of light source average power fluctuations. Two Second Harmonic (SH) crystals and two low cost and narrow bandwidth avalanche photodiodes are employed in the pulse correlation unit to efficiently convert the pulses time delays in voltage changes [7]. Thus, low cost electronics can be employed in the receiver unit.

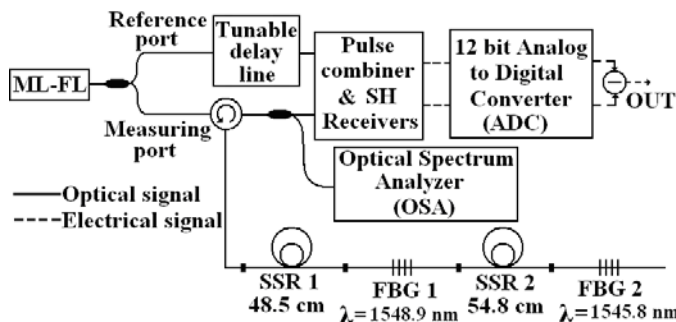


Fig. 2: Experimental setup of pulse correlation and differential technique with wavelength sensing region separation

The typical differential output voltage relationship is shown in an inset graph in Fig. 1. It has the same rate of the pulse train from the laser source. The most important area of the differential output voltage curve, which is used for sensing, is highlighted inside a dashed oval (Fig. 1). The dot indicates the central position (also known as decision point) in order to perform highest excursion and to detect fiber compression and elongation. It is very important to mention that the output relationship is linear in this region and it is very useful for sensing applications. Each SSR is adjusted to have its initial value at the central position. Then, any strain applied is transformed in a change of the output voltage value.

### III. EXPERIMENTAL RESULTS

The experimental setup is shown in Fig.2. A Mode-Locked Fiber Laser (ML-FL) has been used as a laser source. The laser source is wavelength tunable and its pulse width can be adjusted between 10 ps and 20 ps. In the experimental setup, it has been used a pulse width of 12.9 ps, 3.4 dBm of output power and a frequency of 9.956104 GHz, that implies a 100.4 picosecond pulse repetition rate. To divide the train pulses into reference and measuring ports, a 90/10 ratio optical coupler has been employed.

In the reference port, a delay line that can be manually adjusted has been placed. On the other port, an optical circulator is used to route the pulses to the sensing region and to the correlation unit. Two Fiber Bragg Gratings (FBGs) have been used as demonstration of WSRs. FBGs central wavelengths are 1548.86 nm for FBG 1 and 1545.81 nm for FBG 2, with 0.26 nm of Full Width at Half Maximum (FWHM) and 80 % of reflectivity in both FBGs. The SSRs have been implemented with two standard single mode fibers of 48.5 cm and 54.8 cm length, respectively. The pulse correlation unit and the dual SH Receivers (SHR) have been connected to a 12-bit Analog to Digital Converter (ADC) to obtain the voltage values of the two single channels. The 12-bit ADC provides a resolution of 0.02% of the total dynamic range. Finally, the output differential signal of these channels is stored in a Personal Computer.

The temperature variations have been sensed by the FBGs using an Optical Spectrum Analyzer (OSA). The OSA can be replaced by a power meter. It only requires that the scanning of the tunable laser source and the power meter have to be synchronised. The interrogation system has been characterized by checking its linearity, stability and resolution. In the first experiment, the laser source has been tuned at 1545.8 nm.



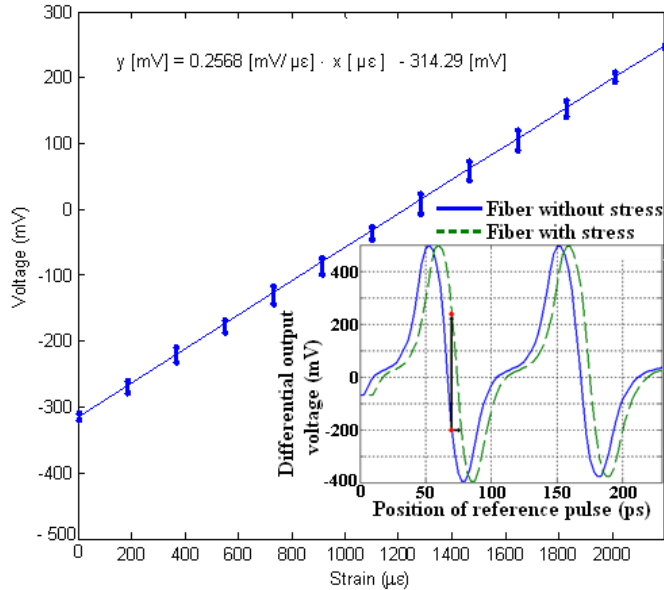


Fig. 3: Differential output voltage when stress is applied to SSR2 with laser source tuned at 1545.8 nm. Subplot shows differential curves of relaxed fiber and 1,2 mm stressed fiber so that time shift is observed.

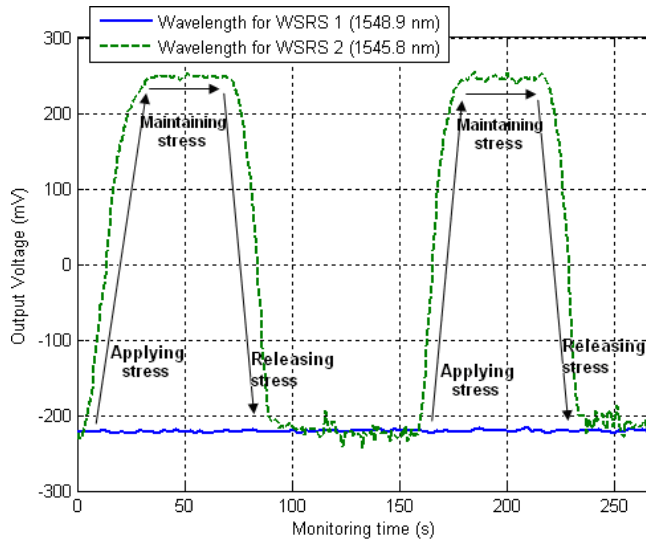


Fig. 4: Output differential voltage with stress applied to the SSR2 using different wavelengths

Then, some strain has been applied to SSR2 in 0.1 mm steps (182.5 microstrains for a fiber of 54.8 centimeters length) and the differential output voltage values have been obtained. To calculate the strain applied, the first step is to adjust the decision point when SSR2 is relaxed (red point in solid blue line of Fig. 1). Then, any change in the applied strain (elongation or compression) is converted automatically in a change of the output differential voltage. The results are shown in Fig. 3. It can be seen that the sensor has a linear response. Besides, the stability in the measurements is quite high,

fluctuations of less than 0.2% have been observed in the worst case. In the subplot, it can be observed the time shift in the differential output curve due to the stress applied to the SSR2 region (e.g. 1,2 mm of elongation). When the SSR2 is released, the differential output curve returns to its initial position.

To demonstrate the absence of crosstalk between the two strain sensing regions, the laser source has been tuned to 1545.8 nm to select WSR 2. Then, a stress has been applied in the SSR2. The dashed line of Fig. 4 shows the changes in the output voltage. Later, the laser has been tuned to 1548.9 nm to select WSRS 1 and a similar stress has been applied to the same sensing region (SSR2). No change in the differential output voltage has been detected (solid line) showing the absence of crosstalk.

## IV. CONCLUSIONS

A hybrid interrogation system of wide region distributed and selected points monitoring has been presented and demonstrated its feasibility. This interrogation system can be used to sense distributed sensors and point sensors simultaneously using a single wavelength tunable light source. This technique is quite robust because the measurements are based on wavelength shifts and time drifts between the train pulses. The system has the ability to interrogate different distributed sensors at specific regions using wavelength selective reflectors. The number of sensors that can be allocated in one fiber is very high because the proposed system uses a tunable light source with FBGs which have very few losses.

Experimental results confirm the linear response of the proposed technique. The resolution obtained is 0.02% of the total dynamic range, that in our experiment it is over 2000 microstrains for sensing regions of around 0.5 meter length. The stability of the measurements is over 99.8%. The maximum strain range that can be observed is limited by the repetition pulse rate and the pulse width. It can be designed to detect a maximum time shift of half of the pulse repetition period.

## REFERENCES

- [1] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, "Fiber grating sensors", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [2] V. Bhatia *et al.* "Recent development in optical-fiber based extrinsic Fabry-Perot interferometric strain sensing technology", *Smart Mater. Struct.*, no. 4, pp. 246-251, 1995.
- [3] T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda, "A technique to measure distributed strain in optical fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 2, no. 5, pp. 352-354, May. 1990.
- [4] D.G. Lancaster, J.M. Dawes, "A pulsed laser source using stimulated Raman scattering and difference frequency mixing: remote sensing of methane in air", *Optics Communications*, no. 120, pp. 307-310, 1995.
- [5] Z. Zhang, X. Bao, "Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of Polarization-OTDR system", *Optics Express*, vol. 16, no. 14, 2008.
- [6] M. Pozzi, D. Zonta, H. Wu, D. Inaudi, "Development and laboratory validation of in-line multiplexed low-coherence interferometric sensors", *Optical Fiber Technology*, no. 14, pp. 281-293, 2008.
- [7] H. B. Song, T. Suzuki, M. Sako, K. Nonaka, "High time resolution fiber optic sensing system based on correlation and differential technique", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 631-634, 2006.

# Optical fiber sensors embedded in concrete for measurement of temperature in a real fire test

Antonio Bueno<sup>1,\*</sup>, Benjamín Torres<sup>2</sup>, David Barrera<sup>1</sup>, Pedro Antonio Calderón<sup>2</sup>,  
José Manuel Lloris<sup>3</sup>, María José López<sup>3</sup>, Salvador Sales<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*iTEAM Research Institute, Optical and Quantum Communications Group,  
Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.*

<sup>2</sup>*Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón ICITECH, Universidad Politécnica de  
Valencia, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, Spain*

<sup>3</sup>*Instituto Tecnológico de la Construcción AIDICO, Avda. Benjamin Franklin 17,  
46980, Paterna, Valencia, Spain.*

*\*Corresponding author: anbuemar@iteam.upv.es*

We present the results of a real fire test using optical fiber sensors embedded in concrete samples. The temperature curve used in this experiment is described in the Spanish/European standard UNE-EN 1363-1 temperature profile for normalized concrete resistance to real fire tests, reaching temperatures of more than 1000°C inside the fire chamber and up to 600°C inside the concrete samples. Three types of optical sensors have been embedded in concrete: 1) standard fiber Bragg gratings (FBG) inscribed in photosensitive germanium-boron codoped fiber, 2) regenerated FBG (RFBG) inscribed in germanium doped fiber and 3) RFBG inscribed in germanium-boron codoped fiber.

*Keywords: Optical fiber temperature sensor; high temperature; fiber Bragg grating; regenerated fiber Bragg grating; fire test.*

## 1. Introduction

The influence of fire on concrete structures has been reported in previous studies of structural damage because the strength of a concrete material decreases under the effect of high temperature [1, 2]. To determine the damage produced by a fire to a concrete structure, some sensor elements need to be installed on the surface or inside the structure. Traditionally, electrical sensors have been used to obtain physical measurements of the structures, but recently some optical fiber sensors have been developed. Optical fiber sensors have the advantage that can be embedded in the concrete structures due to their small size.

In recent years optical fiber sensors for multiple applications have been widely used in the civil engineering field. Compared to the electrical sensors, the optical sensors present several advantages such as smaller and lighter, immunity to electromagnetic interference (EMI), high temperature tolerance and resistance to harsh environments. In addition, optical technology allows many sensors to be multiplexed in a single optical fiber in order to create a quasi-distributed sensor system able to detect local damage.

In this test, two concrete samples were placed in a fire chamber to perform a real fire test using embedded optical fiber temperature sensors. A normalized UNE-EN 1363-1 fire temperature curve was programmed in to the fire chamber in order to obtain the heat transference inside the concrete samples. This real test is very helpful if the behavior of a concrete structure under fire is required, for example in a concrete tunnel, where the integrity of the structure has to be preserved in order to maintain the safety of the people inside the tunnel.

To date, previous publications concerning high temperature measurements in real structures using optical sensors have measured moderate high temperatures. In some works, embedded temperature sensors reached up to 150 °C inside concrete specimens [3, 4]. In another publication, external temperature sensors were employed to measure gas temperature, reaching a maximum temperature of 300 °C [5]. Higher temperatures were measured in the experiments carried out by Heiberg et al. [6], but in this case, embedding optical fiber Bragg grating sensors and thermocouples into aluminum alloys. To the best of our knowledge, this is the first experiment of a real test fire of concrete structures with embedded optical fiber Bragg grating sensors.

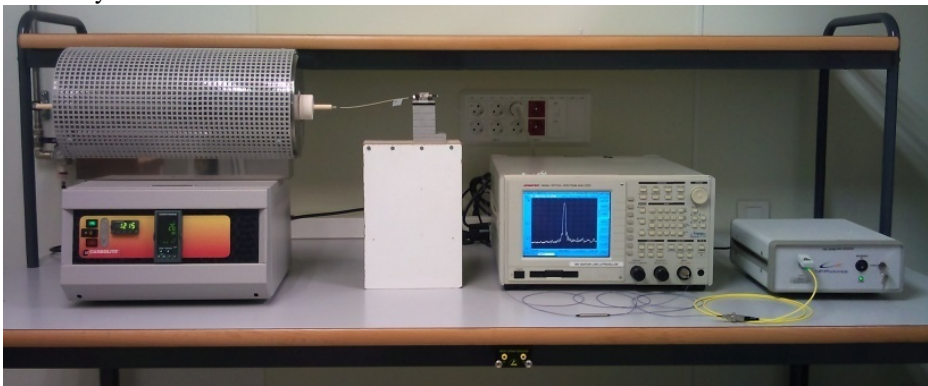
In the present test, maximum temperatures up to 600 °C inside the concrete beams are obtained corresponding to a chamber temperature close to 1100 °C. Furthermore, three different types of optical temperature sensors, that will be described in the next section, have been used in the test to compare their features at high temperature.

## **2. Sensors development**

All of the sensors used in this work are based on fiber Bragg gratings (FBG) [7]. The gratings were created through the phase mask method using an UV beam at 244 nm from a frequency-double Argon laser. Up to 4 different phase masks were used to create gratings of central Bragg wavelengths at around 1529.4 nm, 1534.2 nm, 1539 nm and 1543.7 nm. The lengths of the gratings were set to 2 cm with an apodized profile of the refractive index to decrease the secondary lobes of the reflection spectrum and to improve the response of the sensors.

Three different types of optical sensors based on FBGs have been developed. The first type is a standard FBG and the other two sensors have been created by specifically treating a FBG in a two steps process. The first step in this process consists in the loading of hydrogen into an optical fiber [8] with 25 bars pressure for 15 days at room temperature. This hydrogen loaded fiber is then exposed to UV light to create the FBG, achieving the formation of hydroxyl groups (OH) in the core of the fiber. The second step in the creation of this type of sensor is the thermal treatment, which consists of a temperature ramp until the FBG is erased, then a steady state for several minutes in order to regenerate the grating and finally a cool down. The thermal annealing of the optical fiber leads to the creation of a much more stable FBG, being able to measure higher temperatures than a standard FBG. This new grating was called firstly as Chemical Composition Grating (CCG) [9] due to the chemical processes present in the creation of the grating, but recently the new term of Regenerated FBG (RFBG) is used [10], referring to the regeneration process of the grating during the thermal step.

Depending on the initial FBG (also known as “seed”), the resulting RFBG has different properties. Two different types of optical fibers were used in the grating inscription. The first one was a standard germanium (Ge) doped optical fiber and the other one was a germanium and boron (Ge/B) codoped photosensitive optical fiber. The main differences between them are the grating regeneration temperature (approximately 950 °C in the Ge optical fiber and 550 °C in the Ge/B optical fiber approximately) and the maximum working temperature (1200 °C in Ge fiber and around 800 °C in Ge/B fiber). These thermal characteristics extend the temperature working limits of a standard FBG, established at a maximum temperature of 600 °C. Besides, a standard FBG suffers from a highly significant reduction of the reflectivity when the temperature exceeds 300 °C. It can be seen on Fig. 1 the setup made for the thermal treatment in order to achieve the grating regeneration. A tubular oven was used to heat the grating and an optical broadband source and an optical spectrum analyzer were used to monitor the grating’s reflectivity.



**Fig. 1: Optical setup made for grating regeneration.**

Once the FBGs and the RFBGs were created, it was necessary to develop a suitable protection to prevent damage to the optical fiber during the installation of the sensors. A simple sensor head was fabricated by introducing the optical fiber (containing an FBG or an RFBG) inside a hollow metal tube sealed at both ends. A good seal is helpful in the sensor transportation and it also prevents the accidental introduction of fresh concrete inside the tube during the installation. Therefore the ends of the metal tube were sealed with high temperature resistant glue. As a result the fiber remains loose inside the tube and is kept away from any external agent and is free from the strain applied to the tube (Fig. 2b)

Electrical sensors were also placed, consisting of thermocouples type K able to measure temperatures up to 1000 °C. These sensors were used to compare the measurements between optical and electrical sensors.

As a result of this process, 4 sets of sensors were fabricated, each one of them containing:

- 1 standard FBG sensor inscribed in a photosensitive Ge/B codoped optical fiber.
- 1 RFBG sensor inscribed in a Ge doped optical fiber.
- 1 RFBG sensor inscribed in a photosensitive Ge/B codoped fiber.

- 1 type K electrical thermocouple.

### 3. Installation of sensors and concrete samples

The fabricated sets of sensors mentioned in the previous section were installed inside two concrete samples. These samples were made in a cylindrical shape, having a size of 30 cm height and 15 cm of diameter. Two sets of sensors were embedded in each concrete specimen in two specific locations: the lateral side and the center of gravity (7.5 cm from the lateral side and 15 cm height). Fig. 2a shows the schematic locations of the sensors in points L1 (lateral side) and C1 (center of gravity) in sample 1 and L2 (lateral side) and C2 (center of gravity) in sample 2.

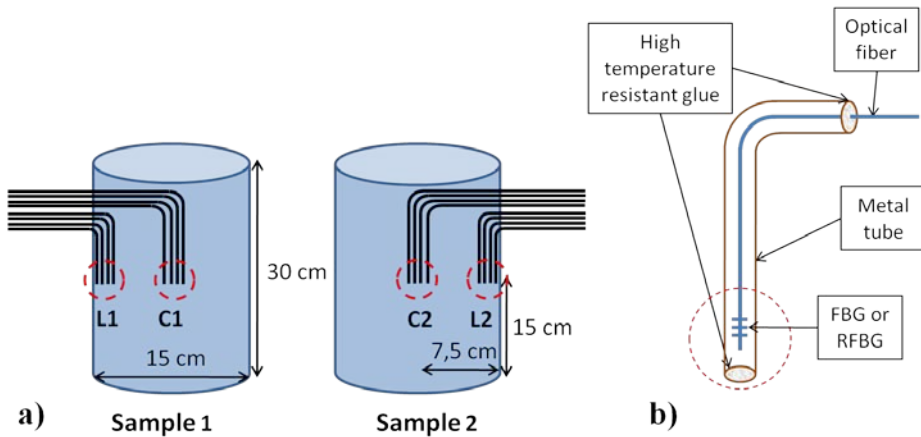


Fig. 2: a) Sensor locations inside the concrete samples. b) Detailed view of the sensor package.

Specimen	Location	Sensors installed
Sample 1	L1	Ge#1, Ge/B#1, FBG#1, TC#1
	C1	Ge#2, Ge/B#2, FBG#2, TC#2
Sample 2	L2	Ge#3, Ge/B#3, FBG#3, TC#3
	C2	Ge#4, Ge/B#4, FBG#4, TC#4

Table 1: Sensors installed inside the concrete samples.

The sensors were labeled as FBG#1..4 for the FBG sensors, Ge#1..4 for the RFBG inscribed in Ge doped fiber, Ge/B#1..4 for the RFBG inscribed in Ge/B codoped fiber and TC#1..4 for the thermocouples. It can be seen in Table 1 the locations of every single sensor inside the concrete samples after the installation. The sets of sensors were

fixed to two cylindrical moulds, and then the concrete was carefully poured into each of them, completely covering the sensing heads of the sensors. In Fig. 3 it can be seen two sets of sensors fabricated on the left, and the location of these sets inside the cylindrical mould before the concrete pouring, on the right. The concrete samples were removed from their moulds after 48 hours, when the concrete had reached almost the 80 % of its final strength. The next step was to move the samples to a specific concrete cure chamber where the samples were held for 34 days until they reached their maximum strength.



**Fig. 3: Two sets of sensors fabricated, on the left. Location of these sets inside the cylindrical mould before concrete pouring, on the right.**

The two concrete samples were moved to a fire chamber to perform the temperature test. The size of the fire chamber was 1.5 m x 1.5 m x 1.5 m, containing 4 burners that were capable of increasing the temperature inside the chamber to above 1200 °C. The burners were monitored by 4 different electrical thermocouples located inside the chamber. The concrete samples were positioned at the lateral sides of the floor inside the chamber. The metal tubes containing the sensors were extended about 30 centimeters and fed out of the fire chamber through a 2 centimeters diameter hole in order to allow the optical connections to the measurement equipment outside the chamber. A commercially available sensor interrogator was used to collect the data from the optical sensors during the test.

After the installation of the concrete samples, sensor named Ge/B#1 appeared to be broken due to the transportation of the concrete specimens. Thus, the survival percentage during installation concerning the optical sensors was 93.75 %.

#### **4. Real fire temperature test**

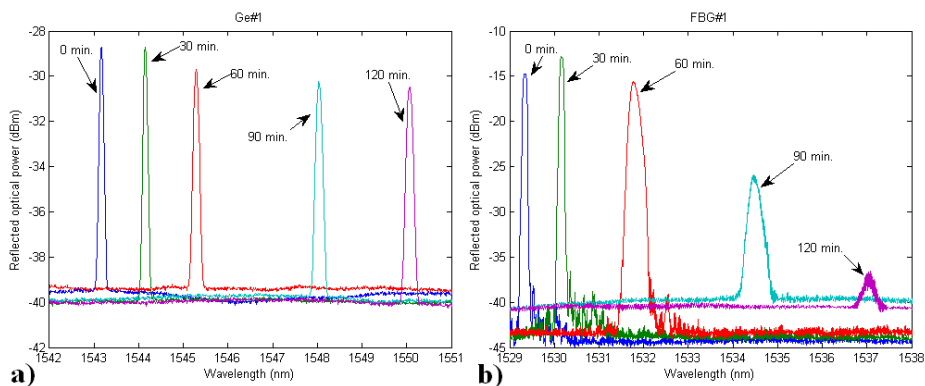
The Spanish/European standard UNE-EN 1363-1 temperature profile for normalized concrete resistance to real fire was used. The formula used for the temperature increment is:

$$\Delta T = 345 \log(8t + 1) \quad (1)$$

where  $t$  is time in minutes. According to equation (1), the target increment of temperature has a very fast initial response, followed by a slower temperature rise. The

duration of the test was 120 minutes, when the temperature measured by the thermocouples inside the chamber was around 1060 °C.

The data obtained by the optical sensor interrogator was converted to temperature by applying a second order temperature sensitivity of 8.6 pm/K and  $7.97 \cdot 10^{-3}$  pm/(K<sup>2</sup>) to the sensors inscribed in germanium-boron codoped fiber and 11.79 pm/K and  $2.45 \cdot 10^{-3}$  pm/(K<sup>2</sup>) to the sensors inscribed in germanium doped fiber. Sensitivity factors of the optical sensors were previously obtained through a calibration test. The spectrum of the gratings was also recorded in order to monitor the variation of the reflectivity with the temperature. In addition, the shape of the grating's spectrum changes. Indeed, it can be observed in Fig. 4b that the peak power reflected by FBG#1 decreases more than 20 dB and its spectrum become broader. On the other hand, the spectrum of RFBG Ge#1 remains almost unchanged (Fig. 4a).

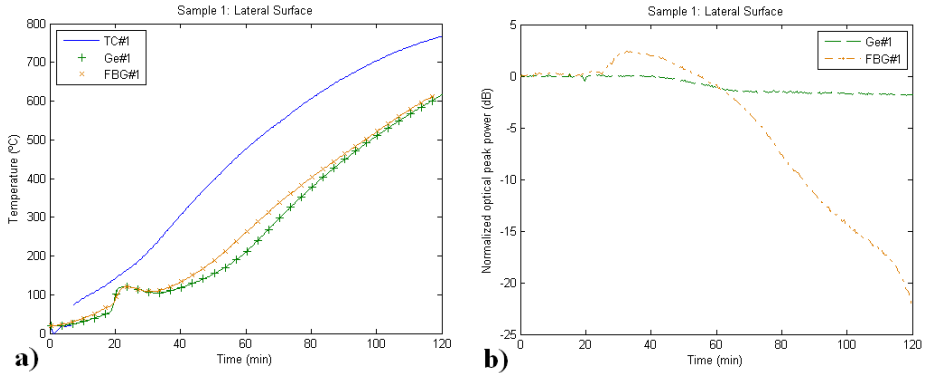


**Fig. 4: Spectrum evolution at different times during the test of sensors a) Ge#1 and b) FBG#1.**

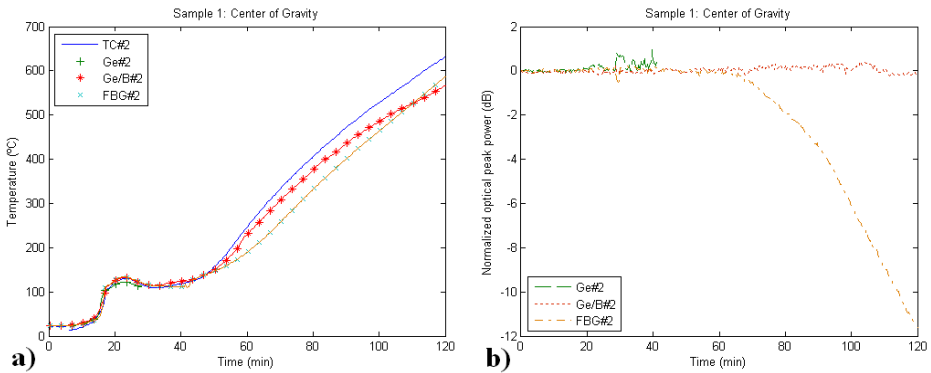
In Figs. 5a-8a it can be seen the temperature evolution and in Fig. 5b-8b the normalized peak power reflected by the gratings during the fire test. It can be seen that at the center of gravity of both concrete samples (points C1 and C2) the temperature measured by the thermocouples and the optical sensors is very similar, whereas the temperature profile is rather different on the lateral surface (points L1 and L2). This is due to the location of the sensors during the installation and the temperature gradient inside the concrete sample. The thermocouples were the nearest sensors to the lateral side in both concrete samples, thus inside the chamber they were more exposed to the fire created by the burners. In addition, the temperature gradient is higher at the air-concrete interface during the heating process [1], and the thermocouples were also installed very close to that interface.

It can also be seen in Figs. 5a-8a a temperature ramp registered by the optical sensors at around 20 minutes. This is due to the thermal inertia of concrete [11] which consists of a time delay in the transference of heat through the concrete mass when the temperature changes from room temperature (~22°C) to a temperature higher than 500°C in only 5 minutes.





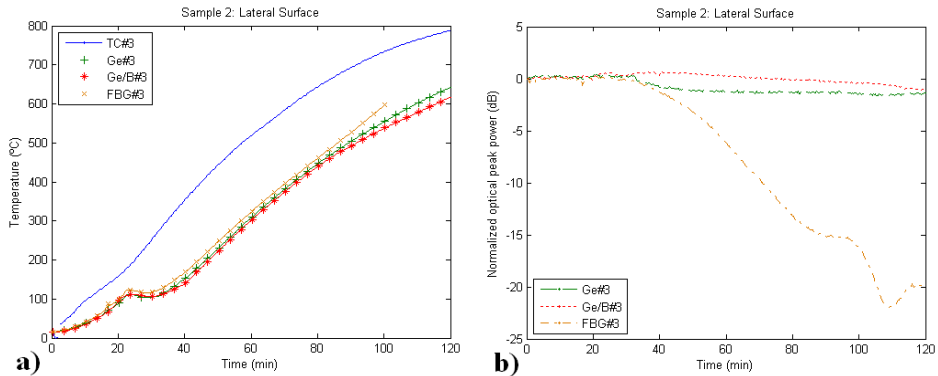
**Fig. 5: Sample 1 at lateral surface (point L1): a) Temperature measured by optical and electrical sensors and b) Normalized optical peak power of the optical sensors.**



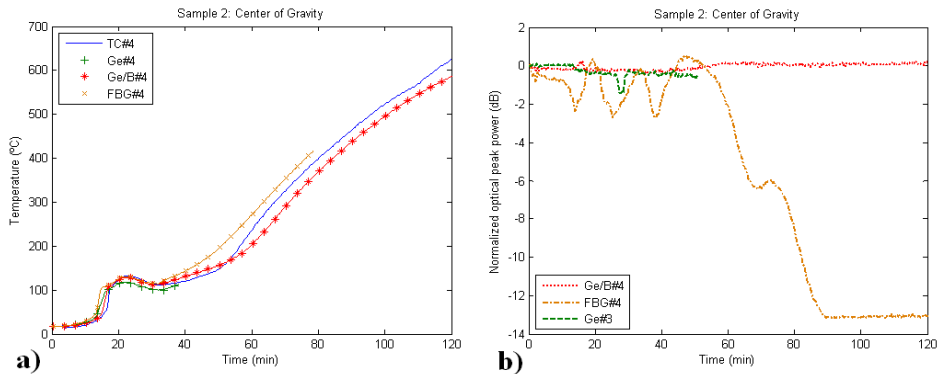
**Fig. 6: Sample 1 at the center of gravity (point C1): a) Temperature measured by optical and electrical sensors and b) Normalized optical peak power of the optical sensors.**

Concerning sample 1 at point L1 (Fig. 5), the maximum temperature registered by FBG#1 was 613.9 °C although its reflectivity decreased 22.46 dB after 118 minutes from the start of the test, thus the Bragg wavelength was not clearly identified by the peak search algorithm used. At the same location, Ge#1 shows a maximum temperature of 615.3 °C after 120 minutes with only losses of 1.83 dB. The thermocouple TC#1 located at this point shows a maximum temperature of 767 °C.

Taking a look at point C1 in sample 1 (Fig. 6) a similar behavior can be seen in every sensor located at this point. Unfortunately, sensor Ge#2 disappeared after 42 minutes. This is due to light reflections at the fiber splice since the noise floor increased above the reflected peak power of the grating, meaning that the peak search algorithm was unable to follow the wavelength shift. Ge/B#2 sensor registered a maximum temperature of 566.5 °C and FBG#2 registered 587.4 °C. Thermocouple TC#2 showed a maximum temperature of 631 °C. Concerning optical losses, Ge/B#2 had only losses of 0.11 dB whereas FBG#2 had losses of 11.55 dB.



**Fig. 7: Sample 2 at the lateral surface (point L2): a) Temperature measured by optical and electrical sensors and b) Normalized optical peak power of the optical sensors.**



**Fig. 8: Sample 2 at the center of gravity (point C2): a) Temperature measured by optical and electrical sensors and b) Normalized optical peak power of the optical sensors.**

Moving on to sample 2 at point L2 (Fig. 7), the maximum temperatures measured by the optical sensors were: 641.7 °C by Ge#3, 617 °C by Ge/B#3 and 598.2 °C by FBG#3 (although this sensor disappeared after 100 minutes) whereas thermocouple TC#3 measured a maximum temperature of 788 °C. Optical losses experienced by the optical sensors were: 1.4 dB by Ge#3 sensor, 1.01 dB by Ge/B#3 sensor and more than 19.86 dB by FBG#3 sensor.

At point C2 in sample 2 (Fig. 8), the results were similar to those obtained at point C1 in sample 1. Ge#4 sensor disappeared at an early stage, after 52 minutes. This is due again to the problems originated in the splice. The maximum temperatures registered by the rest of the optical sensors were: 586.3 °C by Ge/B#4 sensor and 417.9 °C by FBG#4 sensor (although its optical peak power disappeared in minute 79 due to the high losses). Thermocouple TC#4 measured a maximum temperature of 625 °C. Optical losses experienced by the optical sensors were: 0.1 dB by Ge/B#4 sensor and 13.03 dB by FBG#4 sensor.

All the results extracted from this test are summarized in Table 2 concerning maximum temperature registered by the optical and electrical sensors and in Table 3 concerning the optical power losses in the peak power reflected by the gratings at the end of the test, normalized by the reflected peak power at the beginning of the test.

	Sample 1		Sample 2	
	#1 (L1)	#2 (C1)	#3 (L2)	#4 (C2)
<b>Ge</b>	615.3°C	Spectrum disappearance	641.7°C	Spectrum disappearance
<b>Ge/B</b>	not available	566.5°C	617°C	586.3°C
<b>FBG</b>	613.9°C	587.4°C	Erased at around 100 minutes	Erased at around 80 minutes
<b>TC</b>	767°C	631°C	788°C	625°C

**Table 2: Maximum temperatures measured by optical and electrical sensors.**

	Sample 1		Sample 2	
	#1 (L1)	#2 (C1)	#3 (L2)	#4 (C2)
<b>Ge</b>	1.83 dB	Spectrum disappearance	1.4 dB	Spectrum disappearance
<b>Ge/B</b>	not available	0.11 dB	1.01 dB	0.1 dB
<b>FBG</b>	22.46 dB	more than 11.55 dB	more than 19.86 dB	more than 13.03 dB

**Table 3: Optical power losses of optical sensors after the test.**

## 5. Conclusions

The optical sensors show a good agreement with the electrical ones at the center of gravity of both concrete samples. In the lateral surfaces there are some differences between the measurements obtained from the sensors located at this point. This is due to the position of the sensors during the installation and the temperature gradient inside the concrete sample. To be precise, the thermocouples were installed very close to the air-concrete interface, where the temperature gradient is higher. The

optical sensor registered temperatures above 600 °C inside the concrete specimens whereas the temperature inside the chamber was around 1060 °C after 120 minutes.

The standard FBG sensors were completely erased during the test due to the high temperature, resulting in a decrease in the reflected peak power of the grating until the noise floor. Nevertheless, FBGs sensors can be used in high temperature tests if the time duration of the experiment is short enough, and they can be reusable in high temperature environment if the reflectivity losses of the grating during the previous tests are small enough.

The Ge and Ge/B doped fiber RFBG sensors have shown much less optical losses. However, the process of the fabrication of the RFBG is more complex. Thus, for each application can be choose one or other type of optical sensor. In our case, RFBG sensors appear to be useful sensors for high temperature applications, such as fire detection inside a tunnel, as they can withstand temperatures over 1000 °C [10] and the fire can be detected when the temperature extremely rises in the first minutes.

### *Acknowledgements*

The authors gratefully acknowledge research funding by the Spanish Ministry of Science and Innovation through Project SOPROMAC P41/08.

### *References*

- [1] B.M. Luccioni, M.I. Figueroa and R.F. Danesi, “Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures”, *Engineering Structures* **25**, 729-742 (2003).
- [2] H. Abdel-Fattah and S.A. Hamoush, “Variation of the fracture toughness of concrete with temperature”, *Construction and Building Materials*, Vol. **11**, No. **2**, 105-108 (1997).
- [3] J.C. Cardozo da Silva, C. Martelli, et al., “Dynamic analysis and temperature measurements of concrete cantilever beam using fibre Bragg gratings”, *Optics and Lasers in Engineering* **45**, 88-92 (2007).
- [4] Y.B. Lin, J.C. Chern, et al., “The utilization of fiber Bragg grating sensors to monitor high performance concrete at elevated temperature”, *Smart Materials and Structures* **13**, 784-790 (2004).
- [5] A. Lönnermark, P.O. Hedekvist and H. Ingason, “Gas temperature measurements using fibre Bragg grating during fire experiments in a tunnel”, *Fire Safety Journal* **43**, 119-126 (2008).
- [6] G. Heiberg, J. Skaar, M. Fokine, L. Arnberg, ”A new method for temperature measurement in solidifying aluminum alloys by use of optical fiber Bragg grating sensors”, *Transactions of the American Foundry Society*, Vol. 110, Part 1 , pp. 383-391 (2002).
- [7] A.D. Kersey, et al., “Fiber grating sensors”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, pp. 1442-1463 (1997).

- [8] C.L. Liou, et al., "Characteristics of hydrogenated fiber Bragg gratings", *Applied Physics A* 64, pp. 191-197 (1997).
- [9] M. Fokine, "Underlying mechanisms, applications, and limitations of chemical composition gratings in silica based fibers", *Journal of Non-Crystalline Solids*, No. 349, pp. 98-104 (2004).
- [10] S. Bandyopadhyay, J. Canning, et al., "Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm", *Optics Letters* 33, pp. 1917-1919 (2008).
- [11] L. Ropelewski and R. D. Neufeld, "Thermal inertia properties of autoclaved aerated concrete", *Journal of Energy Engineering*, August 1999, pp. 59-75 (1999).

# Temperature sensor based on colloidal Quantum Dots-PMMA nanocomposite waveguides

Antonio Bueno, Isaac Suárez, Rafael Abargues, Salvador Sales and Juan P. Martínez  
Pastor

**Abstract**—In this work integrated temperature sensors based on active nanocomposite planar waveguides are presented. The nanocomposites consist of cadmium selenide (CdSe) and cadmium telluride (CdTe) quantum dots (QDs) embedded in a polymethylmethacrylate (PMMA) matrix. When the samples are heated in a temperature range from 25 °C to 50 °C the waveguided photoluminescence of QDs suffers from a strong intensity decrease, which is approximately quadratic dependent with temperature. Moreover, the wavelength peak of the waveguided emission spectrum of CdTe-PMMA shows a blue shift of 0.25 nm/°C, whereas remains constant in the case of CdSe-PMMA. QDs-waveguides have great potential for the development of photonic sensors because of their integration, multiplexing and roll-to-roll fabrication capabilities.

**Index Terms**—Temperature sensor, colloidal quantum dots, nanocomposites, PMMA.

## I. INTRODUCTION

RECENTLY, there is a huge interest in developing a great variety of integrated photonic devices because of their application in fields like telecommunication and sensing. For this purpose, colloidal quantum dots (QDs) are a very attractive material as an active medium to be integrated in photonic devices. These nanostructures join the three-dimensional confinement of the wave function, characteristic from QDs, with the feasibility of chemical methods, able to achieve nanocrystal radii from 1 nm to 10 nm with size dispersion as low as 6 % [1], [2]. Since the size of the QDs is very small, the separation of the electronic states is much greater than thermal energy and the emission of the QDs in colloidal solution turns to be temperature independent. Moreover, QDs allow the possibility of tuning their emission wavelength by changing the size, but also the base material, without modifying the surface chemistry. Then, the appropriate choice of two or more different QDs provides multi-wavelength (or multi-‘color’) operation, which is a very potential and attractive feature since it allows the possibility of multiplexing in wavelength several optical sensors [3].

During the last decade, many researchers have studied the use of fluorescent QDs in biological applications (as labels in bioanalysis and diagnostics, tags for proteins and DNA immunoassays or compatible labels for in-vivo imaging studies [4]-[7]) since they can modify their surface by conjugation with the appropriate biomolecules. Moreover, chemical sensors had been also developed since a desired selectivity can be obtained by

chemically tailoring the outer surface of the QDs. For instance, a selective ion probe was developed for sensing  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  cations [8] and a sensor for explosive molecules such as TNT or nitrobenzene was presented [9].

In order to achieve the integration of the properties of QDs into optoelectronic devices, a common approach is to incorporate them into a host material. These multicomponent materials are known as nanocomposites. Walker et al. first characterized the temperature response of the photo-luminescence (PL) of colloidal QDs immobilized inside a poly(lauryl)methacrylate (PLMA) matrix [10] proving the suitability of QDs as temperature references for PL-based sensing applications. Other authors have also reported the use of different host polymers such as polystyrene (PS) [11] or polymethylmethacrylate (PMMA) [12] to embed QDs, and even coupling the light with the aid of optical fibers [13]. All these works use the PL of QDs as the sensing parameter, but none of them integrate the PL response into an optical waveguide, which is the key step to develop a temperature sensor into a photonic device.

In this paper, we present a temperature sensor based on the temperature-dependent response of the waveguided PL of CdSe and CdTe QDs embedded into PMMA thin films. We describe the fabrication process of planar waveguides based on QDs and present the experimental setup carried out in order to perform temperature tests. Finally we show the temperature characterization of waveguided PL in both CdSe-PMMA and CdTe-PMMA waveguides from 25 to 50 °C. Peak intensity of the waveguided PL shows a decreasing quadratic behavior in both waveguides. Between both nanocomposites, CdTe-PMMA waveguides showed the largest response to temperature.

## II. FABRICATION

The active waveguide materials chosen for this study were CdSe and CdTe QDs incorporated into a PMMA matrix. CdSe was synthesized following the procedure developed by Peng's group [14]. CdTe was synthesized in a similar way, from a solution of tellurium-trioctylphosphine. Once QDs have been prepared, CdSe-PMMA and CdTe-PMMA nanocomposite solutions were obtained by mixing PMMA and QDs, both diluted in toluene. The concentration of QDs in the polymer was chosen according to a previous study [15], where filling factors around  $5 \cdot 10^{-4}$  had been found to be optimum for waveguiding. In order to implement the waveguides, nanocomposite solutions were spin-coated on  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  substrates (as it is illustrated in Fig. 1) and baked at 80 °C and 150 °C for 2 minutes. The  $\text{SiO}_2$  layer is prepared by a sol-gel method [16] resulting in a film of 600 nm thick, acting as a good low index cladding layer for the optical modes of the core at the wavelengths of interest (400-600 nm). Finally, the edges of the samples were cleaved for end fire coupling purposes, being the edge-to-edge distance of around 5 mm in width and 10 mm in length.

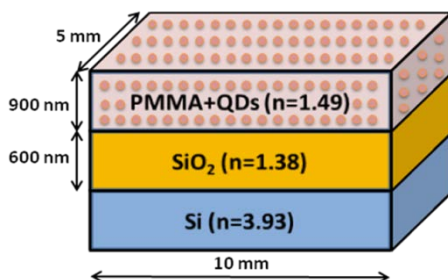


Fig. 1. Structure of the planar waveguides fabricated (not in scale).

The absorbance spectra of solutions containing CdSe and CdTe QDs are depicted in Fig. 2. The absorbance spectrum of CdSe QDs (blue line) has an absorbance peak corresponding to the ground state exciton transition at 580 nm, whereas an excited state transition is observed at around 473 nm. The absorbance is negligible beyond 650 nm and increases continuously for shorter wavelengths. Similarly, the ground state exciton peak is observed at 537 nm for CdTe QDs (green line) and two excited state transitions are resolved at 490 nm and 430 nm. The absorbance is negligible for wavelengths longer than 570 nm and increases continuously for shorter wavelengths. According to the absorption data published by other authors, the exciton peaks at 580 nm for CdSe and at 537 nm for CdTe QDs should correspond to nanocrystal radius of around 2.5 nm and 1.5 nm respectively [17], [18].

Fig. 3 shows the PL spectra at 25 °C of CdSe (blue lines) and CdTe (green lines) QDs measured in the colloidal solution of toluene (solid lines) and in the nanocomposite of PMMA (dotted lines). They were measured by optical pumping with a GaN laser diode (404 nm) by back-scattering. The PL line of CdSe QDs in the colloidal solution is centered at 620 nm and has a full width at half maximum (FWHM) of 40 nm, whereas the PL line of the CdTe QDs in the colloidal solution is centered at 560 nm and has a FWHM of 30 nm. The red shift of the PL peak with respect to its corresponding absorption resonance is known as the Stokes shift and it is typical of semiconductor nanostructures [19]. When the QDs are embedded in the polymer, the absorbance curves are similar to the ones depicted in Fig. 2, but a smaller Stokes shift is measured due to the fact that a certain proportion of nanoparticles can agglomerate. The PL lines of CdSe and CdTe QDs in the nanocomposite are centered at 600 nm and 545 nm respectively, being shifted to shorter wavelengths. These shifts are a visible sign of the surrounding influence in the emission of QDs.



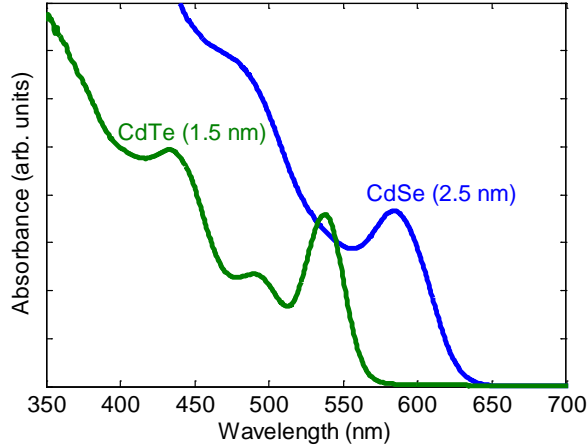


Fig. 2. Absorbance spectra for CdSe and CdTe QDs in the colloidal solution.

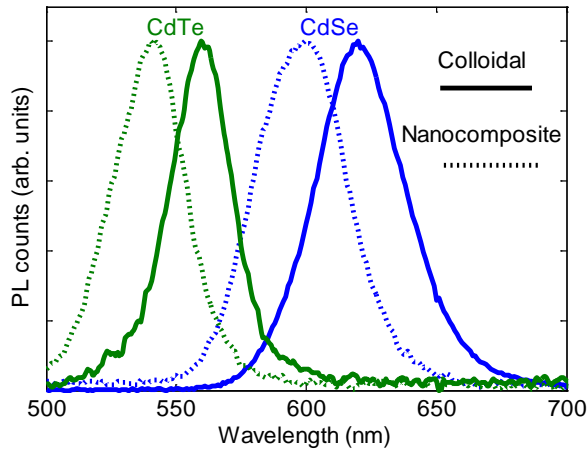


Fig. 3. Photoluminescence spectra of CdSe and CdTe QDs in the colloidal solution and incorporated in the PMMA nanocomposite.

### III. EXPERIMENTAL SETUP

The experimental setup is depicted in Fig. 4. The PL wave-guiding has been characterized by coupling light from a GaN laser diode centered at 404 nm to both CdSe-PMMA and CdTe-PMMA planar waveguides. The laser beam was focused on the surface of the planar waveguides from the vertical direction in normal incidence with the aid of a semi-cylindrical lens. As a result, the beam was focused along the length of the waveguide in a thin line. Under this condition, QDs are equally pumped in the whole length of the waveguide, being its PL coupled to a waveguide mode as it has been discussed in [15]. The waveguides were placed on the top of a ceramic resistor in order to increase the temperature by Joule effect. The ceramic resistor used had an

electrical resistance of  $22\text{ K}\Omega$  and dimensions of  $5\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ . The temperature on the top of the resistor was obtained by a PT100 electrical sensor with a resolution of  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$  and controlled by a CAL9300 (CAL Controls) temperature controller.

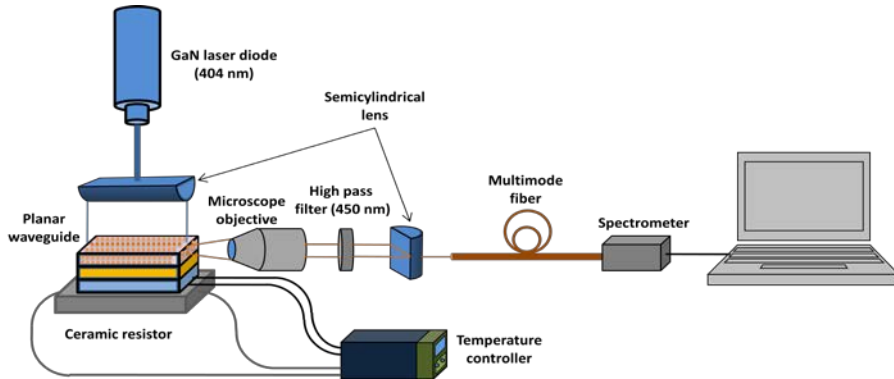


Fig. 4. Experimental setup carried out in order to perform temperature experiments with CdSe-PMMA and CdTe-PMMA waveguides.

A microscope objective collects the light at the output of the waveguide and focuses it to the detection system. It was mounted in a three-dimensional positioning system with micrometric resolution in order to improve the light coupling from the waveguides. Collimated PL light is finally focused with a semi-cylindrical lens to a multimode optical fiber attached to the entrance slit of a spectrometer (StellarNet EPP2000). This spectrometer is capable to acquire a spectrum in the range from  $256\text{ nm}$  to  $1100\text{ nm}$  with a resolution of  $0.5\text{ nm}$ . The PL spectra were recorded by the spectrometer was recorded by a specific control software running in a personal computer.

#### IV. RESULTS AND DISCUSSION

In a first step, a reference PL spectrum was recorded at room temperature ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) in the QDs-PMMA waveguides. The waveguided PL spectrum exhibit some differences compared to the PL spectrum of the nanocomposite due to the guiding effect through the sample. The propagating light in the waveguide can experience a reabsorption phenomenon, leading to a blue shift and a broadening of the waveguided PL spectrum [15]. In the CdSe-PMMA waveguide a  $30\text{ nm}$  blue shift in the PL peak and a FWHM of  $52\text{ nm}$  is measured. In CdTe-PMMA the waveguided PL spectrum was centered at  $540\text{ nm}$  and had a FWHM of  $38\text{ nm}$ .

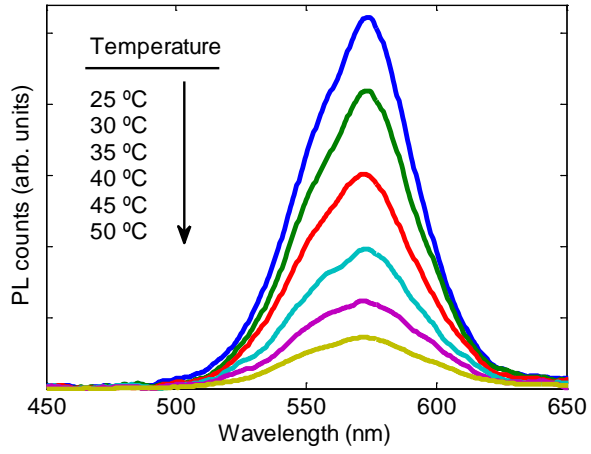


Fig. 5. Photoluminescence spectra recorded from the CdSe-PMMA waveguide at each setting temperature.

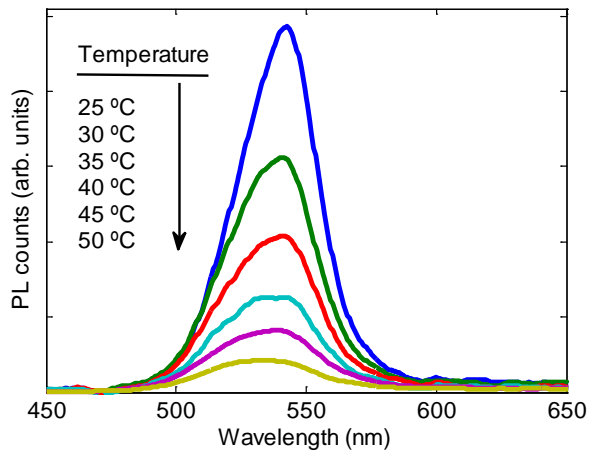


Fig. 6. Photoluminescence spectra recorded from the CdTe-PMMA waveguide at each setting temperature.

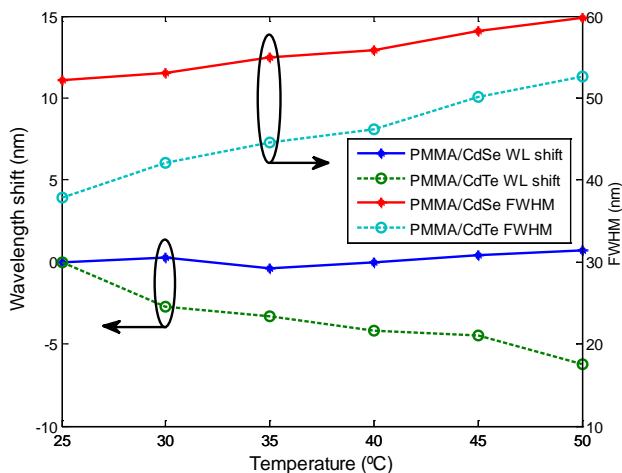


Fig. 7. Temperature dependence of wavelength shift and FWHM of PL spectrum.

Then, the waveguides were placed on the top of the ceramic resistor and the samples were heated in steps of 5 °C up to a maximum temperature of 50 °C. The PL spectra from the CdSe-PMMA waveguide at each setting temperature are depicted in Fig. 5. As it can be seen, the PL intensity strongly decreases with increasing temperature of the sample. There is no appreciable shift in the PL peak wavelength and a clear broadening of 7.6 nm from 25 °C to 50 °C, as it can be observed in Fig. 7. The CdTe-PMMA waveguide was placed on top of the ceramic resistor in an identical procedure as the previous sample. A similar strong decrease of the PL intensity is observed when the sample is heated from 25 °C to 50 °C, as shown in Fig. 6. Nevertheless, the PL spectrum of the CdTe-PMMA waveguide experiences a broadening of 14.9 nm and a blue shift of 6.2 nm (Fig. 7).

The CdSe-PMMA waveguide shows a negligible shift (within a range of  $\pm 0.5$  nm) whereas in the CdTe-PMMA waveguide an overall blue shift of 6.2 nm is measured, which means a shift rate of  $-0.25$  nm/°C. Regarding to the FWHM of the PL spectrum, both materials exhibit an increase. In the case of the CdSe-PMMA waveguide the broadening increase is 7.6 nm and nearly double, 14.9 nm, in the case of the CdTe-PMMA waveguide, corresponding to broadening rates of  $0.3$  nm/°C and  $0.6$  nm/°C respectively. Since colloidal QDs (dropped cast layers) exhibit typically a smooth wavelength red shift with temperature, the different waveguided PL measured from 25 °C to 50 °C can be mainly attributed to the variations of the optical (refraction index) and morphological (film roughness) properties of PMMA matrix depending on the working temperature [20].

Although the temperature range studied is far away from the glass transition temperature of PMMA (around 105 °C), heating can provoke the migration of the nanocrystals or even the modification of the QD's surface, leading to a decrease of the PL intensity. In fact, it has already been demonstrated the decrease of PL in CdSe-PMMA [21], [22] and in CdSe/ZnS polystyrene composites [11] upon heating. This is explained by the strain induced in the QDs due to the thermal expansion of the polymer

chains. Indeed, in these works the decrease of PL is accompanied by a broader FWHM and a red shift of the emission peak. In this case, CdSe-PMMA does not have any shift, whereas CdTe-PMMA shows a blue shift. However, in this case the waveguided PL is influenced as well by the waveguide properties (thickness, refractive index, losses...).

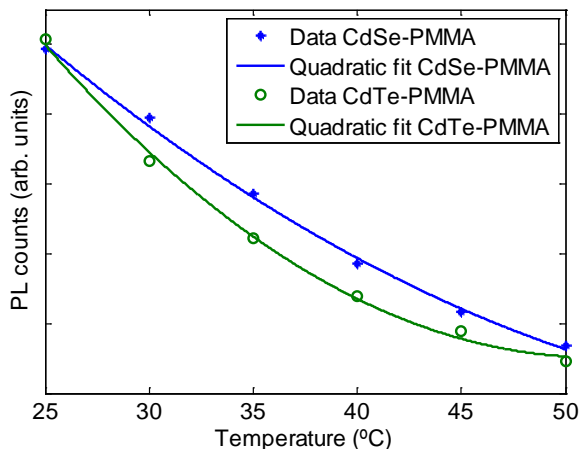


Fig. 8. Experimental data and quadratic fit in CdSe-PMMA and CdTe-PMMA planar waveguides.

The refractive index of polymers decreases with temperature at a rate of  $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  [20], [21], thus when the sample is heated long wavelength modes are to be expected at cut-off, dealing to a blue shift in the spectra. Also, since a waveguide can propagate more quantity of modes at shorter wavelengths, it is reasonable that this effect should be stronger in the CdTe-PMMA waveguide.

Fig. 8 shows the experimental data of the PL peak intensity versus temperature for both CdSe-PMMA and CdTe-PMMA waveguides. Quadratic fits of these data have been applied, obtaining polynomial expressions of  $\text{PL}(\%) = 0.058 \cdot T (^{\circ}\text{C})^2 - 7.87 \cdot T (^{\circ}\text{C}) + 260.33$  for the CdSe-PMMA waveguide and  $\text{PL}(\%) = 0.13 \cdot T (^{\circ}\text{C})^2 - 13.18 \cdot T (^{\circ}\text{C}) + 349.53$  for the CdTe-PMMA waveguide. These polynomial coefficients state a higher temperature sensitivity of the CdTe-PMMA waveguide. The correlation coefficients obtained are 0.9978 for the CdSe-PMMA waveguide and 0.9973 for the CdTe-PMMA waveguide, showing an excellent fit of the experimental data.

## V. CONCLUSION

In this work, the feasibility of a temperature sensor based on nanocomposite waveguides is demonstrated. The recent advances in colloidal QDs fabrication make the photonic integration of these nanostructures in polymer hosts possible. As the surrounding media varied from the colloidal solution to a polymer matrix, the PL spectrum is temperature dependent due to guiding and reabsorption effects of light travelling through the waveguide.

Temperature sensors based on CdSe and CdTe QDs incorporated in PMMA were characterized. The waveguides were heated in the range from 25 °C to 50 °C and the

temperature characterization of the waveguided PL shows a decrease in its intensity with quadratic temperature dependence. It is interesting to note that CdTe-PMMA waveguide presents more sensitivity and also its wavelength peak suffers from a temperature dependence of  $0.25\text{nm}/^\circ\text{C}$ , whereas remains constant for the CdSe-PMMA. The possibility of wavelength multiplexing these sorts of integrated sensors allows a great number of temperature measurement applications.

## REFERENCES

- [1] V. I. Klimov, "Nanocrystal quantum dots: from fundamental photophysics to multicolor lasing", *Los Alamos Science*, No. 28, 2003.
- [2] N. Tomczak, D. Janczeuski, M. Han, and J. Vancso, "Designer polymer-quantum dot architectures", *Progress in Polymer Science*, Vol. 34, No. 5, pp. 393-430, 2009.
- [3] E. R. Goldman, A. R. Clapp, G. P. Anderson, H. T. Uyeda, J. M. Mauro, I. L. Medintz, and H. Mattoussi, "Multiplexed toxin analysis using four colors of quantum dot fluororeagents", *Anal. Chem.*, Vol. 76, pp. 684-688, 2004.
- [4] W. C. Chan, D. J. Maxwell, X. Gao, R. E. Bailey, M. Han, and S. Nie, "Luminescent quantum dots for multiplexed biological detection and imaging", *Curr. Opin. Biotechnol.*, Vol. 13, pp. 40-46, 2002.
- [5] A. M. Smith and S. Nie, "Chemical analysis and cellular imaging with quantum dots", *Analyst*, Vol. 129, pp. 672-677, 2004.
- [6] J. Riegler and T. Nann, "Application of luminescent nanocrystals as labels for biological molecules", *Anal. Bioanal. Chem.*, Vol. 379, pp. 913-919, 2004.
- [7] P. Alivisatos, "The use of nanocrystals in biological detection", *Nature Biotechnology*, Vol. 22, pp. 47-52, 2004.
- [8] Y. Chen and Z. Rosenzweig, "Luminescent CdS quantum dots as selective ion probes", *Anal. Chem.*, Vol. 74, pp. 5132-5138, 2002.
- [9] G. H. Shi, Z. B. Shang, Y. Wang, W. J. Jin, and T. C. Zhang, "Fluorescence quenching of CdSe quantum dots by nitroaromatic explosives and their relative compounds", *Spectrochimica Acta A*, Vol. 70, No. 2, pp. 247-252, 2008.
- [10] G. W. Walker, V. C. Sundar, C. M. Rudzinski, A. W. Wun, M. G. Bawendi, and G. Nocera, "Quantum-dot optical temperature probes", *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 17, pp. 3555-3557, 2003.
- [11] D. Valerini, A. Cretí, and M. Lomascolo, "Temperature dependence of the photoluminescence properties of colloidal CdSe/ZnS core/shell quantum dots embedded in a polystyrene matrix", *Physical Review B*, Vol. 71, 235409 (6pp), 2005.
- [12] H. Song and S. Lee, "Photoluminescence (CdSe)ZnS quantum dot-polymethylmethacrylate polymer composite thin films in the visible spectral range", *Nanotechnology*, Vol. 18, 055402 (6pp), 2007.
- [13] P. A. S. Jorge, M. Mayeh, R. Benrashid, P. Caldas, J. L. Santos, and F. Farahi, "Self-referenced intensity based optical fiber temperature probes for luminescent chemical sensors using quantum dots", *Proc. SPIE* 5855, Vol. 42, 2005.
- [14] W. W. Yu and X. Peng, "Formation of high-quality CdS and other II-VI semiconductor nanocrystals in noncoordinating solvents: tunable reactivity of monomers", *Angewandte Chemie International Edition*, Volume 41, No. 13, pp. 2368-2371, 2002.

- [15] I. Suárez, H. Gordillo, R. Abargues, S. Albert and J. Martínez-Pastor, “Photoluminescence waveguiding in CdSe and CdTe QDs-PMMA nanocomposite films”, *Nanotechnology*, Vol. 22, 435202 (8 pp.), 2011.
- [16] [www.solgel.com](http://www.solgel.com)
- [17] W. W. Yu, L. Qu, W. Guo, and X. Peng, “Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe and CdS nanocrystals”, *Chem. Mater.*, Vol. 15, pp. 2854-2860, 2003.
- [18] C. de Mello and R. Koole, “Size dependence of the spontaneous emission rate and absorption cross section of CdSe and CdTe quantum dots”, *J. Phys. Chem. C*, Vol. 113, pp. 6511-6520, 2009.
- [19] A. P. Demchenko, “Advanced fluorescence reporters in chemistry and biology III: Applications in sensing and imaging”, Ed. Srpinger, Vol. 10, 2011.
- [20] H. Ma, A. K. Y. Jen, and L. R. Dalton, “Polymer-based optical waveguides: materials, processing and devices”, *Advanced Materials*, Vol. 14, pp. 1339-1365, 2002.
- [21] H. C. Y. Yu, S. G. Leon-Saval, A. Argyros, and G. B. Wartoon, “Temperature effects of emission of quantum dots embedded in polymethylmethacrylate”, *Applied Optics*, Vol. 49, pp. 2749-2752, 2010.
- [22] T. T. K. Chi, U. T. D. Thuy, N. Q. Liem, M. H. Nam, and D. X. Thanh, “Temperature-dependent photoluminescence and absorption of CdSe quantum dots embedded in PMMA”, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 52, pp. 1510-1513, 2008.