

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA



---

DIVISIÓN FÍSICA APLICADA  
DEPARTAMENTO ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

---

Sensor de fibra óptica distribuido para medición de fugas de hidrocarburo.

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

ROSA MARTHA LÓPEZ GUTIÉRREZ

Ensenada, Baja California a Julio del 2003.

TESIS DEFENDIDA POR  
Rosa Martha López Gutiérrez  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dr. Vasilii Spirin

*Director del Comité*

---

Dr. Horacio Soto Ortiz

*Miembro del Comité*

---

Dr. Mikhail Shlyagin

*Miembro del Comité*

---

Dr. Jesús María Siqueiros Beltrones

*Miembro del Comité*

---

Dr. Sergei Miridonov

*Miembro del Comité*

---

Dr. Francisco Javier Mendieta

*Miembro del Comité*

---

Dr. José Rosario Gallardo López

*Jefe del Departamento de  
Electónica y Telecomunicaciones*

---

Dr. Luis Alberto Delgado Argote

*Director de Estudios de Posgrado*

10 de Julio del 2003

RESUMEN de la tesis de Rosa Martha López Gutiérrez, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California. Julio del 2003.

SENSOR DE FIBRA ÓPTICA DISTRIBUIDO PARA MEDICIÓN DE FUGAS DE HIDROCARBURO.

Resumen aprobado por:

---

Dr. Vasilii Spirin  
Director de Tesis

Se realizó una investigación tanto teórica como experimental de los principios para el diseño de un sensor de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo. Este trabajo se presenta en dos principales secciones: la primera, describe detalladamente los transductores de sensado que transfieren la influencia de hidrocarburo en un cambio de los parámetros de la luz que se propaga dentro de la fibra de prueba y, la segunda, los métodos de interrogación para sensado distribuido.

En la primera parte del trabajo se investigaron y desarrollaron los mecanismos de sensado basados en rejillas de Bragg en fibra (FBG) y pérdidas por curvaturas. Todos estos mecanismos utilizan como elemento sensor, un polímero que se hincha ante la presencia de hidrocarburo. Las rejillas de Bragg se atan al polímero, el cual tiene un proceso de expansión reversible en presencia de hidrocarburo y tensa la sección de la fibra con la rejilla dentro. Una fuga de hidrocarburo es indicada con un corrimiento en la longitud de onda de la rejilla de Bragg. La fibra de prueba y el polímero se alinearon y acoplaron mecánicamente enrollando un alambre delgado alrededor de éstos, con el fin de inducir pérdidas por curvaturas. En esta sección también se presenta un análisis del comportamiento del hinchamiento del polímero sensible bajo la influencia de diferentes hidrocarburos.

En la segunda parte del trabajo, se presentan diferentes técnicas de interrogación para sensores de hidrocarburos. La reflectometría óptica coherente en el dominio de la frecuencia (COFDR) utiliza reflectores concentrados, llamados FBG, colocadas entre los elementos sensibles distribuidos. El sensor COFDR propuesto utiliza el principio de detección distribuida con secciones de localización (DDSL) de perturbaciones con pérdidas inducidas. La propiedad señal a ruido de la técnica propuesta se simuló numéricamente. Se desarrolló un nuevo método para la localización de región de pérdidas con fugas de hidrocarburo basado en la medición de la potencia transmitida y de retrodispersión de Rayleigh. La estructura del sensor incluye un polímero sensible la cual se expande en presencia de hidrocarburo e induce las pérdidas por curvaturas en la fibra. La localización de la región de pérdidas se determina a partir de la única relación entre la potencia transmitida y de retrodispersión de Rayleigh normalizada para diferentes posiciones de la perturbación a lo largo de la fibra.

Se presenta una descripción del arreglo experimental para prueba en el laboratorio de los sensores de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo, así como conclusiones y recomendaciones de este trabajo

Palabras clave: Sensor de fibra óptica, curvatura, rejillas de Bragg, interrogación de sensores, COFDR, dispersión de Rayleigh.

ABSTRACT of the thesis presented by Rosa Martha López Gutiérrez as a partial requirement to obtain the degree of DOCTOR OF SCIENCE in ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS. Ensenada, Baja California, Mexico. July 2003.

## DISTRIBUTED FIBER OPTIC SENSOR FOR HYDROCARBON LEAK MEASUREMENT

The principles for design of the distributed fiber optic sensors for hydrocarbon leak detection were investigated theoretically and experimentally. Detailed description of the sensing transducers that transfer the hydrocarbon influence into a change of the parameters of the light propagating inside the test fiber and interrogation methods for distributed sensing are presented in two main sections of this work.

In the first part of the work the sensing mechanisms based on fiber Bragg gratings (FBG) and bending-losses were investigated and developed. All these mechanisms utilize swellable under hydrocarbon influence polymer as a sensitive element. The Bragg grating is attached to the polymer member, whom reversibly expands in hydrocarbon presence and strains the fiber section with the Bragg grating inside. A shift of the grating Bragg wavelength indicates the hydrocarbon leakage. In order to induce bending-losses in the test fiber under hydrocarbon influence, the optical fiber and swellable polymer were aligned together and coupled mechanically by soft wire wound around them. Analysis of swelling behavior of the sensitive polymer under influence of different hydrocarbons is also presented in this section.

In the second part of this work different techniques for interrogation of hydrocarbon sensors were presented. The coherent optical frequency domain reflectometer (COFDR) used lumped reflectors, namely FBGs, placed between distributed sensitive elements. Proposed COFDR sensor utilizes the principle of distributed detection with section localization (DDSL) of loss-inducing perturbations. The ratio signal-to-noise property of the proposed technique is numerically simulated. A novel method for localization of loss region with hydrocarbon leakage based on the measurement of transmitted and Rayleigh backscattered power is developed. The sensor structure includes a sensitive polymer, which expands in hydrocarbon presence and induces the bending losses in the fiber. The location of the loss region is determined from unique relationships between normalized transmitted and Rayleigh backscattered powers for different positions of the disturbance along the test fiber.

A description of the experimental arrangements for laboratory test of the distributed fiber optical sensors for hydrocarbon leak detection, as well as conclusions and recommendations are also presented in this work.

Keywords: Fiber optic sensor, curvature, Bragg grating, sensor interrogation, COFDR, Rayleigh backscattering.

*Dedicatoria*

*A Dios,*

*por permitirme ser feliz y le agradezco todo lo que tengo*

*A mis pequeños Carlos y Ameyalli,*

*por todo su amor y que sin saberlo han contribuido a finalizar esta etapa*

*A mi esposo César,*

*quien día a día me alentó y apoyó para concluir esta etapa de mi vida*

*A mis padres,*

*a quienes les agradezco infinitamente su apoyo y amor durante toda mi vida*

*A mi hermana Malena,*

*a quien quiero mucho*

*y*

*a todos aquellas personas que quiero y han sido parte de esta etapa*

#### Agradecimientos

No solo por la atinada dirección de este trabajo, expreso mi agradecimiento al Dr. Vasili Spirine, sino por su comprensión y apoyo en el desarrollo del mismo, así como su amistad manifiesta que no he de olvidar.

A los Drs: Horacio Soto Ortiz, Sergei Miridonov, Jesús María Siqueiros Beltrones, Mikhail Shlyagin y Francisco Javier Mendieta por sus valiosos comentarios y sugerencias a este trabajo y por la aportación en el jurado en que éste fue defendido.

A Ileana Márquez Borbón, Horacio Soto, Milka del Carmen Acosta, Edith García Cardenas mis amigos por siempre.

A las secretarias por facilitar el trabajo, en especial a Rosy Fuentes por su apoyo.

Gracias al técnico Miguel Farfán por la atención amable brindada

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) a quien debo mi formación académica. A los profesores y a todo el personal que labora en el departamento de electrónica y telecomunicaciones por su colaboración a lo largo de estos años.

Al pueblo de México que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) financió mi estudio doctoral.

Al proyecto IMP FIES97-04-IV por la beca otorgada.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
I.1 Motivación .....	1
I.2 Antecedentes .....	2
I.3 Objetivo y metas .....	6
I.4 Organización del trabajo .....	6
<b>II SENSORES QUÍMICOS DE FIBRA ÓPTICA .....</b>	<b>8</b>
II.1 Clasificación de sensores de fibra óptica .....	8
II.1.1 Sensores extrínsecos.....	13
II.1.2 Sensores intrínsecos .....	17
II.2 Sensores de onda evanescente .....	20
II.3 Sensores basados en curvaturas .....	23
II.3.1 Macrocurvaturas .....	24
II.3.2 Microcurvaturas. ....	26
II.4 Sensores basados en rejillas de Bragg .....	29
II.5 Sensores basados en efecto Brillouin.....	34
II.6 Sensores distribuidos multicanalizados .....	35
II.6.1 Sensado mediante Reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR).....	36
II.6.2 Sensado con Reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia (OFDR).....	45
II.6.3 Sensado por multicanalización por división de longitud de onda (WDM) .....	50
II.6.4 Sensado usando Análisis de transmisión / reflexión de la potencia (ATR).....	52
II.7 Conclusiones del capítulo II.....	52
<b>III POLÍMEROS SENSIBLES AL HIDROCARBURO .....</b>	<b>54</b>
III.1 Introducción .....	54
III.2 Descripción de las propiedades mecánicas de los polímeros.....	54
III.2.1 Hinchamiento del polímero bajo influencia de hidrocarburo .....	57
III.3 Polímeros sensibles al hidrocarburo .....	58
III.4 Investigación experimental del comportamiento de una goma de <i>butyl</i> bajo influencia de gasolina .....	62
III.5 Conclusiones.....	71
<b>IV MECANISMO DE SENSADO BASADO EN POLÍMEROS EXPANSIBLES .....</b>	<b>72</b>
IV.1 Introducción.....	72
IV.2 Mecanismo basado en pérdidas por curvaturas.....	73
IV.2.1 Pérdidas por macrocurvaturas producidas por materiales expansibles...	74

IV.3 Mecanismo de sensado basados en rejillas de Bragg.....	81
IV.3.1 Sensor utilizando una rejilla de Bragg.....	81

**CONTENIDO (continuación)**

	Pág.
IV.3.2 Sensores utilizando doble rejilla de Bragg .....	86
IV.4 Conclusión del capítulo IV .....	91
<b><u>V INTERROGACIÓN DE SENSORES DISTRIBUIDOS PARA DETECCIÓN DE FUGAS DE HIDROCARBURO.....</u></b>	<b><u>92</u></b>
V.1 Introducción .....	92
V.2 Interrogación de sensores basado en rejillas de Bragg .....	94
V.2.1 Interrogación de sensores basados en una sola rejilla.....	94
V.2.2 Interrogación de sensores basados en doble rejilla de Bragg.....	94
V.3 Localización de perturbaciones usando (OTDR).....	95
V.3.1 Sensor de fibra óptica distribuido para detección de hidrocarburo con OTDR .....	96
V.4 Localización de perturbaciones mediante COFDR.....	99
V.4.1 Sensor para detección de fugas de hidrocarburo basados en COFDR. ...	99
V.4.2 Limitaciones teóricas de máxima distancia.....	110
V.4.3 Limitaciones de resolución espacial.....	110
V.4.4 Análisis de la relación señal a ruido.....	114
V.5 Análisis de transmisión y reflexión (ATR).....	119
V.5.1 Principio de localización de la perturbación mediante ATR .....	119
V.5.2 Simulación numérica de la relación transmitida / reflejada.....	122
V.5.3 Resultados numéricos para localización de pérdidas. ....	126
V.5.4 Sensor para detección de fugas de gasolina. ....	129
V.5.5 Estimación en el error de localización de la perturbación .....	134
V.6 Conclusiones del capítulo V.....	139
<b><u>VI CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....</u></b>	<b><u>141</u></b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sensando: a) Distribuido, b) casi-distribuido y c) multi-punto.	11
Figura 2. Clasificación de sensores de fibra óptica	13
Figura 3. Sensores Extrínsecos.	15
Figura 4. Sensores Intrínsecos. Sensores basados en los parámetros ópticos.	18
Figura 5. Mecanismo para transducir una perturbación a la fibra.	19
Figura 6. Clasificación de los mecanismos de sensado.	20
Figura 7. Principio de operación para detección química utilizando una onda evanescente.	22
Figura 8. Espaciamiento del modo del grupo de modo para dos fibras con los mismos parámetros ( $a=25\text{m}$ , $n_1=1.45$ , $n_2=1.4316$ , $\Delta=0.01267$ , $\lambda=1\ \mu\text{m}$ ). A) Fibra de índice gradual con N=328 modos o M= 18 grupos modales. B) Fibra de índice escalonado con N = 656 modos o M =25 grupos modales.	29
Figura 9. Fabricación de rejillas de Bragg basada en exposición holográfica y de mascarilla de fase.	31
Figura 10. Propiedades básicas de transmisión y reflexión de las rejillas de Bragg.	32
Figura 11. Sensores distribuidos multicanalizados.	36
Figura 12. Dispersión dentro de una fibra de largo $W$ .	39
Figura 13. Diagrama esquemático del OTDR.	41
Figura 14. Ramas de la reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia.	45
Figura 15. a) Formas de frecuencia de los haces de referencia y prueba y b) diagrama esquemático de la técnica C-OFDR.	48
Figura 16. Arreglo de sensores multicanalizados por división de longitud de onda.	51
Figura 17. Aumento de volumen de un polímero.	56
Figura 18. Diferentes polímero sumergidos en varios hidrocarburos.	60
Figura 19. Un polímero expuesto al vapor y líquido.	60
Figura 20. Banco experimental para medir la expansión del polímero.	63
Figura 21. Banco de medición con muestra en contacto directo con gasolina.	64
Figura 22. Banco de medición con muestra en contacto indirecto con gasolina, es decir, expuesta al vapor en saturación a 20 °C.	65
Figura 23. Banco experimental utilizando una muestra en contacto directo con peso adicional.	65
Figura 24. Exposición directa para una muestra con diferentes tiempos de exposición a la gasolina.	68
Figura 25. Exposición directa para una muestra en 5 ciclos de húmedo-seco.	68
Figura 26. Saturación en exposición directa de la muestra hasta la saturación.	69
Figura 27. Saturación con exposición al vapor hasta llegar a la saturación del polímero.	69
Figura 28. Saturación en exposición directa de la muestra con peso adicional hasta la saturación del polímero.	70

Figura 29. Comparación de los tiempos de saturación bajo distintas condiciones.	70
---	----

**LISTA DE FIGURAS (continuación)**

	Pág.
Figura 30. Mecanismos para producir curvaturas.	74
Figura 31. Banco de medición experimental para medición de pérdidas por curvaturas.	75
Figura 32. Dependencia de la atenuación dependiendo de la altura de lab jack.	76
Figura 33. Dependencia de la atenuación de una fibra monomodal con respecto al periodo de perturbación para dos alturas específicas del lab jack (314 kPa y 519 kPa).	77
Figura 34. Dependencia espectral de la atenuación.	78
Figura 35. Atenuación experimental para sensor de fibra monomodal.	79
Figura 36. Atenuación experimental para sensor de fibra multimodal.	79
Figura 37. Configuración del sensor de una rejilla de Bragg.	84
Figura 38. Banco experimental del sensor de prueba para una rejilla de Bragg.	85
Figura 39. Dependencia temporal de la longitud de onda de Bragg del sensor bajo influencia de gasolina.	85
Figura 40. Configuración del sensor de doble rejilla de Bragg.	86
Figura 41. Banco experimental del sensor de prueba para doble rejillas de Bragg.	89
Figura 42. Dependencia del termino de energía de interferencia sobre el tiempo de influencia de gasolina.	89
Figura 43. Comportamiento del espectro de reflexión con respecto al tiempo durante el periodo de humedad y secado.	90
Figura 44. Interrogación de sensores basados en una rejilla de Bragg.	94
Figura 45. Interrogación de sensores basados en doble rejilla de Bragg.	95
Figura 46. Esquemático de operación OTDR y construcción del sensor.	97
Figura 47. Trazo de la perturbación utilizando OTDR, con promediación de 5 min	98
Figura 48. Trazo de la perturbación utilizando OTDR, con promediación de 10 seg.	98
Figura 49. Trazo de la fibra sin perturbación utilizando OTDR.	99
Figura 50. Espectro de batimiento a) sin influencia de gasolina, b) 30 minutos bajo la influencia de gasolina entre la primera y segunda rejilla y c) cuarenta minutos bajo influencia de gasolina.	102
Figura 51. Banco experimental para probar un sensor distribuido para detección de hidrocarburo.	103
Figura 52. Diagrama esquemático del sensor de fibra con elementos sensitivos.	103
Figura 53. Evolución del espectro de batimiento bajo influencia de gasolina entre la 1 <sup>ra</sup> y 2 <sup>da</sup> rejilla.	104
Figura 54. Dependencia de la señal de batimiento de las rejillas de Bragg en el tiempo.	105
Figura 55. Dependencia de la frecuencia de batimiento con respecto a la frecuencia de modulación. a) 1 <sup>era</sup> rejilla, b) 2 <sup>da</sup> rejilla y c) 3 <sup>era</sup> rejilla.	106
Figura 56. Evolución de la transmisión de la fibra bajo prueba durante el ciclo húmedo-seco.	107

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

	Pág.
Figura 57. Espectro de batimiento después de 40 minutos en influencia de gasolina 20 cm de longitud. a) Antes de la 1 <sup>ra</sup> rejilla, b) entre la 1 <sup>ra</sup> y 2 <sup>da</sup> rejillas y c) después de la 2 <sup>da</sup> rejilla.	108
Figura 58. a) Corrimiento de la trayectoria del borde del espectro contra la distancia entre las rejillas y b) espectro después de 40 minutos en influencia de gasolina	109
Figura 59. Diferentes caminos para tres reflexiones.	118
Figura 60. Relación S/N para los límites superior a) e inferior b) y c) tomando en cuenta el ruido del fotodetector $P_{NPh}$ .	118
Figura 61. Comportamiento de las potencias transmitida y reflejada con pérdidas en el extremo final de la fibra.	120
Figura 62. Comportamiento de las potencias transmitida y reflejada con pérdida al inicio de la fibra.	121
Figura 63. Comportamiento de las potencias transmitida y reflejada con pérdida a la mitad de la fibra.	121
Figura 64. Relación de potencias transmitida y reflejada en distintos puntos a lo largo de la fibra desde cero pérdidas hasta pérdida total.	122
Figura 65. Comportamiento de las potencias transmitida y reflejada con pérdida en cualquier lugar de la fibra para simulación.	122
Figura 66. Relaciones teóricas entre las potencias normalizadas transmitida al cuadrado y de retrodispersión de Rayleigh para pérdidas inducidas por curvatura en diferentes localizaciones espaciadas igualmente a lo largo de la fibra de prueba.	126
Figura 67. Relaciones teóricas entre las potencias transmitidas y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas para pérdidas inducidas por curvatura en diferentes localizaciones espaciadas igualmente a lo largo de la fibra de prueba.	127
Figura 68. Relaciones teóricas entre el cuadrado de la potencia transmitida normalizada y la de retrodispersión de Rayleigh para pérdidas inducidas por curvatura en diferentes localizaciones espaciadas igualmente a lo largo de la fibra de prueba.	128
Figura 69. Diagrama esquemático experimental para el método ATR.	129
Figura 70. Construcción del elemento sensitivo de fibra óptica.	131
Figura 71. Potencia transmitida normalizada durante el ciclo húmedo – seco. (o influencia de gasolina, + secado).	132
Figura 72. Relaciones entre las potencias transmitida normalizada y la de retrodispersión de Rayleigh normalizadas durante ciclos de húmedo – seco. (o bajo influencia de gasolina, + secado, – dependencias teóricas).	132

### LISTA DE FIGURAS (continuación)

---

	Pág.
Figura 73. Relación entre el cuadrado de la potencia transmitida normalizada y la de retrodispersión de Rayleigh normalizada durante ciclos de húmedo – seco. (O bajo influencia de gasolina, + secado, – dependencias teóricas).	133
Figura 74. Trazo de la perturbación utilizando OTDR, con promediación de 10 min.	133
Figura 75. Error relativo de localización de la perturbación para el método ATR.	135
Figura 76. Mecanismo para inducir pérdidas.	135
Figura 77. Variaciones de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada en el tiempo para fuertes pérdidas inducidas en el extremo de la fibra de prueba cercana del extremo final de la fibra.	136
Figura 78. Variaciones de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada en el tiempo para fuertes pérdidas inducidas en el extremo de la fibra de prueba cercana a la fuente.	136
Figura 79. Relación entre la potencia normalizada transmitida y de retrodispersión de Rayleigh para pérdidas inducidas por curvatura en 2844 m (O) y en 2839 m ( $\Delta$ ).	138
Figura 80. Relación entre el cuadrado de la potencia transmitida y de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizadas para pérdidas inducidas por curvatura. en 2844 m (O) y en 2839 m ( $\Delta$ ).	139

# Sensor de fibra óptica distribuido para medición de fugas de hidrocarburos

Formatted: Bullets and Numbering

## Introducción

### Motivación

Los sensores de fibra óptica son esencialmente un medio, por el cual, la luz que es guiada dentro de la fibra, se puede modificar en respuesta a una influencia externa física, química, biológica, biomédica o similar. Las potenciales ventajas de los sensores de fibra óptica, tienen origen en el hecho que la señal modulada se puede transmitir desde y hacia la región sensada sin necesidad de conexión eléctrica. Esto proporciona las siguientes características principales: inmunidad de interferencia electromagnética, eliminación de problemas con la separación del plano de tierra y eléctrico con regulaciones seguras, pasividad química, pequeño y bajo peso ya que el medio de transmisión es la fibra, potencialmente su alta sensibilidad y la habilidad de interactuar con una amplia gama de mediciones y su capacidad de multicanalización [Culshaw, 1988]. La fibra óptica tiene la habilidad para hacer mediciones distribuidas en estructuras largas, por ejemplo, mediciones distribuidas de tensión, distribución de temperatura en calentadores o presión en recipientes. Estos sensores permiten medir un determinado parámetro como una función de la longitud a lo largo de la fibra. [Dakin, 1992].

La detección de combustibles peligrosos y derrames químicos en la petroquímica se ha realizado hasta la fecha predominantemente con sensores eléctricos en puntos o monitoreando el cambio de presión dentro de un ducto. Estos métodos son limitados para detectar si ha ocurrido fuga, o en el mejor de los casos localizar el derrame en la algún punto específico. Los sensores eléctricos tienen un riesgo adicional; las explosiones donde ocurre el derrame. Los sensores electro-químicos tienen intervalo de temperatura reducido y su tiempo de vida es corto, además están sujetos a interferencia con gases, el tiempo de vida del sensor es más amplio en áreas muy secas y muy caliente.

El éxito de los sensores de fibra óptica es que pueden enfrentar la dificultad de medición de situaciones donde los sensores convencionales no son de fácil acceso en un ambiente de riesgo. Los sensores de fibra óptica tienen una serie de características familiares: son compactos y ligeros (en general, ocupan muy poco espacio), se pueden usar en multicanalización efectiva en redes de una sola fibra y son inmunes a interferencia electromagnética (así no hay flujo de corrientes en el punto sensado). Sin embargo, el reto es que deben producir en un bajo costo.

Utilizar sensores fibra óptica es una excelente técnica para detección de fugas de hidrocarburo por todas las ventajas mencionadas anteriormente. La fibra óptica como sensor para detección de hidrocarburo necesita estudiarse ya que no se ha desarrollado ampliamente en ésta área, además que en el mercado existen muy pocas alternativas.

### Antecedentes

Los sensores modernos de fibra óptica deben su desarrollo a dos de los más importantes avances científicos hechos en los años 60 (el láser en 1960 y la fibra óptica con baja pérdida en 1966). Por consiguiente, a principio de los 70's se realizaron algunos de los primeros experimentos con fibra óptica de baja pérdida con propósitos de sensado.

La principal dirección de investigación en esta área hoy ha producido una gama de técnicas basadas en fibra óptica, la cual, se puede utilizar para una variedad de sensores con diferentes propósitos, dando así, cimientos para una tecnología de medición efectiva, la que se puede completar con métodos convencionales.

Formatted: Bullets and Numbering

Investigaciones realizadas por varios grupos han confirmado que los sensores de fibra pueden sobrevivir en ambientes difíciles, por ejemplo, en rigurosas pruebas de radiación y esto es esencialmente verdadero en el campo de desarrollo de Bragg y sensores basados en rejillas [Grattan y Sun, 2000].

Durante las dos últimas décadas se han propuesto muchos esquemas diferentes y principios de operación de los sensores de fibra [Barnoski y Jensen, 1976], incluyendo sensores basados en dispersión Brillouin [Horiguchi, 1995] y [Shimizu *et al.*, 1994A], pérdidas por microcurvaturas inducidas en la fibra [Vivek *et al.*, 1995], rejillas de Bragg en fibra [Askins *et al.*, 1995], entre otros.

Un sensor de fibra óptica se puede definir como un dispositivo en el cual, una señal óptica es modulada en respuesta a una determinada medición, de tal manera que la medición se recupera mediante procesamiento de señal óptica. Para producir este cambio se necesita un mecanismo de sensado, para esto, existen varios, entre ellos se encuentran, mediante el uso de rejillas de Bragg, por medio de curvaturas y en dispersión Brillouin. Los sensores basados en rejillas de Bragg grabadas en el núcleo (Fiber Bragg Grating, FBG) de la fibra atraen la atención de investigadores e ingenieros de diferentes áreas, desde la construcción e industria hasta la aviación [Rao, 1999]. El interés es de la única combinación de las características del sensor de rejillas de Bragg, tales como dieléctrico natural, una alta capacidad de multicanalización, etc. Comúnmente, las rejillas de Bragg se usan en sensores de tensión y temperatura. Para construir sensores basados en FBG para medición de un agente externo, se lleva a cabo con un material adicional sensible o transductor, que tensa a la rejilla de Bragg bajo la influencia externa. La rejilla de Bragg es atada a un material especial para medición de voltaje y corriente eléctrica [Pacheco *et al.*, 1999], [Henderson *et al.*, 1997], detección de hidrógeno [Peng *et al.*, 1999].

Una de las técnicas de medición distribuida se basa en las pérdidas producidas por microcurvaturas (una distorsión de la fibra óptica con forma cilíndrica), causando pérdidas significativas tanto en fibras monomodo como multimodo. En una publicación de Marcuse [Marcuse, 1976B] presenta las pérdidas producidas por curvaturas en fibra monomodo. Por otro lado, en las fibras multimodo, son menos predecibles en su comportamiento [Dakin, 1992]. Los primeros sensores de este tipo fueron propuestos y demostrados en 1980 por Fields [Fields *et al.*, 1980A] y [Fields, 1980B], aunque ya se habían realizado experimentos donde se demostraba la modulación de intensidad por vibración inducida de la luz en fibras con curvaturas [Nelson, 1977]. Los sensores de microcurvatura demuestran tener un único y propio conjunto de ventajas. Estas ventajas incluyen una eficiencia óptica y mecánica, ensamble mecánico fácil y sensor libre de fallas.

Además, los sensores mediante microcurvaturas se han utilizado en ambientes hostiles tales como zonas de alta temperatura y áreas de riesgo de explosión [Berthold III, 1995]. Los arreglos de microcurvaturas se han utilizado para sistemas de sensado distribuido, por ejemplo, para temperatura [Falco y Debergh, 1989], tensión y otros más. Relativamente su bajo costo comparado con los otros tipos de sensores asegura que se utilizará en muchas aplicaciones [Berthold III, 1995]. La fibra óptica que es periódicamente tensionada o curvada puede acoplar la luz desde modos guiados a modos de recubrimientos [Vivek *et al.*, 1995] y el campo de radiación bajo ciertas condiciones. Estas pérdidas adicionales se miden utilizando un reflectómetro en el dominio del tiempo óptico estándar (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR) obteniendo la localización de las perturbaciones.

Generalmente los sensores basados en curvatura son asociados con microcurvaturas de una fibra, los microcurvadores son ya adaptados a sensores distribuidos. Varios artículos de pérdidas por microcurvaturas de fibra monomodo se han publicado [Berthold III, 1995], [Jones *et al.*, 1998], [Nasta *et al.*, 1994], [Vivek *et al.*, 1995].

En la interrogación de sensores existen varias técnicas, entre ellas se cuentan con OFDR (Optical frequency domain reflectometer), OTDR, entre otras. En reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia, utilizan una onda continua modulada en frecuencia (Frequency Modulate Continuous Wave, FMCW) el intervalo dinámico del sistema es independiente de la resolución espacial. La técnica FMCW [Hymans 1960] tiene un gran potencial para alcanzar una alta resolución espacial sin sacrificar intervalo dinámico. Aplicando éste a reflectometría óptica coherente [Uttam y Culshaw, 1985] gana una ventaja adicional, la alta sensibilidad la cual es característica de la detección óptica coherente [Horiguchi, 1995], [Dakin *et al.*, 1985B].

Investigadores han demostrado una alta resolución con C-OFDR [Dakin *et al.*, 1985B]. En [Froggatt *et al.*, 2000] se muestra que OFDR es una técnica potente para medir tensión distribuida en una fibra óptica y en [Won *et al.*, 2001] se presenta un sensor de fibra óptica casi-distribuido para tensión.

Deleted: *et al*

Formatted

## Objetivo y metas

El principal objetivo es contribuir al área de sensores distribuidos de fibra óptica estudiando y experimentando a nivel laboratorio las diferentes posibilidades para detección de hidrocarburos, utilizando para esto la teoría existente de los esquemas de los principales mecanismos de sensado y sistemas de detección.

Las metas propuestas para este trabajo, es en base a la revisión de sensores de fibra óptica, seleccionar el transductor que sea capaz de producir cambio en la fibra colocado junto a la fibra y investigar sobre las diferentes posibilidades de detectar y localizar el punto donde ocurre la perturbación. Otra de las metas es proponer una nueva forma de interrogación e implementación del sensor.

Las aportaciones de este trabajo de tesis con relación al objetivo y metas mencionadas anteriormente, se presentan en el capítulo IV y V.

## Organización del trabajo

El contenido de la presente memoria está organizado como sigue: en el capítulo 2 se inicia una breve exposición de resultados relacionados con sensores de fibra óptica para detección de químicos, así como la manera en que hemos clasificados los sensores y técnicas de localización.

En el capítulo 3, se estudian algunos de los polímeros sensibles a hidrocarburos, los cuales serán utilizados como transductores en los mecanismos de sensado. En el capítulo 4, se estudian dos principales mecanismos de sensado, rejillas de Bragg y curvaturas, con las cuales al cambiar las propiedades de la luz se detecta que esta ocurriendo una perturbación. Por otro lado, estos mismos mecanismo sirven de prueba del transductor para verificar que el transductor tiene suficiente fuerza para producir los cambios en la fibra.

Una vez que se tiene el mecanismo de sensado, la perturbación tiene que ser detectada y localizada. En el capítulo 5 se presentan dos técnicas de localización que han sido estudiadas e implementadas, ellas son: utilizando reflectometría óptica coherente en el dominio de la frecuencia (*COFDR* por sus siglas en inglés *Coherent Optical Frequency Domain Reflectometer*) y la segunda es haciendo un análisis de la potencia transmitida y reflejada de la fibra sensor (*ATR*). Esta última técnica es la principal contribución de ésta tesis. Finalmente, se dedica el capítulo 6 a dar algunas conclusiones referentes a los resultados expuestos en esta memoria, así como trabajo futuros a realizar.

[Allen 1972] Allen P. W., 1972, Natural Rubber and the Synthetics. New York, Wiley.

[Askins 1995] Askins C. G., M.A. Putnam, E. J. Friebele, 1995, "Instrumentation for interrogating many-element fiber Bragg grating arrays", Proc SPIE vol. 2444, 257-266 pp.

[Ayra 1998] Ayra V., K.A. Murphy, A. Wang, R. O. Claus, 1995, J. Lightwave Technol. LT-13, 1998 pp.

[Bao 1994] Bao X., D. J. Webb y D. A. Jackson, 1994, "Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber", Optics Lett, 19 (2), 141-143 pp.

Formatted: Bullets and Numbering

Formatted: Bullets and Numbering

- [ Bao 1995] Bao X., J. Dhliwayo , N. Heron, D. J. Webb y D. A. Jackson, 1995, “Experimental and Theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering”, *J. Lightwave Technol.*, 13, 1340-1348 pp.
- [Barnoski 1976] M. K. Barnoski y S. M. Jensen, 1976, “Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics”, *Appl. Opt.*, 15 ( 9), 2112-2115 pp.
- [Beller 1998] Beller J. , ‘OTDRs and Backscatter Measurements’, 1998, *Fiber Optic Test and Measurement*, En: D. Derickson. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- [Beltran 2002 A] Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, A. Marquez, R. Lopez y Spirin V.V., 2002, “Pérdidas por macrocurvaturas en fibras ópticas producidas por materiales suestes y expandibles para la detección de fugas de hidrocarburos”, *Revista Mexicana de Física* 47 (5), 421-424 pp.
- [Beltran 2002 B] Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, J. Leon-Baez, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez-Lucero, 2002, Fiber bend losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection, *Optics communication*, 204, 145-150 pp.
- [Berthold III 1995] Berthold III J. W., 1995, “Historical Review of microbend Fiber-Optic Sensor”, *Journal of Lightwave Technology*, 13 (7), 1193 pp.
- [Brinkmeyer 1980] Brinkmeyer E., 1980, *Electron. Lett.* 16 (1980), 329 pp.
- [Buck 1995] Buck J. A., 1995, *Fundamentals of Optical fibers*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, New York: Wiley.
- [Clark 1995] Clark T. y H. Smith, 1995, “Microbend fiber optic sensors”, in *Fiber Optic Smart Structures*, editado por E. Udd: John Wiley & Sons, New York.
- [Conduit 1981] Conduit, A. J., D.N. Payne, A. H. Hartog y M. P. Gold, 1981, Optical fibre diameter variations and their effect on backscatter loss measurement, *Electron. Lett.*, 17, 308-310 pp.
- [Culshaw 1988] Culshaw B. 1988, “Optical fiber sensors: principles and components”, *Basic concepts of optical fiber sensors I*, Editado por Culshaw B. y Dakin J.
- [Dakin 1985 A] Dakin, J. P., D. J. Pratt, G. W. Bibby y J. N. Ross, 1985, “Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector”, *Electron. Lett.* 21 (13), 569-570 pp.
- [Dakin 1985 B] Dakin J. P., D.J. Pratt., G.W. Bibby y J. N. Ross, 1985, “Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector”, *Electron. Lett.* 21 (13), 569-570, 1985 pp.
- [Dakin, 1992] Dakin J. P., 1992, “Distributed optical fiber sensors”, *Distributed and Multiplexed fiber optic sensors II SPIE 1797*, 76-106 pp.
- [Dakin] Dakin J. y B. Culshaw, 1999, “Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends”, Vol. 4, 1999.
- [Dakin 1999] Dakin J., S. Mackenzie y Hodgkinson J., 1999, “Optical Fiber – Chemical Sensing using direct Spectroscopy”, *Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends*, Vol. 4, editado por John Dakin and Brain Culshaw.
- [Derickson 1998] Derickson Dennis, 1998, “Fiber optic Test and Measurement”, editado por Derickson Dennis.
- [Di Vita 1980] Di Vita, P. y U. Rossi, 1980, “The backscattering technique: its field of applicability in fibre diagnostics and attenuation measurements”, *Optical Quantum Electron.*, 11, 17-22pp.
- [Eickhoff 1981] Eickhoff W. y R. Ulrich, 1981, “Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber”, *Appl. Phys. Lett.* 39 (9), 693-695 pp.
- [Falco 1989] Falco L. y P. Debergh, 1989, “Bimorphous distributed transduce for temperature threshold sensor”, *Proc. SPIE vol. 1011*, 166-172 pp.
- [Ferrel 1988] Ferrel T.L., 1988, “Fiber-Optic Surface-Enhanced Raman System for field Screening of hazardous Compounds”, *Proc. First International EPA Symposium on Field Screening Methods for Hazardous Waste Site Investigations*, Las Vegas, Nev.
- [Fields 1980 A] Fields J. N., 1980, “Pressure sensor”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 67, 816-818, pp.
- [Fields 1980 B] Fields J. N., 1980, “Attenuation of a parabolic-index fiber with periodic bends”, *Appl. Phys. Lett.*, 36, 799-801 pp.
- [Franklin] Franklin Hodge, “Buytl rubber sheeting”, Franklin Hodge Industries Limited, U.K.

- [Froggatt 2000] Froggatt M., B. Childers, J. Moore, T Erdogan, 2002, "High density strain sensing using optical frequency domain reflectometry", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical fiber Sensors, Proc. SPIE Vol. 4185, 249-255 pp.
- [Gambling 1978] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale y R. A. Sammut, 1978, "Measurement of radiation loss in curved singlemode fibers", *Microwaves, Opt. Acoust.*, 2 (4), 134-140 pp.
- [Gambling ] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale, 1979, "Curvature and microbending losses in single mode optical fibres", *Optical and Quantum Electronics* 11, 43-59 pp.
- [Gareth ] Gareth, Pierce S., Alistar MacLean, Brian Culshaw, 1995, "Optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend based optica fibre sensors"
- [Garcus ] Garcus Dieter, T. Gogolla, K. Krebber y F. Schliep, 1997, "Brillouin Optical-Fiber Frequency-Domain Analysis for distributed temperature and strain Measurements", *Journal of Lightwave Technol.* 15 (4), 654-662 pp.
- [Gauthier 1997] Gauthier R. C. y C. Ross, 1997, "Theoretical and experimental consideration for single-mode fiber optic bend-type sensors", *Appl. Opt.*, 36 (25), 6264-6273 pp.
- [Giles 1983] Giles I. P., D. Uttam, B. Culshaw y D. E. N. Davies, 1983, "Coherent Optical-fibre sensors with modulated laser sources", *Electronics Letters*, 19, 14-15 pp.
- [Grassino] [Grassino B. Susan
- [Grattan 2000] Grattan K.T.V. y T. Sun, 2002, "Fiber Optic sensor technology: an overview", *Sensors and Actuators* 82, 40-61 pp.
- [Gysel 1990] Gysel P. y R.H.Staubli, 1990, "Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fiber", *J. Lightwave Technol.* 8 (4), 561-567 pp.
- [Hartog 1995] Hartog H., 1995, "Distributed fiber optic sensors", en *Optical fiber Sensor Technology*, editado por K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 347-382 pp.
- [Healey 1986] Healey, 1986, "Instrumentation principles for optical time domain reflectometry", *J. Phys. E: Sci Inst.*, 19, 334-341 pp.
- [Henderson 1997] Henderson PJ, N. E. Fisher y D.A. Jackson, "Current metering using fibre-grating based interrogation of a conventional current transformer", *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor*, Williamsburg, USA, 186-9, 1997 pp.
- [Hewlett-Packard ] Hewlett-Packard company, 1992, "High-speed lighthwave component analysis", Application Note 1550-6
- [Horiguchi 1989 A] Horiguchi T. y M. Tateda, 1989, "Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave", *Opt. Lett.*, 14 (8), 408-410 pp.
- [Horiguchi 1989 B] Horiguchi T. y M. Tateda, 1989, "BOTDA Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory", *Journal Lightwave Technol.*, 7, 1170-1176 pp.
- [Horiguchi 1990] Horiguchi T., K. Shimizu, T. Kurashima, T., M. Tateda y Y. Koyamada, 1990, "Development of distributed sensing technique using Brillouin Scattering", *J. of Lightwave Technol.*, 15 (8), 1038-1040 pp.
- [Horiguchi 1995 A] Horiguchi T., Shimizu, K., T. Kurashima, M. Tateda y Y. Koyamda, 1995, "Development of a Distributed Sensing Technique using Brillouin Scattering", *J. Lightwave Techn.*, 13 (7), 1296-1302 pp.
- [Horiguchi 1995 B] Horiguchi Tsuneo, 1995, "Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering", *Journal of Lightwave Technology*, 13 (7).
- [Hymans 1960] Hymans A. J. y Lait J., 1960, "Analysis of a frequency modulated continuous wave ranging systems", *Proc. IEEE*, 107B, 365-372 pp.
- [IISRP ] IISRP company, "Butyl rubber", International Institute of Synthetic Rubber, inc.
- [Jones 1998 A] Jones J.D.C., R. McBride, 1998, "Multiplexing optical fiber sensor", *Optical Fiber sensor technology*, editado por Grattan K. y Meggot B.T., 12, London: Chapman & Hall.
- [Jones 1998 B] Jones S. L., G. Murtaza y J. M. Senior, 1998, "Single-Mode Optical Fiber Microbend Loss Modeling Using the Finite Difference Beam Propagation Method", *Optical Fiber Technol.* 4 pp. 471-479.

- [Kersey 1996] Kersey A. D., 1996, "A review of recent developments in fiber optic sensor technology", Optical fiber technology, 291-317 pp.
- [Kersey 1997] Kersey A. D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M, Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J., 1997, "Fiber grating sensors", J. Lighthwave Technol. 15 (8), 14442-63 pp.
- [Kersey 1997B] Kersey Alan D., 1997, "Optical fiber sensors", Optical measurement and applications, editado por Pramod K. Rastogi, Artech House, Boston, 217-254 pp.
- [Kurashima 1990] Kurashima T., T. Horiguchi y M. Tateda, 1990, "Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers", Opt. Lett., 15 ( 8), 1038-1040 pp.
- [Kuzin 2001] Kuzin E.A., G. Beltran-Perez, J. Camas, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez, 2001, "Fiber losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection", Fiber Optic Sensor Technology and Applications, Newton, USA.
- [Kvasnik 1989] Kvasnik y McGrath A. D., 1989, "Distributed chemical sensing utilizing evanescent wave interactions", Chemical, Biomedical and Environmental Sensors, SPIE 1172, 75-82 pp.
- [Lecoeuche, 1999] Lecoeuche V., D. J. Webb, C.N. Pannell y D. A. Jackson, 1999, "25 km Brillouin based single-ended distributed fibre sensor for threshold detection of temperature or strain", Optics communications, 168, 95-102 pp.
- [Liaw 2000] Liaw S.K., S.L. Tzeng, y .J. Hung, 2001, "Rayleigh backscattering induced power penalty on bidirectional wavelength-reuse fiber systems", Opt. Comm. 188, 63-67 pp..
- [Lise] Lise Anderson Betty, 1995, "New approach to microbending fiber optic sensors: varying the spatial frequency", Optical Engineering, 34 (1), 208-213 pp.
- [López 2000] López R.M., V. Spirin, S. Miridonov, y M. Shlyagin, 2000, "Reflectometría óptica en el dominio de frecuencia para detección de fugas de hidrocarburos utilizando Sensores de fibra Óptica Basado en Microcurvaturas", XLIII Congreso Nacional de Física 2000.
- [López 2001] López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Márquez y A. Márquez, 2001, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend and macrobend-based fiber optic hydrocarbon sensors", Proc. SPIE vol. 4328, 114-121 pp.
- [López 2002A] López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, 2002, "Fiber optic distributed sensor for hydrocarbon leak localization based on transmission / reflection measurement", Optics & Laser Technology, 34 (6), 465-469 pp.
- [López 2002B] López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, 2002, "Sensor de Fibra óptica distribuido para localización de fugas de hidrocarburo basado en mediciones de transmisión / reflexión", Revista Mexicana de Física, 48 (5), 457-462 pp.
- [López 2002C] López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, G. Beltrán, E.A.Kuzin, A. Márquez, 2003, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of bend-based fiber optic hydrocarbon sensors", Optical fiber technology, aceptados bajo correcciones.
- [MacDonald 1981] MacDonald R. I., 1981, "Frequency domain optical reflectometer", Applied Optics. 20 (10), 1840-1844 pp.
- [MacDonald 1990] MacDonald R. I. y B. E. Swekla, 1990, "Frequency domain optical reflectometer using a GaAs optoelectronic mixer", Applied Optics 29 (31), 4578-4582 pp.
- [MacLean 2000A] MacLean, C. Moran, G. Thursby, S. G. Pierce, B. Culshaw, N.B. Graham, 2000, "Distributed Fibre Optic Sensors for Humidity and Hydrocarbon detection, Smart Structure and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation, SPIE vol. 3986, 342-351 pp.
- [MacLean 2000B] MacLean, C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw, D. Marsh, V. Watson y Geoff Andrews, 2000, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, SPIE Vol. 4185, 382-385 pp.
- [MacLean 2000C] MacLean A., C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw y D. Marsh, 2000, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", Smart Structure and Materials, SPIE vol. 4328, 47-53 pp.
- [Marcuse 1976 A] Marcuse D., 1976, "Curvature loss formula for optical fibers", J. Opt. Soc. Am., 66 (3), 216-220 pp.

- [Marcuse, 1976B] Marcuse D., 1976, "Microbending losses of single mode, step-index and multimode, parabolic-index fibers", *Bell systems Techn. Journal* 55, 937-955 pp.
- [Michie 1995 A] Michie W. C., B. Culshaw, I. Mckenzie, M. Konstantakis, N. B. Graham, C. Moran, F. Santos, E. Bergqvist, B. Carlstrom, 1995, "Distributed sensor for water and pH measurements using fiber optics and swellable polymeric systems", *Optics Letters* 20 (1), 103 pp.
- [Michie 1995 B] Michie W. C., B. Culshaw, M. Konstantakis, I. Mckenzie, S. Kelly, N. B. Graham, C. Moran, 1995, Distributed pH and water detection using fiber-optic sensors and hydrogels, *J.Lightwave Technol.* 13 (7), 1415 pp.
- [Miridonov 2001] Miridonov S.V., M.G. Shlyagin, D. Tentori, 2001, "Twin-grating fiber optic sensor demodulation", *Optics Communications* 191, 253-262 pp.
- [Mitchell] Mitchell G.L.", 1991, "Intensity-based and Fabry-Perot interferometer sensors", *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, John Wiley & Sons, New York.
- [Morey 1991] Morey, W. W., J. R. Dunphy y G. Meltz, 1991, "Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensor", *Distributed and Multiplexing Fiber-optic Sensor Proc. SPIE* 1586, 216 pp.
- [Morton 1987] Morton M., 1987, *Rubber Technology*, New York: Von Nostrand Reinhold Co., edición 3era.
- [Mussi, 1996] Mussi G. y P. Stamp, 1996, "Polarization effects in C-OFDR", *IEEE Photonics Tech. Letter*, 8 (11), 1513-151 pp.
- [Murtaza 2001] Murtaza G., S.L. Jones, J.M. Senior y N. Haigh, 2001, "Loss Behavior of single-mode Optical Fiber Microbend Sensors", *Fiber and Integrated Optics*, 20, 53-58 pp.
- [Nasta 1994] Nasta M. N., V. Ayra, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1994, "Periodic microbending on single mode optical fibres for multiplexed sensing", *Proc. SPIE, Smart Structures and Materials*, 2191, 475-481 pp.
- [Nelson 1977] Nelson D. F., 1977, "Vibration-induced modulation of fiberguide transmission", *Proc. Topical Meet. on Optical Fiber Transmission TU-E7-1 a TU-E7-4*.
- [Ning 1998] Ning Y. N. y K.T.V. Grattan, 1998, "Optical Fiber Sensor technology: Devices and Technology vol. 2", editado por K.T.V. Grattan y B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 1998
- [Nolan 1991] Nolan D.A., P.E. Blaszyk y E. Udd., 1991., "Optical fibers", *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, John Wiley & Sons, New York.
- [Ohno 2001] Ohno H., H. Naruse, M. Kihara y A. Shimada, 2001, "Industrial Applications of the BOTDR optical fiber Strain Sensor", *Optical fiber technology* 7, 45-64 pp.
- [Pacheco 1999] Pacheco M., F.M. Santoyo, L. A. Zenteno, 1999, "Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg gratin high-voltage sensor", *Measurement Science Technol.* 10 (9), 777 pp.
- [Passy 1994] Passy R., N. Gisin, J. P. von der Weid y H. H. Gilgen, 1994, "Experimental and theoretical investigation of coherent OFDR with semiconductor laser sources", *Journal of Lightwave Technology* 12, 1622-1630 pp.
- [Peng 1999] Peng Y.T., Y. Tang y J.S. Sirkis, 1999, "The characterization of hydrogen sensor based on palladium electroplated fiber Bragg gratings (FBG)", *Proc. SPIE* 3670, 42-53 pp.
- [Peterson 1980] Peterson J. I., S. R. Goldstein, Fitzgerald R. V. y D. K. Buckhold, 1980, "Fiber optic pH probe for physiological use", *Anal. Chem.*, 52, 864 pp.
- [Probst 1989] Probst C. B., A. Bjarklev y S.B. Andreasen, 1989, "Experimental verification of microbending theory using mode coupling to discrete cladding modes", *J. Lightwave Technol.* 7 (1), 55-61 pp.
- [Rabiner 1975] Rabiner L.R. y B. G. Gold, 1975, "Theory and application of digital signal processing", Prentice-Hall, INC.
- [Rao 1999] Rao Y., 1999, "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors". *Opt. Lasers Eng.*, 31, 297-324 pp.
- [Roger, 1980] Roger, A.J., 1980, "Polarization optical time domain reflectometry", *Electron. Lett.* 16, 489 pp.
- [Roger, 2002] Roger A.J., 2002 "Distributed fibre measurement using backscatter polarimetry"

- [Rogers 1994] Rogers A. J., 1994, "High resolution frequency-derived distributed optical fiber sensing", Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors IV, Proc. SPIE 2294, 2 pp.
- [Ross 1982] Ross J.N., 1982, "Birefringence measurement in optical fibers by polarization optical time domain reflectometry", Appl. Opti. 21, 3489 pp.
- [Sharma 1984] Sharma A. B., A.H. Al-Ani y S. J. Halme, 1984, "Constant-curvature loss in monomode fibers: an experimental investigation", Applied Optics, 23 (19), 3297-3301 pp.
- [Shimizu 1994 A] Shimizu Kaoru, T. Horiguchi, Y. Koyamada, T. Kurashima, 1994, "Coherent Self-Heterodyne Brillouin OTDR for Measurement of Brillouin Frequency Shift Distribution in Optical Fibers", Journal of Lightwave Technology, 12 (5), 730-736 pp.
- [Shimizu 1994 B] Shimizu, K., T. Horiguchi y Y. Koyamada., 1994, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network using Brillouin OTDR", Optical Fiber Sensor 10, 142-145 pp.
- [Shimizu 1995] Shimizu K., T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network by use of Brillouin optical time-domain reflectometry", Opt. Lett., 20 (5), 507-509 pp.
- [Shlyagin 1997] Shlyagin M.G., S.V. Miridonov y D. Tentori, Castillo J., 1997, "Twin grating -based interferometric fiber sensor", 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor. In: OSA Technical Digest Series, Vol. 16, 472-474 pp.
- [Shlyagin 1999] Shlyagi, M. G., S. V. Miridonov, D. Tentori, F. J. Mendieta y V. V. Spirin, 1999, "Multiplexing of grating-based fiber sensors using broadband spectral coding," Proceedings of SPIE vol. 3541, 271-278 pp.
- [Spammer 1997] Spammer S.S., P. L. Swart y A.A. Chitchebakov, 1997, "Merged Sagnac-Michelson Interferometer for distributed disturbance detection", Journal of Lightwave Technol., 15 (6), 1-4 pp.
- [Spillman 1997] Spillman W.B. Jr, 1997, "Fiber optics and smart structures", Optical fiber Sensors: Applications, analysis, and future trends vol. 4, editado por J. Dakin y B. Culshaw, Artech House, Boston, London.
- [Spirin 2000] Spirin V., S. Miridonov, M. Shlyagin, I. Márquez y R.M. López, 2000, "Diferential twin Bragg grating sensor for temperature and strain gradient measurement", EOS/SPIE International Symposium on Applied Photonics, Glasgow, Escocia, Reino Unido..
- [Spirin 1999 A] Spirin V., I. Márquez, R. López, M. Shlyagin y S. Miridonov, 1999. "Investigación del nuevo sensor químico basado en rejillas de Bragg en fibra óptica", XLII Congreso Nacional de Física 1999.
- [Spirin 1999 B] Spirin V.V., M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, F. J. Mendieta Jiménez, R. M. López Gutiérrez, 1999, "Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection", Optics and Laser in Engineering, 32 (5),. 497 – 503 pp.
- [Spirin 2002 A] Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002, "Transmission / reflection analysis for distributed optical fibre loss sensor interrogation", Electronics Letters, 38 (3), 117 pp.
- [Spirin 2002 B] Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002, "Alarm-condition detection and localization using Rayleigh scattering for a fiber-optic bending sensor with an unmodulated light source", Optics Communications, 205 (1), 37-41 pp.
- [Spirin 2002 C] Spirin V. V., R.M. Lopez, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Marquez, E.A. Kuzin, G. Beltran-Perez y Pieter L. Swart, 2002, "Fiber Optic Sensor for Hydrocarbon Leak Detection and Localization", Smart Structures and Materials 2002: Smart Sensor Technology and Measurement Systems, SPIE 4694, 341-348pp.
- [Tateda 1989] Tateda M. y T. Horiguchi, 1989, "Advances in optical time domain reflectometry", Journal of Lightwave Technology, 7 1217-1224 pp.
- [Tesis] Tesis
- [Thévenaz 1998] Thévenaz L., Nikles M., Fellay A., Facchini M. Robert P., 1998, "Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers", Conference on sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for SSM, San Diego, Ca., SPIE Vol. 330, 301-314 pp.

- [Tsuji 1995] Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Coherent optical frequency domain reflectometry for a long single-mode optical fiber using a coherent lightwave source and an external phase modulator", IEEE Photonics Technology Letters 7, 804-806 pp.
- [Tsuji 1997 A] Tsuji K., Shimizu K., Horiguchi T. y Koyamada Y., 1997, "Spatial-resolution improvement in long-range coherent optical frequency domain reflectometry by frequency-sweep linearisation", Electronics Letters 33, 408-410 pp.
- [Tsuji 1997 B] Tsuji, K., Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997, "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave", Journal of Lightwave Technology 15, 1102-1109 pp.
- [Tsuji 1997 C] Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997, "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave", Journal of Lightwave Technology 15, 1102-1109 pp.
- [Tsuji 1998] Tsuji K. y T. Horiguchi, 1998, "Fading noise reduction for coherent optical frequency domain reflectometer with 30 cm spatial resolution and 15 dB dynamic range", Optical Fiber Sensor 13, 584-587 pp.
- [Udd 1991] Udd Eric, 1991, Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists, editado por Eric Udd, John Wiley & Sons, New York.
- [Uttam 1985] Uttam D. y B. Culshaw, 1985, "Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using frequency modulated continuous wave ranging technique", J. Lightwave Technol., 3, 971-977 pp.
- [Vivek 1995] Vivek Arya, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1995, "Microbend Losses in Singlemode Optical Fibers: Theoretical and Experimental investigation", Journal of Lightwave Technology 13 (10).
- [Von der Weid 1997] Von der Weid J. P., R. Passy, G. Mussi y N. Gisin, "On characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometer", J. Lightwave Technol. 15 (7), 1131-1141 pp.
- [Won 2001] Won P.C., L.K Seah y A.K. Asundi, 2001, "FMCW reflectometric optical fiber strain sensor", Smart Structure and Materials Proc. SPIE 4328, 54-62 pp.
- [Yariv 1984] Yariv. A. y P. Yen, 1984, Optical waves in crystals, John Wiley&Sons.
- [Tai 1987] Tai Hideo, H. Tanaka y Toshihiko Y., 1987, "Fiber optic evanescent-wave methane-gas sensor using optical absorption for the 3.392-  $\mu\text{m}$  line of a He=Ne laser", Optics Letters, 12 (6).
- [Brehnan 1988] Brehnan B. W., 1988, "Prototype polarimetric based fiber optic strain gauge", Reviews of progress in quantitative nondestructive evaluation, Plenum Press, New York, 547 pp.
- [Tan 1996] Tan Y., T. C. Tan, 1996, "Modeling and sensing characteristics of an amperometric hydrocarbon sensor", Chemical engineering science, 51(16), 4001-4011 pp.
- [Kashyap] Kashyap Raman, 1999, "Fiber Bragg gratings", Optics and Photonics, Academic Press.
- [Seitz] Seitz, W. Rudolf, 1988, "Chemical sensors based on immobilized indicators and fiber optics", CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry, 19 (2) 135-173 pp.

## *Sensores químicos de fibra óptica*

### **Clasificación de sensores de fibra óptica**

Para la prevención de derrames de hidrocarburos y químicos dañinos, se están incrementando considerablemente las medidas de seguridad forzando a las compañías a instalar equipos que proporcionen señales rápidamente de alerta cuando esté ocurriendo alguna fuga. Las implicaciones comerciales de estos derrames están tomando gran importancia tanto para las penalizaciones financieras como para la legislación a las compañías causantes de la contaminación del medio ambiente. Para reducir las pérdidas de combustible y evitar dañar al medio ambiente se necesita tener un sensor capaz de advertir e identificar la posición donde está sucediendo el derrame en poco tiempo.

La detección de derrames de peligrosos combustibles y químicos en la industria de la petroquímica se ha logrado con sensores eléctricos en puntos o monitoreando el cambio de presión en el tanque o tuberías. Estos métodos son limitados para detectar si la fuga ha ocurrido o para localizar el derrame en algún punto específico. Los sensores eléctricos tienen un riesgo adicional de explosiones donde ocurre el derrame. Se requiere un sistema capaz de localizar con precisión estos eventos reduciría grandemente los riesgos ambientales y daños causados a la tierra.

Para detección de fugas de hidrocarburo existen sensores eléctricos y de fibra óptica. Aquí presentamos algunos ejemplos de sensores eléctricos. En la patente número USD 6452500 tipo A presentan un aparato para monitorear presencia de fluido de hidrocarburo. Este incluye una caja y un cable de sensado montado en una forma como de onda, de este modo formando una pluralidad de secciones de sensado para detección de una cara de hidrocarburo sobre agua. Cuando contacto al hidrocarburo, cada una de las secciones de sensado genera una señal y la señal se suma a la transmisión a la señal receptora a través de la señal de la línea. La firma Robert Bosch GmbH (German Published Patent Application No. 19833087A) presenta la manufacturación de un sensor de hidrocarburo de cerámica utilizando un electrodo exterior. Un sensor de hidrocarburo amperométrico se fabricó mediante un montaje con una capa delgada de catalizador  $7\text{CuO}$ .  $10\text{ZnO}$ .  $3\text{Al}(2)\text{O}(3)$  en lo alto del cátodo de platino de un sensor oxigenado con 9% de zirconia estabilizada ytrria como electrólito. Se desarrolló un modelo teórico de una dimensión para relacionar la respuesta del sensor a un proceso de promediación ocurriendo en la catalización de los óxidos de metal mezclado en la celda de oxígeno [Tan y Tan, 1996]

Los sensores químicos de fibra óptica pueden ofrecer varias ventajas sobre los sensores tradicionales. El pequeño tamaño de los sensores de fibra óptica se complementa por su fuerte inmunidad a interferencia electromagnética, además se pueden instalar en un medio ambiente rudo y tolerar altas temperaturas, vibración, choque y pueden operar en condiciones áspers.

Existen muchos tipos de sensores químicos de fibra óptica que pueden medir la concentración de especies neutrales o cargadas.

Los tres tipos de sensores más utilizados son: distribuidos, casi-distribuidos y de puntos (multipuntos), se muestran en la figura 1. La figura 1 c) muestra, por ejemplo, un sensor de multi-punto, en los que en una fibra se sensa únicamente un punto, se tendría un sensor de punto, pero al repetir este esquema podemos tener un sensor de multipuntos. Con este esquema se pueden medir diferentes parámetros, por ejemplo, monitoreo del nivel del líquido con un prisma, presión o aceleración, entre otros. Los sensores se pueden diseñar para eliminar el modo espacial, de esta manera, la medición se puede determinar a lo largo de la misma fibra, este proceso normalmente es llamado sensado distribuido (a)), aquí la fibra es el elemento activo, la propagación de la luz a través de la fibra se usa no solamente para señal de transmisión, sino para cuantificar el parámetro que va a ser medido. Este principio ha sido empleado ampliamente en mediciones de temperatura utilizando efectos no lineales en la fibra, tales como dispersión Brillouin o Raman o en algunos tipos de sensado de tensión. Existe un tipo de sensor que se encuentra entre los dos mencionados arriba, es el sensor casi-distribuido (figura 1 b)), donde la información de la medición se obtiene puntos predeterminados a lo largo de la fibra [Grattan y Sun, 2000]. Es posible combinar las configuraciones presentadas en la figura 1, tomando una características de cada una de ellas. Se diseño una nueva combinación en este trabajo bajo el principio de

detección distribuida con localización en secciones (*Distributed Detection with Section Localisation, DDSL*) es una combinación entre el distribuido y puntos.

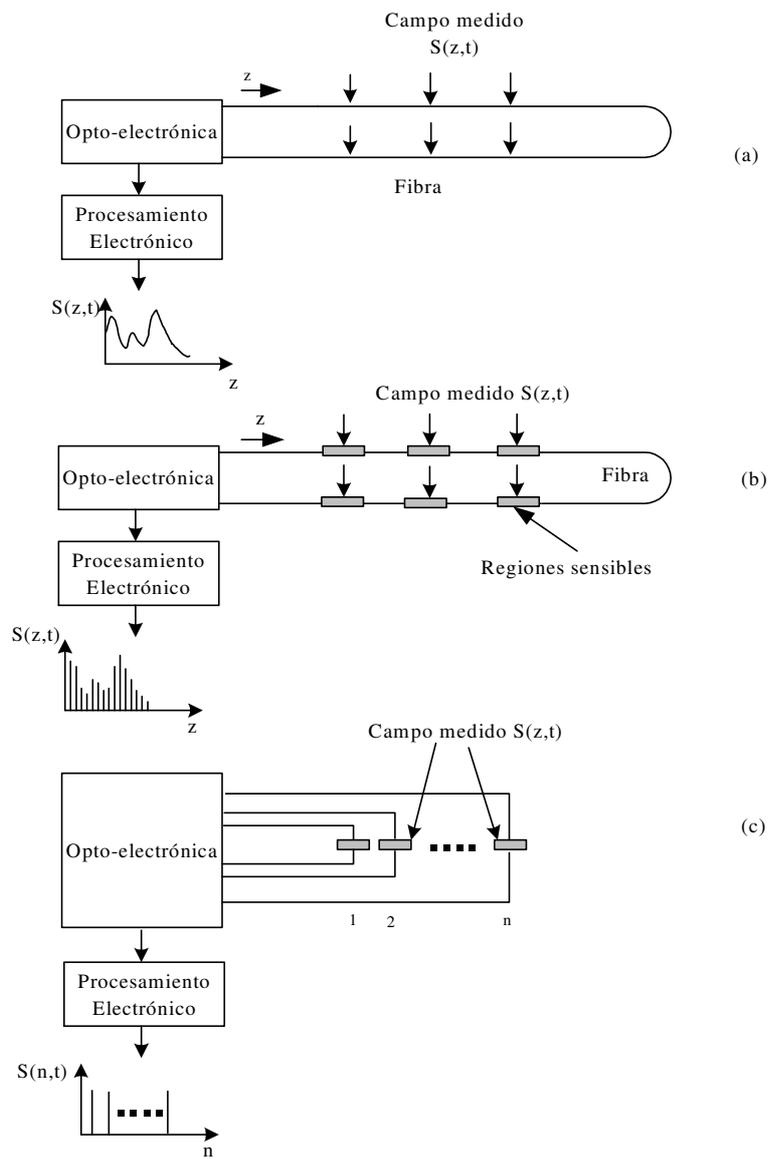


Figura 81. Sensando: a) Distribuido, b) casi-distribuido y c) multi-punto.

La importancia del desarrollo de tecnología de sensores de fibra óptica se ha reflejado en un número de libros de textos y muchos artículos de revisión [Kersey, 1996] y [Grattan y Sun, 2000] son solo una muestra del enorme campo de actividad para estos sensores. La mayoría de estos sensores se concentran en la medición de algún parámetro físico. El sensor óptico no requiere una fuente eléctrica en la localización del sensado y proporciona la capacidad de localización de múltiples eventos que ocurren simultáneamente a lo largo del sensor.

Algunas de las ventajas en el uso e implementación práctica del sensor es el monitoreo continuo para detectar algún evento. Los sensores se pueden clasificar de muchas maneras y un completo esquema de clasificación ha sido dado por Ning y Grattan en [Ning y Grattan, 1998].

Los sensores de fibra óptica se pueden clasificar como se muestra en la figura 2, los cuales se dividen en intrínsecos, donde la interacción ocurre actualmente con un elemento de la misma fibra y los extrínsecos son donde la fibra óptica se utiliza para acoplar la luz, usualmente hacia y desde la región donde el haz de luz es influenciado por la medición. Esto es externo a la fibra, pero puede ser sujetado a este en algún lugar indicado, por fusión, pegado o una por conexión mecánica.

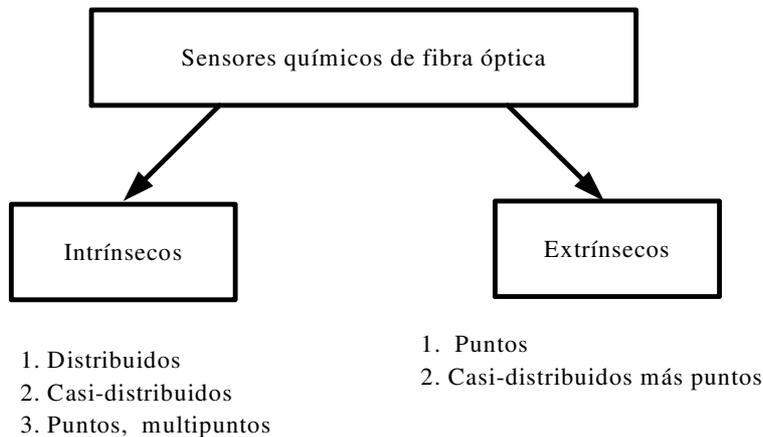


Figura 82. Clasificación de sensores de fibra óptica

### ***Sensores extrínsecos***

En los sensores extrínsecos, la fibra óptica sirve solamente para llevar la luz a y desde un fase reactiva inmovilizada. No es necesario un contacto físico directo entre la fase reactiva y la fibra. Esto puede ser importante en aplicaciones donde cambios frecuentes en la fase reactiva se pueden requerir o donde la medición estuvo para realizarse en un ambiente no adecuado para el resto del sistema óptico.

Típicamente las configuraciones de los sensores extrínsecos se muestran en la figura 3 [Seitz, 1988]. El indicador puede ser inmovilizado directamente en una membrana la cual se sujeta contra el extremo final de la fibra o la fibra se envuelve como se muestra en (a). Alternativamente, el indicador puede ser un polvo el cual de alguna manera se sujeta a una membrana montada en el extremo de la fibra como se muestra en la figura 3 (b). En el arreglo en la figura 3 (b) permite una más eficiente transferencia de masa para analizar dentro de la fase reactiva, proporciona una manera satisfactoria de pegar el indicador a la membrana para ser encontrado. El autor de la cinta adhesiva Scotch encontró que es un substrato conveniente para montar el

polvo indicador reproduciblemente. Sin embargo, su expansión gradual en el agua, cambia las propiedades ópticas por lo que puede ser utilizada solamente por pocas horas.

El indicador se puede confinar en el extremo de la fibra por una membrana como se muestra en la figura 3 (c). Además para mantener el indicador en el lugar, la membrana puede servir para otros propósitos. La permeabilidad característica de la membrana puede excluir otras sustancias que interfieran. Por ejemplo, las membranas hidrofóbicas son utilizadas para excluir sustancias no volátiles en sensores para medir concentración de gas en agua. La membrana puede ayudar también a aislar ópticamente el indicador de la muestra así las variaciones en las características ópticas de la muestra no afectan la respuesta. Finalmente, la membrana se puede diseñar para ser compatible con la muestra de tal forma que la contaminación no ocurra. Este es un resultado particularmente importante en sensores diseñados para mediciones biomédicas en vivo. La figura 3 (d) muestra otro arreglo que se ha utilizado satisfactoriamente en sensores. La fase del indicador es confinada con una membrana tubular permeable a la sustancia a analizar. La membrana tubular se adapta al extremo de la fibra o se envuelve la fibra con ella. La membrana tubular es cubierta para bloquear la radiación incidente de la muestra. Cuando este arreglo se utiliza con fibras solas, el diámetro del tubo es suficientemente más pequeño así que el tiempo requerido es corto para completar la transferencia de masa de la solución de análisis en la fase del reactivo y los tiempos de respuesta son satisfactorios. El sensor de pH desarrollado por Peterson [Peterson *et al.*, 1980], es un buen ejemplo de un sensor utilizando este arreglo. En la figura 3 (e) el reactivo indicador es confinado en un tubo capilar que se adapta al extremo de la fibra. Esto es utilizado cuando la fase del indicador se prepara directamente con polimerización.

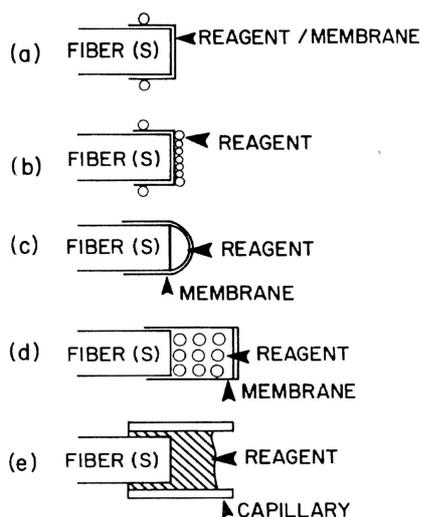


Figura 83. Sensores Extrínsecos.

En los sensores basado en cambios de colores, el parámetro medido es el cambio de la intensidad de la luz reflejada en el detector. Los sensores basados en fluorescencia han envuelto las fases del reactivo que significativamente absorben la radiación de la excitación, causando internamente efectos de filtrado que influye en las curvas de respuesta.

Otro importante punto para los sensores extrínsecos basados en fluorescencia es la eficiente colecta de luz. Gran parte de la radiación emitida no se ve directamente, particularmente en sensores envolviendo fibras separadas para excitación y emisión.

La interacción óptica directa con la muestra utilizando indicadores químicos (por ejemplo, compuestos que cambian sus propiedades ópticas por reacción con la muestra), es denominado espectroscopía directa [Dakin

*et al.*, 1999C]. Algunas técnicas de esta espectroscopía son: espectroscopía de transmisión en la cual la luz es absorbida debido a una transición rotacional y vibracional de moléculas y transiciones electrónicas de moléculas y átomos.

El espectrómetro modificado para usar fibra óptica se puede emplear fácilmente para monitorear muestras que tienen fuertes picos de absorción espectral, así como son bajas las pérdidas por transmisión en distancias cortas (pocas décimas de metro) de la fibra.

La técnica de espectroscopía de atenuación de reflexión total es una herramienta para estudiar el espectro de absorción IR (de 2 a 10  $\mu\text{m}$ ), entre otras cosas, absorción alta o líquidos turbios. Recientemente, la técnica se ha extendido para utilizarse fibras ópticas, donde usualmente son utilizadas en espectroscopía absorción de campo evanescente o espectroscopía de ondas evanescentes.

Recientemente la espectroscopía foto-acústica es de gran interés. La energía de la luz absorbida por la muestra se convierte en calor, la cual causa a la muestra y alrededor (gas, líquido o sólido) expansión. Si la fuente de luz es pulsada, las series resultantes de ondas de presión se pueden detectar utilizando un micrófono.

La espectroscopia directa se ha utilizado en sensores para diferentes químicos. Para sensar líquidos de soluciones de alta concentración tienen un fuerte espectro de absorción, así que rara vez se necesita desarrollar instrumentación especializada del tipo requerida para detección de gas de bajo contraste. El espectro medido se puede utilizar para determinar simultáneamente de varias soluciones absorbidas utilizando métodos de análisis multivariables.

El sensado de gas comúnmente es realizado utilizando análisis espectral de transmisión, las cuales se emplean en dos regiones principales del espectro óptico. Absorción o líneas de emisión en regiones más cortas, de 250 a 500 nm (de la región UV a la región azul visible) para alcanzar transiciones electrónica. Esta es una región muy útil del espectro para sensar los cambios energéticos que pueden ocurrir con átomos o moléculas de un gran número de especies gaseosas.

### **Sensores intrínsecos**

Los sensores intrínsecos se basan en la modificación que experimenta la luz que se propaga en la fibra óptica debido a las propiedades físicas de la fibra, como se muestra en la figura 4. Los sensores basados en amplitud, empleando la fibra óptica como sensor, utiliza las pérdidas de luz a través de la cubierta como resultado del doblamiento, flexiones o efectos superficiales. En los sensores basados en fase se detectan interferométricamente y se compara la fase en la fibra sensor con la de una de fibra de referencia. Los sensores de color: fosforescencia y fluorescencia, se basan en la absorción diferencial. Utiliza un par de fuentes ópticas a longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  cuya luz pasa a través de un material termocrómico absorbente. El material exhibe un cambio en las características espectrales de absorción. Estas técnicas son utilizadas para medir agentes químicos como el PH entre otros y tienen buena sensibilidad [Kersey, 1997B]. Por último, sensores basados en polarización detectan la rotación en el estado de polarización causado por la variable de interés. Son extremadamente sensibles, pero su construcción e interrogación son complejas, tienen poca capacidad de multicanalización [Brehnan, 1988].

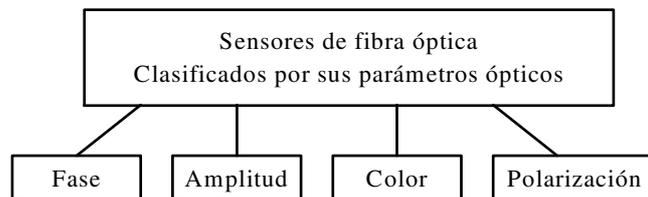


Figura 84. Sensores Intrínsecos. Sensores basados en los parámetros ópticos.

El requerimiento común de un sistema sensor es la medición de algún parámetro en un lugar particular, este tipo de sensado se realiza con un sensor de punto. Esta es la manera como la mayoría de los sensores opera, los parámetros a medir son temperatura, aceleración, presión o parámetros químicos.

Para detectar la fuga de hidrocarburo, el hidrocarburo por si solo no actúa directamente sobre la fibra óptica estándar y no se produce ningún cambio en las propiedades de la luz para sensar el evento. Para efectuar un cambio en las propiedades de la luz se necesita un elemento entre la fibra y el hidrocarburo, es decir, un transductor. En el caso particular del hidrocarburo, se puede utilizar un polímero como transductor, cuando entra en contacto con el químico a sensar y las dimensiones del polímero se incrementan produciendo una influencia mecánica sobre la fibra.

En la figura 5 se presentan dos modalidades para que el transductor induzca cambio en la fibra. En la figura 5 a) se presenta una influencia mecánica en la fibra debido a la expansión del transductor (polímero) mediante micro y macro curvaturas, tensión en rejillas de Bragg, etc. La configuración que se presenta en la figura 5 a) resulta ser económica ya que únicamente requiere una fibra estándar de telecomunicaciones atada al polímero en el caso de micro o macro curvaturas. En la figura 5 b) se muestra como se puede perturbar a la fibra mediante una influencia óptica debido al cambio en el índice de refracción ( $n$ ) y absorción en cubierta. Este último método se emplea en los sensores evanescentes.

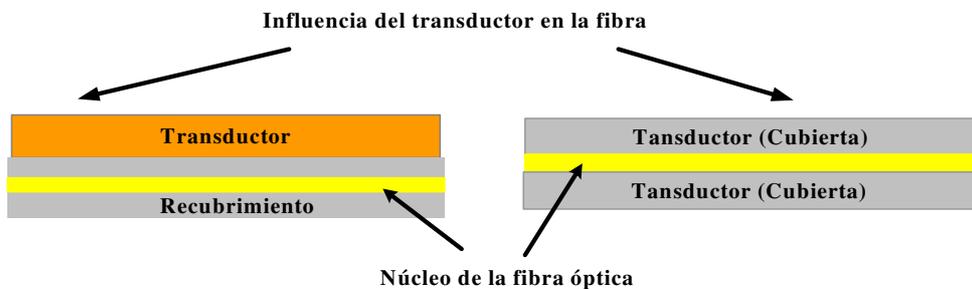


Figura 85. Mecanismo para transducir una perturbación a la fibra.

En lo referente al transductor se puede emplear un polímero para el cual es necesario determinar en los hidrocarburos que se produce una expansión y el grado de éste. Por último, una propiedad muy importante del polímero es su capacidad de regresar a su estado original, es decir, que pueda ser utilizado en varios ciclos húmedo-seco.

Existen diferentes mecanismos de sensado, los cuales se muestran en la figura 6. Estos se pueden clasificar debido a su origen, si se produce por un cambio en la forma de la fibra es influencia mecánica, pero si se debe directamente a un cambio en la fibra se está hablando de una influencia óptica. Sensores basados en efectos no lineales, por ejemplo, el efecto Brillouin se considera influencia mecánica, por ejemplo si se utiliza un polímero para producir un cambio en la fibra, la fibra sufre tensión y eso produce un corrimiento de la frecuencia Brillouin, es decir, una influencia mecánica cambia la frecuencia. A continuación se describe el principio de funcionamiento de cada uno de ellos.

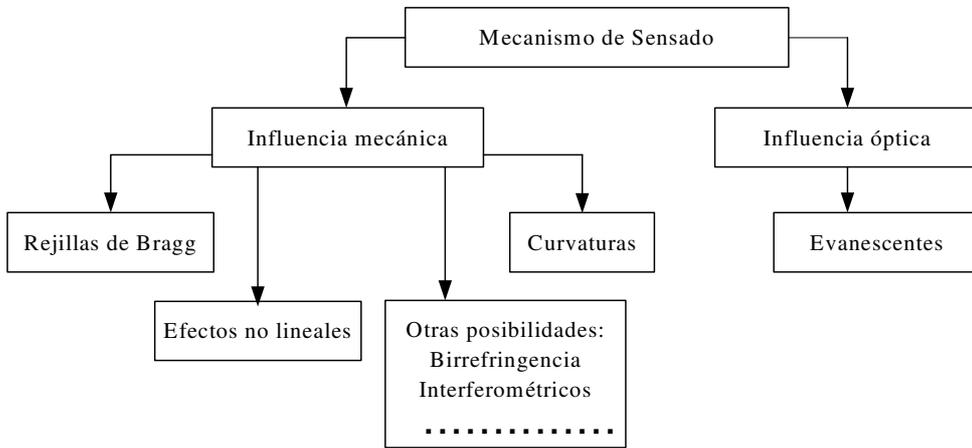


Figura 86. Clasificación de los mecanismos de sensado.

### Sensores de onda evanescente

El método basado en ondas evanescente utiliza una fibra óptica como sensor y línea de transmisión de las señales ópticas [Tai *et al.*, 1987]. En una fibra óptica una onda de luz se propaga no solamente en el núcleo sino también en el recubrimiento. La última componente es llamada una onda evanescente, la cual decae rápidamente con el incremento de la distancia desde el eje de la fibra. Si una fibra no tiene recubrimiento, la onda evanescente penetra la región fuera de la fibra, como se muestra esquemáticamente en la figura Figura 7. Si hay algún químico fuera de la fibra, la cual absorbe la onda evanescente, la potencia de la onda propagada decrece. La transmitancia de la fibra  $P$  está dada por

$$P = P_0 \exp(-\alpha r u L) \quad (1)$$

Donde  $P_0$  es la transmitancia en la ausencia de la absorción del químico,  $\alpha$  es el coeficiente de absorción del químico en espacio libre ( $8.3 \text{ atm cm}^{-1}$ ),  $r$  es la relación de la potencia de la onda evanescente con aquella de la onda propagada total,  $u$  es la concentración del químico y  $L$  es la longitud del sensor.

Es conocido que la relación de onda evanescente  $r$  depende del modo que es excitado. El número de modos que pueden propagarse es una función del valor  $V$ :

$$V = (\pi d / \lambda) (n_2 - 1)^{1/2} \quad (2)$$

Donde  $d$  es el diámetro de la fibra,  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz en el vacío y  $n$  es el índice de refracción de la fibra. Para el presente caso,  $n$  es 1.5 y  $\lambda$  es  $3.392 \mu\text{m}$ , así que de la ecuación (2) queda

$$V = 1.04 d \quad (3)$$

La condición para la fibra monomodo es  $V < 2.405$

$$d < 2.3 \mu\text{m} \quad (4)$$

En la fibra multimodo varios modos pueden existir al mismo tiempo, así  $r$  depende de la excitación de los modos. Esta es la causa de inestabilidad de la medición de sensibilidad.

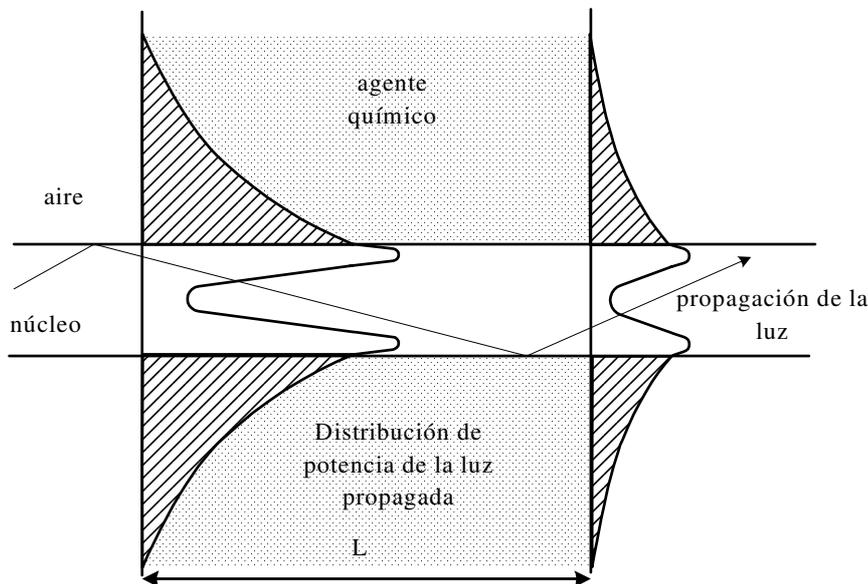


Figura 87. Principio de operación para detección química utilizando una onda evanescente.

Mientras un gran número de trabajos se han desarrollado en sensores químicos discretos utilizando fibra óptica, el desarrollo de conceptos prácticos para sistemas de mediciones distribuidas han sido limitados. Los sistemas que emplean campo evanescente, permiten interacción con agentes químicos a lo largo de la fibra [Dakin *et al.*, 1985]. Trabajos preliminares en un sensor casi-distribuido de este tipo fueron reportados en 1989 por [Kvasnik y McGrath, 1989].

A pesar del fuerte interés en los sensores ópticos químicos basados en técnicas evanescentes, ha habido poca actividad en el camino de la evaluación ingenieril del sistema de sensor basado en este concepto. Una de las principales causas es la dificultad para proteger realmente el sensor de fibra óptica, mientras se permite al campo óptico interactuar con el medio ambiente cercano, en una manera estable y predecible. La interacción de la sustancia química y la luz guiada en el núcleo de la fibra necesariamente implica que la fibra misma esté expuesta al medio ambiente que la rodea. La fibra puede ser vulnerable a la influencia del ingreso de ion OH, el cual tiene efecto dramático en su longitud. Un considerable desafío técnico es el requerimiento opuesto de permitir a la onda óptica en la fibra interactue con los parámetros químicos para ser medidos y asegurando que la fibra es protegida de ataques químicos no deseables [Dakin y Culshaw, 1999].

Tai [Tai *et al.*, 1987] presenta un sensor de gas utilizando ondas evanescentes de fibra óptica. Se detecta gas metano por medio de su fuerte absorción óptica de la línea de  $3.392 \mu\text{m}$  del láser He-Ne. Se utilizó una fibra como sensor y línea de transmisión óptica. El sensor tiene un pequeño diámetro, un intervalo desde  $1.8$  a  $7 \mu\text{m}$ , realizado por calentar y expandir una parte de la fibra de silicio de índice escalonado. Una onda evanescente de  $5$  a  $40\%$  de la potencia de propagación total se genera fuera de la fibra. El mínimo de concentración detectable del metano es menor que el límite inferior explosivo del  $5\%$  con un sensor de fibra de  $1.8 \mu\text{m}$  de diámetro y  $10 \text{ mm}$  de longitud.

### Sensores basados en curvaturas

Las pérdidas producen una atenuación de la señal óptica. Existen diferentes tipos de pérdidas, tales como las producidas por microcurvaturas y macrocurvaturas. Las microcurvaturas producen una imperfección en el

guiado de la luz, donde ésta excede el ángulo crítico de reflexión, de esta manera la luz se escapa en la curvatura, incrementando la atenuación. Las pérdidas producidas por macrocurvaturas se deben a desviaciones macroscópicas de la fibra de una línea recta, siendo observables a simple vista.

### Macrocurvaturas

La pérdida por curvatura constante de una fibra ideal de índice escalonado se puede escribir

$$\alpha = \left( A / \sqrt{R} \right) \exp(-BR) \quad (5)$$

Donde  $\alpha$  es la atenuación de potencia por unidad de longitud, R es el radio de la curvatura de la fibra, A y B están dados por

$$A = 1/2 \sqrt{\pi a W^3} \cdot [U / VK_1(W)]^2 \quad (6)$$

$$B = 4\Delta W^3 / (3aV^2) \quad (7)$$

$a$  es el radio del núcleo,  $\Delta$  es la diferencia del índice de refracción relativo del núcleo y recubrimiento,  $K_1$  es la función de Bessel, mientras  $U$ ,  $V$  y  $W$  son el parámetro de longitud de onda usual dados por

$$V^2 = U^2 + W^2 \quad (8)$$

$$U^2 = a^2 (k_0^2 n_1^2 - \beta^2) \quad (9)$$

$$W^2 = a^2 (\beta^2 - k_0^2 n_2^2) \quad (10)$$

con  $k_0 = 2\pi/\lambda$ . Aquí,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $n_1$  y  $n_2$  son los índices del núcleo y recubrimiento, respectivamente y  $\beta$  es la constante de propagación dada por la ecuación eigenvalor de la fibra de índice escalonado.

Como se puede observar, es claro que si los datos de pérdida son disponibles como funciones del radio de la curvatura en una longitud de onda conocida, es posible llegar iterar para  $a$  y  $n_1$  para un conocido  $n_2$  [Sharma *et al.*, 1984].

Las macrocurvaturas tiene un radio mucho mayor que el diámetro de la fibra. De acuerdo con la teoría modal las pérdidas por macrocurvaturas se deben a que una parte de la energía se propaga por la cubierta. Para un modo dado, debido a la curvatura, la energía que se propaga por la cubierta tiene que recorrer una distancia más grande que la que tiene que recorrer la energía que se propaga en el núcleo; para que el modo subsista, la energía debe propagarse en la cubierta a una velocidad mayor que en el núcleo y esta velocidad debe ser tanto mayor cuanto más lejos del núcleo de la fibra se propague la energía. Sin embargo, la energía no puede propagarse a una velocidad superior a la de la luz, por tanto, si la curvatura impone a la energía del modo que se propaga en la cubierta una velocidad superior a la velocidad de la luz, la propagación no puede realizarse, por lo tanto, el modo desaparece y hay atenuación.

En fibras monomodo las pérdidas por macrocurvaturas, consisten de dos componentes [Marcuse, 1976], [Gauthier y Ross, 1997], [Gambling *et al.*, 1978]: Pérdidas por transición y pérdidas por curvatura pura.

1. Pérdidas por transición: la pérdida por transición en fibras monomodo se presentan cuando los modos del campo en la fibra recta y con curvatura no son idénticos.
2. Pérdidas por curvatura pura: estas pérdidas resultan de la pérdida continua de guiado en la porción exterior del campo evanescente del modo fundamental. Esta pérdida de guiado se debe a la velocidad de fase de la parte externa del campo evanescente llegando ser igual a la velocidad de la luz en el recubrimiento [Gauthier y Ross, 1997], [Gambling *et al.*, 1978], [Buck, 1995]. El más pequeño radio de la curvatura la más grande fracción del campo evanescente afectado y por lo tanto el porcentaje de la luz

pérdida en la curvatura. La fracción que es afectada es la principal razón para la diferencia en las propiedades de macrocurvaturas de sistema monomodo y multimodo.

### ***Microcurvaturas.***

Las pérdidas por microcurvaturas tienen su origen en el acoplamiento a modos (modos guiados a modos de radiación) en una fibra deformada en una serie periódica de curvaturas que tienen un radio pequeño. Las curvaturas periódicas causan acoplamiento de energía entre varios modos guiados y desde los modos guiados a los radiados, que más tarde causan pérdidas por transmisión. La resonancia natural de este efecto causa pérdidas que dependen fuertemente de la frecuencia espacial de las curvaturas.

Cuando una fibra es curvada en una serie periódica con pequeños radios la energía se acopla eficientemente desde el modo  $m$  al modo  $n$  (y de regreso) cuando la frecuencia espacial  $\Lambda$  de la perturbación satisface la condición

$$\Lambda = 2\pi / (\beta_m - \beta_n) \quad (11)$$

donde cada modo tiene una constante de propagación  $\beta_m = n_1 k \cos \theta_m$  con  $\theta_m$  representando el ángulo del rayo equivalente del modo hecho con el eje de la fibra. Si el índice del núcleo es  $n_1$  y el índice del recubrimiento es  $n_2$ , cada modo guiado tiene una constante de propagación discreta entre  $n_1 k$  y  $n_2 k$ . La energía acoplada en el modo de radiación,  $\beta < n_2 k$  se pierde. No hay modos con  $\beta > n_1 k$  y hay un continuo de modos de radiación de  $\beta < n_2 k$ . Además, existen muchos modos degenerados; así los modos son de ahí clasificados de acuerdo al número principal  $m$ . Cada  $m$  etiqueta un grupo de modos con constante de propagación casi idénticas [Fields, 1980B]. El número total  $M$  de tales grupos modales no es el mismo que para el número total de modos guiados.

La distancia en el espacio  $\beta$  los modos guiados adyacentes en una fibra de índice escalonado está dada por

$$\beta_{m+1} - \beta_m = \frac{2\sqrt{\Delta}}{a} \frac{m}{M} \quad (\text{escalonado}) \quad (12)$$

En el caso de la fibra de índice graduado (parabólico), el espaciamiento entre los grupos modal en  $\beta$  es constante

$$\beta_{m+1} - \beta_m = \frac{2\sqrt{\Delta}}{a} \quad (\text{gradual}) \quad (13)$$

En el caso de la fibra de índice graduado son espaciados eventualmente en  $\beta$  espacios. Esto significa que una frecuencia espacial fija de los microcurvadores transferirá potencia de aquí para allá entre todos los pares de modos adyacentes. Para el caso de índice escalonado, sin embargo, el espaciamiento entre los modos es dependiente del índice del modo. Un particular  $\Lambda$  acoplará luz entre un par específico de los modos [Lise, 1985].

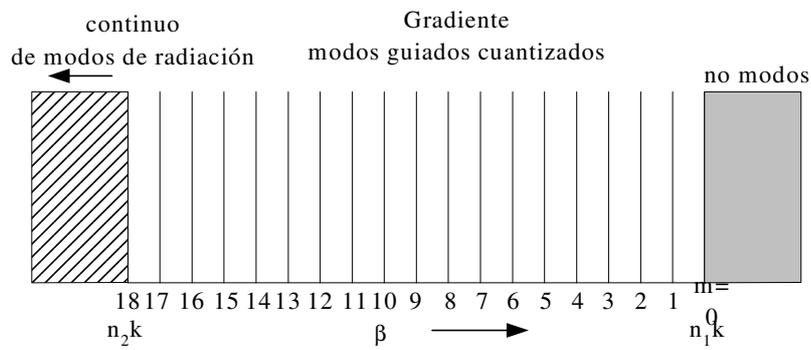
En la figura 8 se muestra como los modos son espaciados para cada tipo de fibra; cada línea vertical indica la localización de  $\beta_m$  como función de  $m$ . El número total de grupos modales  $M$  se determinan por cuanto modo se ajustaran en el espacio permitido  $\beta$  ( $n_2k < \beta < n_1k$ ) y el número de grupos modales se relaciona al número total de modos [Fields, 1980B]

$$N = M^2 \quad (14)$$

Para el caso de índice escalonado, en teoría, la energía se transfiere hacia atrás y hacia delante en solamente un par de modo específico. Sin embargo, en figura 8 b) se muestra que en el caso de índice escalonado los modos en alguna región de  $\beta$  son virtualmente uniformemente espaciados. En la práctica, por lo tanto, el acoplamiento modal es inducido entre los modos en un espacio  $\beta$  vecino, y esta región será bastante más amplia en los modos de orden mayor que entre los de menor orden, cuyos espacios varían mas rápidamente.

Las pérdidas por microcurvatura en una fibra monomodo normalmente se calculan tomando en cuenta solamente la pérdida de conversión de modo guiado a modos de

radiación [Gambling *et al.*, 1979]. Los sensores basados en microcurvaturas utilizando fibras monomodo soportan un pequeño número de modos discretos de cubierta, por consiguiente, la máxima sensibilidad se alcanza cuando la frecuencia de espacial de las curvaturas es igual a la diferencia entre las constantes de propagación del modo fundamental al modo discreto de cubierta [Murtaza *et al.*, 2001].



a)

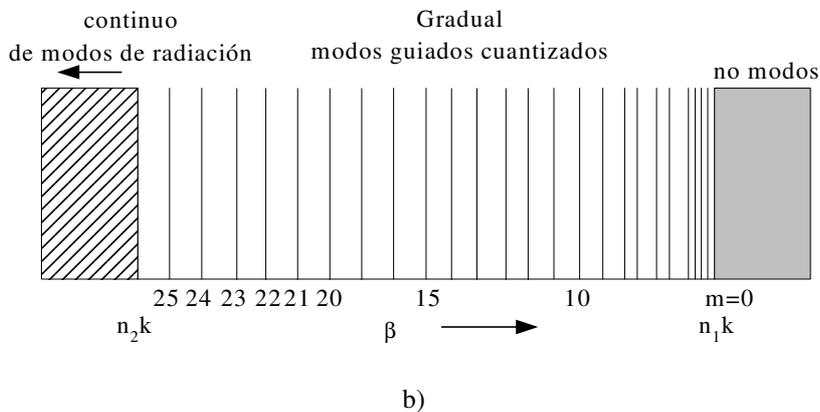


Figura 88. Espaciamiento del modo del grupo de modo para dos fibras con los mismos parámetros ( $a=25\mu\text{m}$ ,  $n_1=1.45$ ,  $n_2=1.4316$ ,  $\Delta=0.01267$ ,  $\lambda=1\mu\text{m}$ ). A) Fibra de índice gradual con  $N=328$  modos o  $M=18$  grupos modales. B) Fibra de índice escalonado con  $N=656$  modos o  $M=25$  grupos modales.

### Sensores basados en rejillas de Bragg

Las rejillas de Bragg, grabadas en la fibra óptica, han tenido un enorme impacto en sistemas de comunicación de fibra óptica, láseres de fibra y sensores de fibra óptica desde los 80's. Estas rejillas son elementos simples de sensado, las cuales pueden foto-grabarse en fibras de silicio y tienen todas las ventajas normalmente atribuida a los sensores de fibra. Además, las rejillas tienen una capacidad inherente de autorreferencia y son fácilmente multicanalizadas en series a lo largo de la fibra monomodo. Estos sensores son basados en la fotosensibilidad de las fibras de silicio dopada con germanio cuando son iluminadas con luz ultravioleta, usualmente con láseres de alta potencia. Esta longitud de onda corresponde a una banda de absorción en el vidrio asociado con el vínculo Ge-SiO<sub>2</sub>. La absorción de la luz UV en el vidrio rompe el vínculo creando un ligero cambio en las características de absorción del vidrio. Este cambio en la absorción resulta en un corrimiento en el índice del vidrio en longitudes de onda eliminadas desde la región de absorción a través de la relación Krammers-Kronig. Como el dopante de Ge es usualmente confinado solamente en la región del núcleo de la fibra, el efecto se observa solamente en el núcleo.

Para el grabado de las rejillas se utilizan dos aproximaciones principales, mostradas en la figura 9, una de ellas es mediante exposición holográfica y la otra por impresión de mascarilla de fase. En el proceso anterior, la fibra se ilumina por dos haces derivados de un láser ultravioleta que intersecta en el plano de la fibra. El ángulo entre los dos haces y la longitud de onda de la luz UV define la periodicidad del patrón de interferencia creada en la intersección de la luz. En el proceso de fabricación por medio de mascarilla de fase, la luz de una fuente UV se pasa a través de una mascarilla de fase difractiva, la cual típicamente se coloca en contacto con la fibra. Las ordenes difractadas (+1, -1) de la mascarilla interfieren en el plano de la fibra produciendo la rejilla.

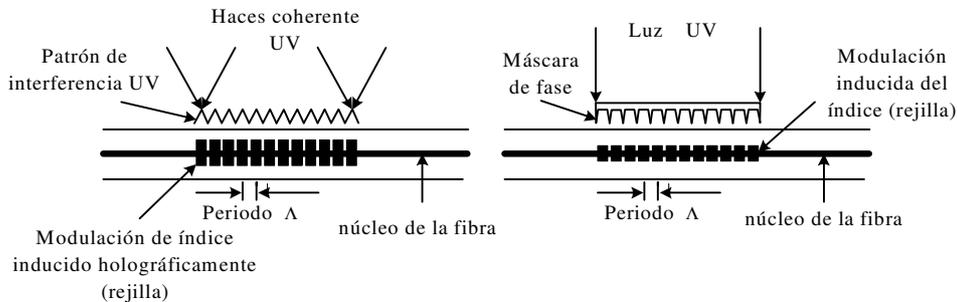


Figura 89. Fabricación de rejillas de Bragg basada en exposición holográfica y de mascarilla de fase.

Los sensores basados en rejillas son útiles para una variedad de aplicaciones, en particular, en el área de sensado distribuido en materiales para crear “estructuras inteligentes”. Las rejillas también son útiles como elementos de sensado óptico en diferentes configuraciones de sensores de fibra óptica; algunos ejemplos son sensores químicos basados en rejillas, sensores de presión y acelerómetros.

El principio básico de operación de un sistema de sensor basado en FBG descansa en el monitoreo del corrimiento en longitud de onda de la señal “Bragg” regresada, como una función de la medición (ej. tensión, temperatura). La longitud de la rejilla de Bragg,  $\lambda_B$ , es asociada al índice de refracción del material ( $n$ ) y el período de la rejilla ( $\Lambda$ ), por la fórmula simple

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (15)$$

Con estos dispositivos, iluminando la fibra con una fuente de luz espectralmente de banda ancha cuyo haz se introduce en la fibra, la rejilla refleja una componente espectral angosta en la longitud de onda de Bragg o en transmisión este componente se pierde al observar el espectro (figura 10)

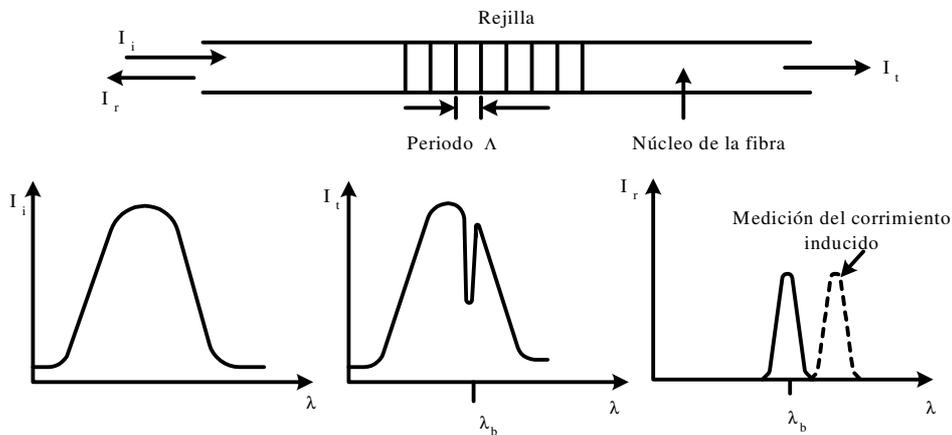


Figura 90. Propiedades básicas de transmisión y reflexión de las rejillas de Bragg.

El espectro de reflexión de una sola rejilla de Bragg con pequeña eficiencia de reflexión esta dada por [Kashyap, 1999], [Yariv, 1984]

$$R_{BG}(\lambda) = k_2 L_{BG}^2 \text{sinc}^2 \left[ \frac{\Delta\beta(\lambda) L_{BG}}{2\pi} \right] \quad (16)$$

donde  $L_{BG}$  es la longitud de la rejilla,  $k$  es una constante de acoplamiento y  $\Delta\beta(\lambda)$  caracteriza el desacoplamiento entre la actual ( $\lambda$ ) y la longitud de Bragg ( $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ )

$$\Delta\beta(\lambda) = \frac{4\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (17)$$

donde  $n_{\text{eff}}$  es el índice modal efectivo y  $\Lambda$  es el período de la rejilla de Bragg.

La reflectividad  $R_{BG}(\lambda)$  alcanza el máximo en la longitud de onda de Bragg  $\lambda_B$  que corresponde a la condición de resonancia de la rejilla. Una variación de la temperatura y/o de la tensión deja un corrimiento en la reflexión del espectro  $R_{BG}(\lambda)$ .

Se presenta por [Rao, 1999] una relación entre la tensión axial  $\epsilon$ , un cambio de temperatura  $\Delta T$  y el corrimiento relativo de la longitud de onda Bragg  $\Delta\lambda_B/\lambda_B$

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = K_\epsilon \epsilon + K_T \Delta T \quad (18)$$

donde  $\lambda_B$  es la longitud de la rejilla de Bragg de la rejilla sin tensión en la temperatura de calibración.  $K_\epsilon$  y  $K_T$  son los coeficientes de tensión y temperatura, respectivamente, y  $\epsilon$  y  $\Delta T$  es la tensión axial y el cambio de temperatura en la fibra, respectivamente.

Los sensores de rejilla de Bragg son utilizados en mediciones casi-distribuidas, por ejemplo, tensión o temperatura en posiciones conocidas en la fibra óptica. La operación del sensor es sencilla, se induce tensión en la fibra lo que conlleva a un alargamiento físico (produciendo un cambio el periodo de la rejilla  $\Lambda$  correspondiente), por lo que hay un cambio en el índice de la fibra (debido al efecto de fotoelasticidad como respuesta), con este cambio se obtiene la respuesta del sensor. La expansión térmica inherente del material de la fibra y la dependencia del índice de refracción a la temperatura da la respuesta del cambio de temperatura, cambiando la longitud de onda de la rejilla de Bragg asociada a la perturbación.

La capacidad de autorreferencia es una de las ventajas del uso de las rejillas de Bragg en sensores, donde por codificación directa en términos de la longitud de onda (un parámetro absoluto) da una respuesta, que no depende directamente de la intensidad total de la luz o pérdidas en la conexión de fibras y acopladores o la potencia de la fuente utilizada. La naturaleza de codificación de longitud de onda de la salida facilita la multicanalización por división de longitud de onda donde varios sensores se conectan en serie y permiten que cada sensor sea asignado a un elemento diferente del ancho de banda disponible del espectro de la fuente. El límite superior del número de rejillas, el cual se puede direccionar en esta manera, depende del ancho de banda de la fuente, el ancho de banda de la longitud requerido para cada elemento de rejilla y la sensibilidad de la señal procesada.

### Sensores basados en efecto Brillouin

Existen dos tipos de dispersión que pueda causar pérdidas adicionales porque la interacción entre los fotones incidentes y fonones de la materia. Los fonones, la energía cuantizada de vibraciones, se comportan como partículas y de ahí pueden interactuar con fotones. La dispersión Brillouin es inducida por ondas acústicas y muestra un corrimiento de frecuencia en el orden de 10GHz el cual depende del ángulo bajo el cual la dispersión es medida. Este efecto Doppler el corrimiento de frecuencia es maximizada en la dirección inversa. Se han propuesto diferentes métodos para sensores de fibra óptica basados en este efecto. La dispersión Brillouin es luz dispersada con fonones acústicos y un corrimiento de frecuencia durante la coalición. El corrimiento de frecuencia Brillouin llega a un máximo cuando la luz es retrodispersada y esta dado por

$$v_B = 2nV_a / \lambda \quad (19)$$

donde  $n$  es el índice de refracción,  $V_a$  es la velocidad del sonido y  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz.

Utilizando  $n=1.46$ ,  $V_a = 5945$  m/s para vidrio de silicio y  $\lambda = 1.32 \mu\text{m}$  para  $v_B = 13.2$  GHz. El corrimiento de la frecuencia Brillouin incrementa linealmente con tensión y temperatura

$$v_B(\epsilon) = v_B(0)[1 + C_s \epsilon] \quad (20)$$

$$v_B(t) = v_B(t_r)[1 + C_t(t - t_r)] \quad (21)$$

donde  $\epsilon$  es la tensión,  $t$  es la temperatura y  $t_r$  es la temperatura de referencia. El coeficiente proporcional de tensión y temperatura se encontró ser  $C_s = 4.6$  y  $C_t = 9.4 \times 10^{-5}$  [Horiguchi *et al.*, 1995]. Horiguchi y Culverhouse sugirieron el uso de estas características como mecanismo de sensado tensión y temperatura distribuida, respectivamente.

### Sensores distribuidos multicanalizados

La promesa de esquemas de multicanalización exitosos es una de las características prometedoras como un mayor beneficio de los sensores de fibra óptica sobre los dispositivos convencionales. Estos sensores ofrecen la posibilidad de una fuente y sistema de detección común y una de las ventajas de los sistemas de fibra óptica es que la multicanalización se puede alcanzar mediante un camino relativamente directo.

Una de las ventajas de los sensores de fibra óptica sobre otras tecnologías es la posibilidad de localizar un número grande de perturbaciones como función de la posición lineal. Recientemente, las investigaciones se han desarrollado principalmente en explotar estas ventajas utilizando una diversidad de técnicas tales como multicanalización por división de longitud de onda utilizando rejillas de Bragg, reflectometría óptica en el dominio del tiempo (*Optical Time Domain Reflectometer, OTDR*), Raman OTDR y Brillouin OTDR.

Los esquemas de multicanalización (figura 11) son reflectometría óptica en el dominio del tiempo (*OTDR*), reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia (*Optical Frequency Domain Reflectometer OFDR*), multicanalización, por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing WDM*) y análisis de transmisión y reflexión (*Transmission / Reflection Analysis TRA*).

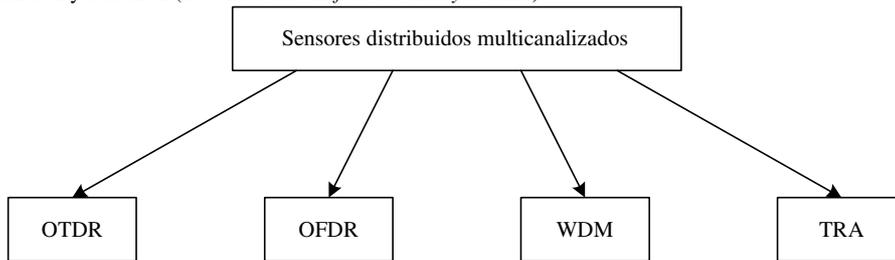


Figura 91. Sensores distribuidos multicanalizados.

### Sensado mediante Reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR)

La importancia de los sensores distribuidos es la habilidad de hacer mediciones distribuidas sobre estructuras prolongadas, por ejemplo, la distribución de temperatura en calentadores o recipientes de presión y en transformadores de alto voltaje. Los sensores distribuidos que operan mediante reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR) utilizan el método de localización de pérdidas locales en la fibra, la cual fue primero explotada para la localización de fallas. Conociendo el tiempo de propagación de un pulso en una longitud de onda particular a lo largo de la fibra con un índice de refracción determinado proporciona la posición de la perturbación para ser localizada, entonces la medición y perturbación en la fibra se determina. Los retardos de propagación permiten diferencias en el tiempo de llegada de la luz, viajando en diferentes modos de propagación, serán relacionados con la distancia a lo largo de la fibra.

La reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR) inventada por Barnowski y Jensen en 1976 [Barnoski y Jensen, 1976], fue el primer método para mediciones distribuidas en fibra y utiliza la dispersión de Rayleigh para determinar la pérdida óptica a lo largo de la fibra.

Las fibras ópticas toman ventaja de su susceptibilidad a los efectos lineales y no lineales de lo cual se sustentan, ofreciendo única ventaja para el sensado distribuido. Hartog [Hartog, 1995] presenta una extensa discusión de los principales trabajos y prácticas del uso de estos efectos en sistemas de sensado distribuido,

haciendo énfasis en su principal aplicación en sensores de temperatura. Existen varios principios entre los cuales se encuentran dispersión de Rayleigh, dispersión de Raman y dispersión de Brillouin. A continuación se describen los principios de cada una de ellos.

En trabajos previos realizados en los 1980s, los cuales utilizan el concepto de OTDR, fue basado en un tipo de aproximación OTDR utilizando reflectometría óptica –polarizada en el dominio del tiempo (Polarization-Optical Time Domain Reflectometer, POTDR) [Roger, 1980] y [Ross, 1982]. En esta investigación, el estado de polarización de la luz retrodispersada Rayleigh en la fibra monomodo se determina como función del tiempo para la detección potencial de tensión, presión y campos eléctricos y magnéticos. Se continúa investigando en esta área [Rogers, 1994]. Se ha desarrollado rápidamente el sensado de fibra óptica completamente distribuido (*Sensor Fiber Optic Complete Distributed*, SFOCD) y ofrecen significativas ventajas para mediciones en función de una variedad de aplicaciones estructurales. Las técnicas de polarización están bien establecidas en los SFOCD. Una nueva técnica para proporcionar la información completa (determinar el final de la fibra, la distribución de las propiedades completas de polarización en fibras ópticas monomodo a lo largo de su longitud, con una alguna resolución espacial específica) y por consiguiente, para medir la distribución de cualquier parámetro, externo a la fibra, el cual puede modificar su comportamiento de polarización [Roger, 2002]

### OTDR basados en dispersión de Rayleigh

Las pérdidas por dispersión en el vidrio provienen de la luz que interactúa con las fluctuaciones de densidad en la fibra. Durante la fabricación de la fibra, ocurren variaciones en la densidad de la materia y fluctuaciones en la composición creando inhomogeneidades aleatorias que dan lugar a variaciones en el índice de refracción. Este fenómeno isotrópico es llamado dispersión de Rayleigh, si el tamaño del defecto es menor que un décimo de la longitud de onda de la luz incidente. El mecanismo no causa eliminación o conversión de energía óptica sino que simplemente obliga una parte de la onda óptica al escape desde la guía de onda. La intensidad de la dispersión es proporcional a  $1/\lambda^4$ , así que, las pérdidas más bajas por atenuación se obtienen para longitudes de onda más grandes. La ecuación Rayleigh muestra una simple relación empírica para la pérdida por dispersión Rayleigh  $\alpha_s$  y la longitud de onda en fibras de silicio dopadas con germanio.

$$\alpha_s = [0.76 + 0.51\Delta n] / [\lambda/\mu\text{m}]^4 \text{ [dB/km]} \quad (22)$$

donde  $\Delta n$  es la diferencia entre el índice de refracción del núcleo y del recubrimiento. Una simplificación adicional reemplaza el denominador con la constante 0.8. Esto da la fórmula que es suficientemente precisa en la mayoría de los casos.

La luz dispersada dentro de la fibra de longitud  $W$  se describe en la figura 12. La potencia disipada  $dp_s$  en la posición  $z$  con un intervalo infinitamente pequeño  $dz$  es proporcional a la potencia del pulso  $P(z)$

$$dp_s = k P(z) dz \quad (23)$$

con

$$k = S \alpha_s \quad (24)$$

y

$$\alpha_s = \text{coeficiente de dispersión} \sim 1/\lambda^4 \quad (25)$$

$S$  es la fracción de la luz dispersada en todas direcciones que es capturada por el núcleo de la fibra y guiada de regreso. El coeficiente de captura retrodispersada  $S$  está dado por

$$S = (NA / n_0)^2 (1 / m) \quad (26)$$

Donde  $NA$  es la apertura numérica de la fibra,  $n_0$  es el índice de refracción del núcleo de la fibra y  $m$  depende del perfil del índice de refracción. Para fibras monomodo un valor típico de  $m$  es 4.55

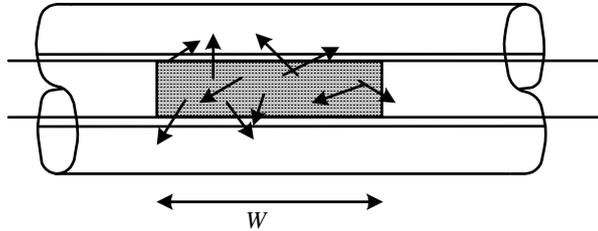


Figura 92. Dispersión dentro de una fibra de largo  $W$ .

La técnica OTDR descansa en la retrodispersión (o reflexión hacia atrás) de la luz la cual se introduce dentro de una fibra desde una fuente modulada en amplitud (usualmente pulsada). La luz dispersada de Rayleigh proviene de fluctuaciones del índice de refracción en el núcleo de la fibra o se puede reflejar de las discontinuidades, tales como conectores, empalmes, fibra rota, etc. La componente de la dispersión de Rayleigh, la cual se detecta a partir del regreso del arreglo mostrado en la figura 13, está dado por la siguiente ecuación [Healey, 1986]

$$P_s(z) = .5S(z)\alpha_s(z)V_g e^{-\int_0^z [\alpha_f(z') + \alpha_b(z')] dz'} \quad (27)$$

donde  $P(z)$  es la potencia retrodispersada detectada, como una función de la distancia,  $z$ , del punto de dispersión a lo largo de la fibra,  $S(z)$  es la fracción capturada de la luz dispersada acoplada en los modos que viajan de regreso en la fibra y  $\alpha_s$  es el coeficiente de dispersión de la fibra,  $\alpha_f$  y  $\alpha_b$  son los coeficientes de atenuación total en dirección directa e inversa, respectivamente y  $V_g$  es la velocidad de grupo en la guía óptica. La integral expresa la atenuación de dos caminos en la guía al punto en una distancia  $z$ , permitiendo para casos (tales como en secciones de fibra afilada) donde las atenuaciones directa e inversa necesariamente pueden no ser iguales y también para cualquier posible variación con la distancia  $z$ . El factor de 0.5 se incluye para tomar en cuenta los 3 dB de pérdidas en el acoplador direccional en la dirección de regreso.

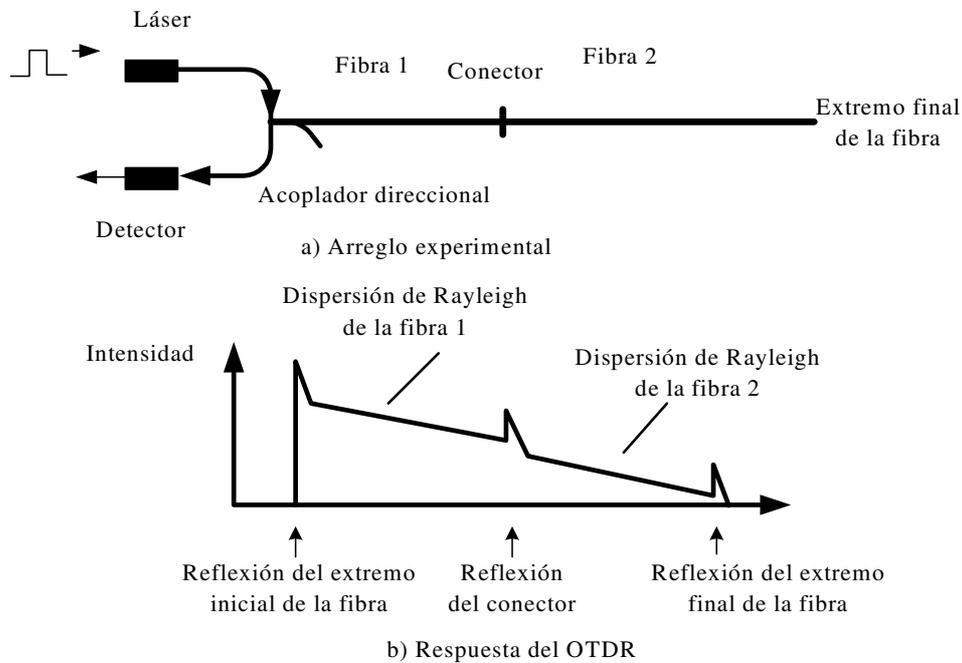


Figura 93. Diagrama esquemático del OTDR.

La distancia  $z$  es directamente relacionada al tiempo de dos caminos del tramo,  $2t$ , de la luz dada por:

$$z = t \cdot V_g \quad (28)$$

Donde el coeficiente de atenuación y el factor de captura son constantes, la expresión para la potencia retrodispersada detectada,  $P$ , tiene una dependencia del tiempo exponencialmente de la siguiente forma:

$$P_s(t) = A_1 e^{-B_1 t} \quad (29)$$

donde  $A_1$  y  $B_1$  son constantes, para una fibra uniforme.

El OTDR puede sentir cambios en el coeficiente de atenuación total,  $\alpha$  si el coeficiente de dispersión  $\alpha_s$  y la fracción de captura  $S$ , son constantes con estas condiciones:

$$P(z) = A_2 \exp\left[-\int_0^z \alpha(z') dz'\right] \quad (30)$$

donde  $A_2$  es una constante. El promedio de cambio (diferencial con respecto al tiempo) de la señal detectada es proporcional al coeficiente de atenuación. Alternativamente, este puede sentir los cambios en el coeficiente de dispersión  $\alpha_s$  si  $\alpha$  y  $S$  son constantes:

$$P(z) = A_3 \alpha_s(z) e^{-B_3 t} \quad (31)$$

donde  $A_3$  y  $B_3$  son constantes. (Claramente  $\alpha$  normalmente cambiará en coeficiente de dispersión  $\alpha_s$ , pero si el valor de la integral es pequeño, el error será pequeño).

Roger [Roger, 1980] sugirió, por primera vez, un método para medición de distribución espacial de campos magnéticos y eléctricos, presión y temperatura, utilizando el concepto OTDR en conjunción con fuentes de luz polarizada.

El método OTDR es descrito en la figura 13, en su implementación actual, consiste de un láser semiconductor pulsado es acoplado a la fibra mediante un acoplador direccional, el cual sirve también como acoplador de una fracción de la luz reflejada, capturada y regresada por la fibra bajo prueba, al detector de fotodiodo de avalancha (APD).

Para una fibra uniforme, la componente detectada de la luz dispersada varía como el producto de la energía introducida y la atenuación bidireccional entre la fuente y detector, ya que el coeficiente de dispersión no varía significativamente a lo largo de la longitud. Sin embargo, si la geometría o apertura numérica de la fibra varía significativamente, cambia en las propiedades guiadas de la fibra (primeramente en el número modal  $V$ ) causando variaciones adicionales en la lectura de retrodispersión. Di Vita y Rossi [Di Vita y Rossi, 1980] y Conduit [Conduit *et al.*, 1981] muestran que las variaciones se pueden compensar si las lecturas de OTDR se toman desde el extremo opuesto de la misma fibra.

### OTDR basados en dispersión Brillouin

El uso de dispersión Brillouin para mediciones distribuidas en fibra fue demostrado por Horiguchi y Tateda [Horiguchi y Tateda, 1989A]. La primera investigación teórica de este método, llamado análisis en el dominio del tiempo en fibra óptica utilizando Brillouin (BOTDA), fue realizado también por T. Horiguchi y M. Tateda [Horiguchi y Tateda, 1989 B]. El efecto de dispersión Brillouin se puede reducir usando un láser de longitud de coherencia baja. Utilizando reflectometría óptica en el dominio del tiempo utilizando este efecto se reporta en [Shimizu *et al.*, 1994 B] y [Horiguchi *et al.*, 1995 A]. El sistema sensor BOTDA se puede utilizar no solamente para medir atenuación sino también para temperatura [Kurashima *et al.*, 1990], [ Bao *et al.*, 1995], [Bao *et al.*, 1994], [Shimizu *et al.*, 1995], [Garcus *et al.*, 1997], [Horiguchi *et al.*, 1990]. Se han estudiado diferentes sensores basados en el efecto Brillouin utilizando BOTDR para sensores distribuidos de tensión en la fibra. Se desarrolló un equipo BOTDR para el uso en ingeniería civil, que es capaz de medir tensión continua a lo largo de la fibra de 10 km [Ohno *et al.*, 2001]. En Thévenaz [Thévenaz *et al.*, 1998] presenta un sensado distribuido de temperatura y tensión utilizando esparcimiento estimulado Brillouin con una precisión de  $\pm 1^\circ \text{C}$  para temperatura y  $\pm 20 \mu\epsilon$  para deformaciones. La resolución espacial es de 1 metro y el intervalo del sensor es mas de 20 km. Monitorea satisfactoriamente elementos de concreto, temperaturas, fuga de agua, etc. En [Lecoeuche *et al.*, 1999] se presenta un sensor distribuido para detección de temperatura y tensión que detecta rápidamente un nivel inseguro con suficiente sensibilidad de temperatura o tensión aplicada en cualquier sección en un tramo de 2 metros en una fibra sensor de longitud de 25km.

### OTDR basado en dispersión de Raman

La dispersión de Raman, es causada por las vibraciones moleculares de fonones ópticos que se generaron por la interacción de un fuerte campo eléctrico de la onda óptica y las moléculas de cuarzo. La resultante del espectro no uniforme muestra el llamado líneas de Stoke. Estas líneas se extienden en temperaturas bajas principalmente en longitudes de onda más grandes y aproximan una forma simétrica con el incremento de temperatura. El ancho espectral se extiende a mas de 10 THz. Los fenómenos de dispersión Raman y Brillouin son efectos no lineales que ocurren solamente en niveles de potencia más alta.

Una descripción de la ventaja del efecto Raman para sensado distribuido de temperatura se puede encontrar en Dakin [Dakin *et al.*, 1985].

La espectroscopia remota basada en Raman se desarrolla para sistemas de sensores químicos de fibra óptica por Ferrel en [Ferrel *et al.*, 1988].

Se presenta un sensor de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo, utilizando para interrogación la técnica OTDR en [MacLean *et al.*, 2000 A], [MacLean *et al.*, 2000 B], [MacLean *et al.*, 2000 C].

### ***Sensado con Reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia (OFDR)***

La reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia (OFDR) es el equivalente al convencional OTDR pulsado en el dominio del tiempo. Esta se puede entender, notando que la potencia reflejada del dispositivo bajo prueba actúa como sistema lineal invariante en el tiempo. Esto significa que un trazo se puede obtener por la medición de respuesta al impulso directamente o equivalente, midiendo la función de transferencia en el dominio de la frecuencia (magnitud y fase de la señal reflejada en cada frecuencia modulada) y diseñando la transformada inversa de Fourier.

Como se muestra en la figura 14 se observa que la reflectometría en el dominio de la frecuencia se divide en dos, en óptica coherente e incoherente.

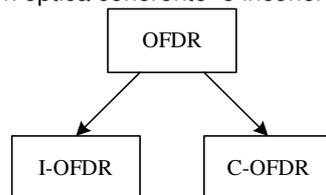


Figura 94. Ramas de la reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia.

#### **Reflectometría óptica incoherente**

La reflectometría óptica incoherente en el dominio de la frecuencia (*IOFDR*) [Hewlett-Packard, 1992] o detección directa es el dominio de frecuencia equivalente de una medición pulsada estándar de OTDR. El concepto básico utilizado para *IOFDR*, es un analizador de redes vectorial que diseña una medición con respuesta al estímulo para probar la fibra bajo prueba con una potencia óptica modulada senoidalmente. La función de transferencia en el dominio de la frecuencia se obtiene midiendo la amplitud y fase de la señal reflejada en frecuencia de prueba. La reflectividad óptica contra la distancia se obtiene tomando en cuenta la transformada inversa de Fourier. La mínima resolución espacial es inversamente proporcional al intervalo sobre el cual la frecuencia se explora.

Para una reflectometría con alta resolución, *OFDR* ofrece varias ventajas cuando se compara con el convencional *OTDR* pulsado. Una ventaja ocurre en la sensibilidad de la reflexión ya que la señal promediada se puede hacer más eficientemente. Esto se debe a que la señal senoidal de alta frecuencia se mide con un filtro pasabanda angosto. Mientras en el caso pulsado, la colección de los datos debe ser realizada en un ancho de banda eléctrico completo. Otra ventaja, su alta resolución espacial es más fácil

implementarla utilizando *OFDR*, ya que la respuesta en frecuencia de la medición electrónica fácilmente se puede deconvolucionar a partir de la medición en el dominio de la frecuencia, permitiendo al ancho de banda del sistema completo se utilice en la resolución espacial.

### Reflectometría óptica coherente

La reflectometría óptica coherente en el dominio de la frecuencia (*Coherent Optical Frequency Domain Reflectometer, COFDR*) ofrece una alta resolución espacial sin sacrificar el rango dinámico, especialmente cuando la medición de distancia es más corta que la longitud de coherencia de la luz de prueba. Este método utiliza la luz barrida en frecuencia [Eickhoff y Ulrich, 1981], distinto a la técnica OTDR, su resolución espacial se mejora reduciendo el ancho de banda del receptor y a su vez reduce el ruido en el receptor. Ya que la frecuencia de batimiento del COFDR puede ser ajustada cambiando el promedio del barrido de frecuencia [Gareth *et al.*, 1995]. Por consiguiente, C-OFDR es atractiva para localizar fallas en cables de fibra, donde haya muchos empalmes mecánicos y conectores en una corta distancia por ejemplo alrededor de 100m [Tsuji *et al.*, 1997C]. La técnica C-OFDR se basa en el análisis de la señal de batimiento generada por la interferencia entre un haz de referencia reflejado desde un espejo y la señal que viene de la fibra bajo prueba cuando la frecuencia óptica de la fuente de luz es barrida. La frecuencia de batimiento es proporcional a lo largo de la distancia de la fibra si la frecuencia óptica varía linealmente con el tiempo. La amplitud de la señal de interferencia depende de la intensidad de la luz reflejada y de las pérdidas de luz en la fibra. Sin embargo, la dependencia de la señal de interferencia sobre la frecuencia de batimiento o también llamada espectro de batimiento, representa la distribución de la potencia óptica retrodispersada a lo largo de la fibra y se puede utilizar para detección de pérdidas inducidas.

El retardo de propagación  $t_D$  se puede convertir en la frecuencia de batimiento  $f_b$  del corrimiento de la modulación en frecuencia. Para la modulación en frecuencia se utiliza una forma de onda triangular. La forma de onda de la frecuencia óptica angular del haz de referencia y de prueba se muestra en la figura 15, en el cual la línea sólida y seccionada representan las formas de onda de los haces de referencia y prueba, respectivamente.

La frecuencia angular óptica del haz de referencia en un ciclo de modulación se define como

$$w_1(t) = w_0 + \frac{\Delta w}{2} + \gamma \quad (32)$$

$$\gamma = \frac{\Delta w}{T} \quad (33)$$

donde  $w_0$  es la frecuencia angular óptica en el centro de la rampa,  $\gamma$  es la velocidad del barrido en frecuencia angular,  $\Delta w$  es la variación de la frecuencia angular en el intervalo de modulación,  $T$  es el periodo de la rampa y  $t$  es el tiempo.

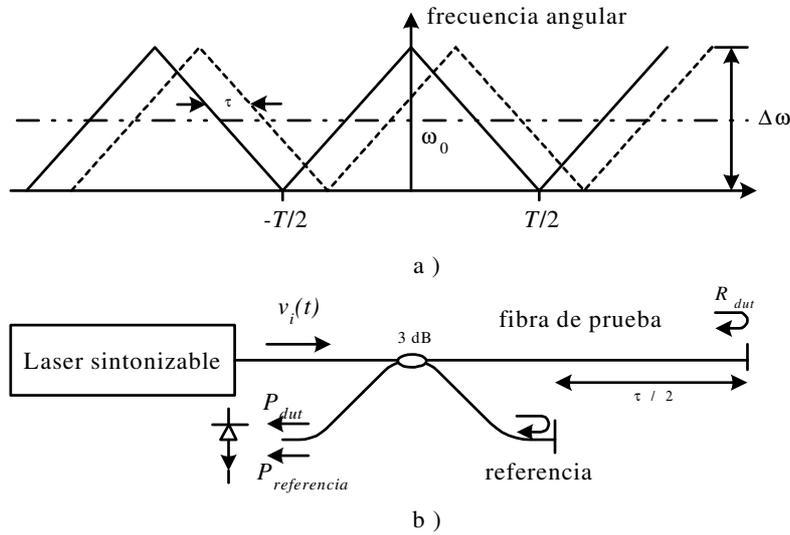


Figura 95. a) Formas de frecuencia de los haces de referencia y prueba y b) diagrama esquemático de la técnica C-OFDR.

El campo eléctrico del haz de referencia está dado por:

$$E_1(t) = R_1 E_0(t) \exp\{j\omega_1 t + \varphi_1\} \quad (34)$$

donde  $E_0$  es la amplitud del campo eléctrico modulado y  $\varphi_1$  es la fluctuación aleatoria de la fase óptica en el tiempo  $t$ . Similarmente, se obtiene el campo eléctrico para el haz de prueba:

$$E_2(t) = R_2 E_0(t) \exp\{j\omega_1(t - \tau)\} + \varphi_{t-\tau} \quad (35)$$

donde  $\tau$  es el tiempo de retardo entre la referencia y el de prueba, cuando llegan al fotodetector, expresándose como

$$\tau = \frac{2nL}{c} \quad (36)$$

donde  $L$  es la diferencia de trayectoria óptica,  $n$  es el índice de refracción,  $c$  es la velocidad de la luz en el aire y  $2nL$  es la diferencia de trayectoria óptica (OPD) entre la referencia y prueba. Cuando los haces interfieren en la superficie del fotodetector, la intensidad de la señal detectada  $I(t)$  se escribe como:

$$I(t) = |E_1(t) + E_2(t)|^2 = \frac{I_0}{2} \left[ R_1^2 + R_2^2 + 2R_1R_2 \cos\left(\omega_0\tau - \frac{\Delta\omega}{2} + \gamma\pi + \Delta\varphi_0\right) \right] \quad (37)$$

$I_0$  es la intensidad del campo eléctrico y  $\Delta\varphi_0$ . De la ecuación anterior se puede deducir la frecuencia de batimiento

$$2\pi f_b = \gamma\tau \quad (38)$$

simplificando

$$f_b = \frac{\gamma\tau}{2\pi} = \frac{(2\pi\Delta\omega/\tau)(2nL/c)}{2\pi} = \frac{2\gamma L}{v_g} \quad (39)$$

donde  $\gamma = f\Delta f$

$f = 1/T$  es la frecuencia de repetición de la rampa y  $\Delta f$  es la variación de la frecuencia en el intervalo de modulación del láser. Los términos  $\Delta\omega/2$  y  $\gamma\tau^2$  se desprecian porque son mucho más pequeños que  $\omega_0\tau$  y la fase de la señal de batimiento está dada por  $\phi_0 = \omega_0\tau$ .

La frecuencia de batimiento depende de la diferencia de trayectoria óptica, por lo tanto se puede sensar la señal de batimiento.

La técnica de reflectometría en el dominio de la frecuencia está compuesta de una fuente láser, cuya frecuencia óptica es modulada linealmente en el tiempo, la modulación tiene forma de onda triangular y dos acopladores direccionales, uno balanceado y otro no balanceado.

La reflectometría óptica coherente en el dominio de la frecuencia (COFDR) es una alternativa ya que ofrece una alta resolución espacial con alta sensibilidad. Esta técnica utiliza un barrido en frecuencia de la luz y un análisis del espectro de la señal de batimiento entre la luz reflejada bajo prueba y la luz de referencia, que nos proporciona las pérdidas por transmisión y la localización de fallas a lo largo del componente bajo prueba.

[Giles *et al.*, 1983], [Eickhoff y Ulrich, 1981], [Tateda y Horiguchi, 1989], [Tsuji *et al.*, 1997A], [Tsuji *et al.*, 1997B], [Tsuji *et al.*, 1997C], [Passy *et al.*, 1994], [MacDonald, 1981], [MacDonald y Swekla, 1990].

### **Sensado por multicanalización por división de longitud de onda (WDM)**

El esquema de multicanalización por división por de longitud de onda, ha tenido un gran auge debido al uso de los sistemas basados en rejillas de Bragg, explotando el ancho de banda de las fuentes como los LEDs u otros dispositivos ópticos luminescentes.

En la figura 16 muestra el tipo de arreglos posible utilizando tecnología WDM aplicada a sistemas de arreglos de sensores.

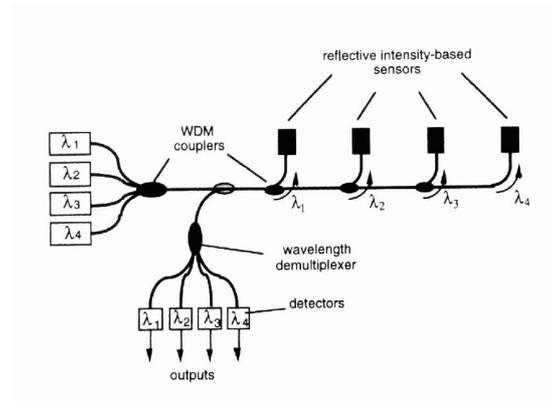


Figura 96. Arreglo de sensores multicanalizados por división de longitud de onda.

La aproximación, que se aplica a ambos tipos de sensores, de intensidad e interferométricos son teóricamente la técnica más eficiente posible, ya que toda la luz de la fuente particular se puede, en principio, direccionar a un elemento sensor en particular y después hacia el fotodetector con mínimas pérdidas en exceso. Han sido, sin embargo, pocas demostraciones de esta capacidad: la razón para esto se debe a la limitada disponibilidad de acopladores de longitud de onda selectiva (divisores y recombinadores), los cuales son requeridos para implementar la técnica.

Un desarrollo importante en esta área son utilizando rejillas de Bragg en fibra óptica. Estos dispositivos ofrecen algunas de las capacidades poderosas para WDM de sensores interferométricos.

### ***Sensado usando Análisis de transmisión / reflexión de la potencia (ATR)***

Se presenta un método de interrogación para sensores de fibra óptica para pérdidas basadas en el análisis de las potencias transmitida y reflejada (ATR) de una fuente de luz de onda continua no modulada. La posición de la región de pérdidas se determina desde la única dependencia entre las potencias normalizadas para diferentes localizaciones de la perturbación a lo largo de una fibra sensor que contiene cuatro segmentos de fibra con transductores para producir curvaturas, los elementos sensores (de aproximadamente 25 cm) son separados con una rejilla de Bragg entre los segmentos de la fibra sensor. Con esto se demuestra que el sensor basado con ATR permite la localización de una perturbación por pérdidas inducidas a lo largo de una fibra sensor midiendo solamente la potencia transmitida y reflejada [Spirin *et al.*, 2002 A]. En Spirin [Spirin *et al.*, 2002 B] se presenta una detección de condición de alarma y localización utilizando dispersión de Rayleigh para sensor de fibra utilizando la relación única entre las potencia normalizadas transmitida y retrodispersada.

### **Conclusiones del capítulo II**

En este capítulo se presenta una revisión de los sensores de fibra óptica realizados por muchos investigadores, los cuales presentan diferentes alternativas para su construcción.

Los sensores químicos de fibra óptica pueden ofrecer varias ventajas sobre los sensores eléctricos. El tamaño compacto de los sensores de fibra óptica se complementa por su fuerte inmunidad a interferencia electromagnética, además, se pueden instalar en medio ambiente rudo y tolerar altas temperaturas, vibración, choque y pueden operar en condiciones ásperas.

Con esta revisión se muestra que los sensores de fibra óptica son una muy buena alternativa para detección de fugas de hidrocarburo ya que es posible ponerlos en zonas de alto riesgo.

Para la detección de fugas de hidrocarburo en principio, se quiere ver que en cualquier punto de la fibra se pueda detectar que está ocurriendo algún evento, para esto, una alternativa adecuada es realizar un sensor distribuido. Una vez determinado que es distribuido, para la construcción del sensor se requieren abordar diferentes puntos importantes. Primer punto, se necesita de un medio que sea sensible al hidrocarburo, segundo punto, se necesita modificar los parámetros de la luz que se propaga la fibra (mecanismo) en presencia del hidrocarburo y por último, la obtención de la respuesta del sensor y la localización (técnicas de interrogación del sensor).

Estos puntos importantes para la construcción del sensor serán estudiados teórica y experimentalmente en los siguientes capítulos.

[Allen 1972] Allen P. W., 1972, Natural Rubber and the Synthetics. New York, Wiley.

[Askins 1995] Askins C. G., M.A. Putnam, E. J. Friebele, 1995, "Instrumentation for interrogating many-element fiber Bragg grating arrays", Proc SPIE vol. 2444, 257-266 pp.

- [Ayra 1998] Ayra V., K.A. Murphy, A. Wang, R. O. Claus, 1995, *J. Lightwave Technol.* LT-13, 1998 pp.
- [Bao 1994] Bao X., D. J. Webb y D. A. Jackson, 1994, "Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber", *Optics Lett.*, 19 (2), 141-143 pp.
- [Bao 1995] Bao X., J. Dhliwayo, N. Heron, D. J. Webb y D. A. Jackson, 1995, "Experimental and Theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering", *J. Lightwave Technol.*, 13, 1340-1348 pp.
- [Barnoski 1976] M. K. Barnoski y S. M. Jensen, 1976, "Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics", *Appl. Opt.*, 15 (9), 2112-2115 pp.
- [Beller 1998] Beller J., 'OTDRs and Backscatter Measurements', 1998, *Fiber Optic Test and Measurement*, Ed: D. Derickson. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- [Beltran 2002 A] Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, A. Marquez, R. Lopez y Spirin V.V., 2002, "Pérdidas por macrocurvaturas en fibras ópticas producidas por materiales suaves y expandibles para la detección de fugas de hidrocarburos", *Revista Mexicana de Física* 47 (5), 421-424 pp.
- [Beltran 2002 B] Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, J. Leon-Baez, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez-Lucero, 2002, "Fiber bend losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection", *Optics communication*, 204, 145-150 pp.
- [Berthold III 1995] Berthold III J. W., 1995, "Historical Review of microbend Fiber-Optic Sensor", *Journal of Lightwave Technology*, 13 (7), 1193 pp.
- [Brinkmeyer 1980] Brinkmeyer E., 1980, *Electron. Lett.* 16 (1980), 329 pp.
- [Buck 1995] Buck J. A., 1995, *Fundamentals of Optical fibers*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, New York: Wiley.
- [Clark 1995] Clark T. y H. Smith, 1995, "Microbend fiber optic sensors", in *Fiber Optic Smart Structures*, editado por E. Udd: John Wiley & Sons, New York.
- [Conduit 1981] Conduit, A. J., D.N. Payne, A. H. Hartog y M. P. Gold, 1981, "Optical fibre diameter variations and their effect on backscatter loss measurement", *Electron. Lett.*, 17, 308-310 pp.
- [Culshaw 1988] Culshaw B. 1988, "Optical fiber sensors: principles and components", *Basic concepts of optical fiber sensors I*, Editado por Culshaw B. y Dakin J.
- [Dakin 1985 A] Dakin, J. P., D. J. Pratt, G. W. Bibby y J. N. Ross, 1985, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", *Electron. Lett.* 21 (13), 569-570 pp.
- [Dakin 1985 B] Dakin J. P., D.J. Pratt., G.W. Bibby y J. N. Ross, 1985, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", *Electron. Lett.* 21 (13), 569-570, 1985 pp.
- [Dakin, 1992] Dakin J. P., 1992, "Distributed optical fiber sensors", *Distributed and Multiplexed fiber optic sensors II SPIE 1797*, 76-106 pp.
- [Dakin] Dakin J. y B. Culshaw, 1999, "Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends", Vol. 4, 1999.
- [Dakin 1999] Dakin J., S. Mackenzie y Hodgkinson J., 1999, "Optical Fiber – Chemical Sensing using direct Spectroscopy", *Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends*, Vol. 4, editado por John Dakin and Brain Culshaw.
- [Derickson 1998] Derickson Dennis, 1998, "Fiber optic Test and Measurement", editado por Derickson Dennis.
- [Di Vita 1980] Di Vita, P. y U. Rossi, 1980, "The backscattering technique: its field of applicability in fibre diagnostics and attenuation measurements", *Optical Quantum Electron.*, 11, 17-22pp.
- [Eickhoff 1981] Eickhoff W. y R. Ulrich, 1981, "Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber", *Appl. Phys. Lett.* 39 (9), 693-695 pp.
- [Falco 1989] Falco L. y P. Debergh, 1989, "Bimorphous distributed transducer for temperature threshold sensor", *Proc. SPIE vol. 1011*, 166-172 pp.
- [Ferrel 1988] Ferrel T.L., 1988, "Fiber-Optic Surface-Enhanced Raman System for field Screening of hazardous Compounds", *Proc. First International EPA Symposium on Field Screening Methods for Hazardous Waste Site Investigations*, Las Vegas, Nev.

- [Fields 1980 A] Fields J. N., 1980, "Pressure sensor", *J. Acoust. Soc. Am.*, 67, 816-818, pp.
- [Fields 1980 B] Fields J. N., 1980, "Attenuation of a parabolic-index fiber with periodic bends", *Appl. Phys. Lett.*, 36, 799-801 pp.
- [Franklin] Franklin Hodge, "Butyl rubber sheeting", Franklin Hodge Industries Limited, U.K.
- [Froggatt 2000] Froggatt M., B. Childers, J. Moore, T Erdogan, 2002, "High density strain sensing using optical frequency domain reflectometry", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical fiber Sensors, Proc. SPIE Vol. 4185, 249-255 pp.
- [Gambling 1978] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale y R. A. Sammut, 1978, "Measurement of radiation loss in curved singlemode fibers", *Microwaves, Opt. Acoust.*, 2 (4), 134-140 pp.
- [Gambling ] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale, 1979, "Curvature and microbending losses in single mode optical fibres", *Optical and Quantum Electronics* 11, 43-59 pp.
- [Gareth ] Gareth, Pierce S., Alistar MacLean, Brian Culshaw, 1995, "Optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend based optical fibre sensors"
- [Garcus ] Garcus Dieter, T. Gogolla, K. Krebber y F. Schliep, 1997, "Brillouin Optical-Fiber Frequency-Domain Analysis for distributed temperature and strain Measurements", *Journal of Lightwave Technol.* 15 (4), 654-662 pp.
- [Gauthier 1997] Gauthier R. C. y C. Ross, 1997, "Theoretical and experimental consideration for single-mode fiber optic bend-type sensors", *Appl. Opt.*, 36 (25), 6264-6273 pp.
- [Giles 1983] Giles I. P., D. Uttam, B. Culshaw y D. E. N. Davies, 1983, "Coherent Optical-fibre sensors with modulated laser sources", *Electronics Letters*, 19, 14-15 pp.
- [Grassino] [Grassino B. Susan
- [Grattan 2000] Grattan K.T.V.y T. Sun, 2002, "Fiber Optic sensor technology: an overview", *Sensors and Actuators* 82, 40-61 pp.
- [Gysel 1990] Gysel P. y R.H.Staubli, 1990, "Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fiber", *J. Lightwave Technol.* 8 (4), 561-567 pp.
- [Hartog 1995] Hartog H., 1995, "Distributed fiber optic sensors", en *Optical fiber Sensor Technology*, editado por K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 347-382 pp.
- [Healey 1986] Healey, 1986, "Instrumentation principles for optical time domain reflectometry", *J. Phys. E: Sci Inst.*, 19, 334-341 pp.
- [Henderson 1997] Henderson PJ, N. E. Fisher y D.A. Jackson, "Current metering using fibre-grating based interrogation of a conventional current transformer", *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor*, Williammsburg, USA, 186-9, 1997 pp.
- [Hewlett-Packard ] Hewlett-Packard company, 1992, "High-speed lighthwave component analysis", *Application Note* 1550-6
- [Horiguchi 1989 A] Horiguchi T. y M. Tateda, 1989, "Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave", *Opt. Lett.*, 14 (8), 408-410 pp.
- [Horiguchi 1989 B] Horiguchi T. y M. Tateda, 1989, "BOTDA Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory", *Journal Lightwave Technol.*, 7, 1170-1176 pp.
- [Horiguchi 1990] Horiguchi T., K. Shimizu, T. Kurashima, T., M. Tateda y Y. Koyamada, 1990, "Development of distributed sensing technique using Brillouin Scattering", *J. of Lightwave Technol.*, 15 (8), 1038-1040 pp.
- [Horiguchi 1995 A] Horiguchi T., Shimizu, K., T. Kurashima, M. Tateda y Y. Koyamda, 1995, "Development of a Distributed Sensing Technique using Brillouin Scattering", *J. Lightwave Techn.*, 13 (7), 1296-1302 pp.
- [Horiguchi 1995 B] Horiguchi Tsuneo, 1995, "Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering", *Journal of Lightwave Technology*, 13 (7).
- [Hymans 1960] Hymans A. J. y Lait J., 1960, "Analysis of a frequency modulated continuous wave ranging systems", *Proc. IEEE*, 107B, 365-372 pp.
- [IISRP ] IISRP company, "Butyl rubber", International Institute of Shyntethic Rubber, inc.
- [Jones 1998 A] Jones J.D.C., R. McBride, 1998, "Multiplexing optical fiber sensor", *Optical Fiber sensor technology*, editado por Grattan K. y Meggot B.T., 12, London: Champan & Hall.

- [Jones 1998 B] Jones S. L., G. Murtaza y J. M. Senior, 1998, "Single-Mode Optical Fiber Microbend Loss Modeling Using the Finite Difference Beam Propagation Method", *Optical Fiber Technol.* 4 pp. 471-479.
- [Kersey 1996] Kersey A. D., 1996, "A review of recent developments in fiber optic sensor technology", *Optical fiber technology*, 291-317 pp.
- [Kersey 1997] Kersey A. D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M, Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebel E.J., 1997, "Fiber grating sensors", *J. Lightwave Technol.* 15 (8), 14442-63 pp.
- [Kersey 1997B] Kersey Alan D., 1997, "Optical fiber sensors", *Optical measurement and applications*, editado por Pramod K. Rastogi, Artech House, Boston, 217-254 pp.
- [Kurashima 1990] Kurashima T., T. Horiguchi y M. Tateda, 1990, "Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers", *Opt. Lett.*, 15 (8), 1038-1040 pp.
- [Kuzin 2001] Kuzin E.A., G. Beltran-Perez, J. Camas, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez, 2001, "Fiber losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection", *Fiber Optic Sensor Technology and Applications*, Newton, USA.
- [Kvasnik 1989] Kvasnik y McGrath A. D., 1989, "Distributed chemical sensing utilizing evanescent wave interactions", *Chemical, Biomedical and Environmental Sensors*, SPIE 1172, 75-82 pp.
- [Lecoeuche, 1999] Lecoeuche V., D. J. Webb, C.N. Pannell y D. A. Jackson, 1999, "25 km Brillouin based single-ended distributed fibre sensor for threshold detection of temperature or strain", *Optics communications*, 168, 95-102 pp.
- [Liaw 2000] Liaw S.K., S.L. Tzeng, y .J. Hung, 2001, "Rayleigh backscattering induced power penalty on bidirectional wavelength-reuse fiber systems", *Opt. Comm.* 188, 63-67 pp..
- [Lise] Lise Anderson Betty, 1995, "New approach to microbending fiber optic sensors: varying the spatial frequency", *Optical Engineering*, 34 (1), 208-213 pp.
- [López 2000] López R.M., V. Spirin, S. Miridonov, y M. Shlyagin, 2000, "Reflectometría óptica en el dominio de frecuencia para detección de fugas de hidrocarburos utilizando Sensores de fibra Óptica Basado en Microcurvaturas", XLIII Congreso Nacional de Física 2000.
- [López 2001] López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Márquez y A. Márquez, 2001, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend and macrobend-based fiber optic hydrocarbon sensors", *Proc. SPIE* vol. 4328, 114-121 pp.
- [López 2002A] López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, 2002, "Fiber optic distributed sensor for hydrocarbon leak localization based on transmission / reflection measurement", *Optics & Laser Technology*, 34 (6), 465-469 pp.
- [López 2002B] López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, 2002, "Sensor de Fibra óptica distribuido para localización de fugas de hidrocarburo basado en mediciones de transmisión / reflexión", *Revista Mexicana de Física*, 48 (5), 457-462 pp.
- [López 2002C] López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, G. Beltrán, E.A.Kuzin, A. Márquez, 2003, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of bend-based fiber optic hydrocarbon sensors", *Optical fiber technology*, aceptados bajo correcciones.
- [MacDonald 1981] MacDonald R. I., 1981, "Frequency domain optical reflectometer", *Applied Optics*. 20 (10), 1840-1844 pp.
- [MacDonald 1990] MacDonald R. I. y B. E. Swekla, 1990, "Frequency domain optical reflectometer using a GaAs optoelectronic mixer", *Applied Optics* 29 (31), 4578-4582 pp.
- [MacLean 2000A] MacLean, C. Moran, G. Thursby, S. G. Pierce, B. Culshaw, N.B. Graham, 2000, "Distributed Fibre Optic Sensors for Humidity and Hydrocarbon detection, Smart Structure and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation, SPIE vol. 3986, 342-351 pp.
- [MacLean 2000B] MacLean, C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw, D. Marsh, V. Watson y Geoff Andrews, 2000, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, SPIE Vol. 4185, 382-385 pp.

- [MacLean 2000C] MacLean A., C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw y D. Marsh, 2000, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", *Smart Structure and Materials*, SPIE vol. 4328, 47-53 pp.
- [Marcuse 1976 A] Marcuse D., 1976, "Curvature loss formula for optical fibers", *J. Opt. Soc. Am.*, 66 (3), 216-220 pp.
- [Marcuse, 1976B] Marcuse D., 1976, "Microbending losses of single mode, step-index and multimode, parabolic-index fibers", *Bell systems Techn. Journal* 55, 937-955 pp.
- [Michie 1995 A] Michie W. C., B. Culshaw, I. Mckenzie, M. Konstantakis, N. B. Graham, C. Moran, F. Santos, E. Bergqvist, B. Carlstrom, 1995, "Distributed sensor for water and pH measurements using fiber optics and swellable polymeric systems", *Optics Letters* 20 (1), 103 pp.
- [Michie 1995 B] Michie W. C., B. Culshaw, M. Konstantakis, I. Mckenzie, S. Kelly, N. B. Graham, C. Moran, 1995, Distributed pH and water detection using fiber-optic sensors and hydrogels, *J. Lightwave Technol.* 13 (7), 1415 pp.
- [Miridonov 2001] Miridonov S.V., M.G. Shlyagin, D. Tentori, 2001, "Twin-grating fiber optic sensor demodulation", *Optics Communications* 191, 253-262 pp.
- [Mitchell] Mitchell G.L., 1991, "Intensity-based and Fabry-Perot interferometer sensors", *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, John Wiley & Sons, New York.
- [Morey 1991] Morey, W. W., J. R. Dunphy y G. Meltz, 1991, "Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensor", *Distributed and Multiplexing Fiber-optic Sensor Proc. SPIE* 1586, 216 pp.
- [Morton 1987] Morton M., 1987, *Rubber Technology*, New York: Von Nostrand Reinhold Co., edición 3era.
- [Mussi, 1996] Mussi G. y P. Stamp, 1996, "Polarization effects in C-OFDR", *IEEE Photonics Tech. Letter*, 8 (11), 1513-151 pp.
- [Murtaza 2001] Murtaza G., S.L. Jones, J.M. Senior y N. Haigh, 2001, "Loss Behavior of single-mode Optical Fiber Microbend Sensors", *Fiber and Integrated Optics*, 20, 53-58 pp.
- [Nasta 1994] Nasta M. N., V. Ayra, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1994, "Periodic microbending on single mode optical fibres for multiplexed sensing", *Proc. SPIE, Smart Structures and Materials*, 2191, 475-481 pp.
- [Nelson 1977] Nelson D. F., 1977, "Vibration-induced modulation of fiberguide transmission", *Proc. Topical Meet. on Optical Fiber Transmission TU-E7-1 a TU-E7-4*.
- [Ning 1998] Ning Y. N. y K.T.V. Grattan, 1998, "Optical Fiber Sensor technology: Devices and Technology vol. 2", editado por K.T.V. Grattan y B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 1998
- [Nolan 1991] Nolan D.A., P.E. Blaszyk y E. Udd., 1991., "Optical fibers", *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, John Wiley & Sons, New York.
- [Ohno 2001] Ohno H., H. Naruse, M. Kihara y A. Shimada, 2001, "Industrial Applications of the BOTDR optical fiber Strain Sensor", *Optical fiber technology* 7, 45-64 pp.
- [Pacheco 1999] Pacheco M., F.M. Santoyo, L. A. Zenteno, 1999, "Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg gratin high-voltage sensor", *Measurement Science Technol.* 10 (9), 777 pp.
- [Passy 1994] Passy R., N. Gisin, J. P. von der Weid y H. H. Gilgen, 1994, "Experimental and theoretical investigation of coherent OFDR with semiconductor laser sources", *Journal of Lightwave Technology* 12, 1622-1630 pp.
- [Peng 1999] Peng Y.T., Y. Tang y J.S. Sirkis, 1999, "The characterization of hydrogen sensor based on palladium electroplated fiber Bragg gratings (FBG)", *Proc. SPIE* 3670, 42-53 pp.
- [Peterson 1980] Peterson J. I., S. R. Goldstein, Fitzgerald R. V. y D. K. Buckhold, 1980, "Fiber optic pH probe for physiological use", *Anal. Chem.*, 52, 864 pp.
- [Probst 1989] Probst C. B., A. Bjarklev y S.B. Andreasen, 1989, "Experimental verification of microbending theory using mode coupling to discrete cladding modes", *J. Lightwave Technol.* 7 (1), 55-61 pp.
- [Rabiner 1975] Rabiner L.R. y B. G. Gold, 1975, "Theory and application of digital signal processing", Prentice-Hall, INC.
- [Rao 1999] Rao Y., 1999, "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors". *Opt. Lasers Eng.*, 31, 297-324 pp.

- [Roger, 1980] Roger, A.J., 1980, "Polarization optical time domain reflectometry", *Electron. Lett.* 16, 489 pp.
- [Roger, 2002] Roger A.J., 2002 "Distributed fibre measurement using backscatter polarimetry"
- [Rogers 1994] Rogers A. J., 1994, "High resolution frequency-derived distributed optical fiber sensing", *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors IV, Proc. SPIE 2294*, 2 pp.
- [Ross 1982] Ross J.N., 1982, "Birefringence measurement in optical fibers by polarization optical time domain reflectometry", *Appl. Opti.* 21, 3489 pp.
- [Sharma 1984] Sharma A. B., A.H. Al-Ani y S. J. Halme, 1984, "Constant-curvature loss in monomode fibers: an experimental investigation", *Applied Optics*, 23 (19), 3297-3301 pp.
- [Shimizu 1994 A] Shimizu Kaoru, T. Horiguchi, Y. Koyamada, T. Kurashima, 1994, "Coherent Self-Heterodyne Brillouin OTDR for Measurement of Brillouin Frequency Shift Distribution in Optical Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, 12 (5), 730-736 pp.
- [Shimizu 1994 B] Shimizu, K., T. Horiguchi y Y. Koyamada., 1994, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network using Brillouin OTDR", *Optical Fiber Sensor 10*, 142-145 pp.
- [Shimizu 1995] Shimizu K., T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network by use of Brillouin optical time-domain reflectometry", *Opt. Lett.*, 20 (5), 507-509 pp.
- [Shlyagin 1997] Shlyagin M.G., S.V. Miridonov y D. Tentori, Castillo J., 1997, "Twin grating –based interferometric fiber sensor", 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor. In: OSA Technical Digest Series, Vol. 16, 472-474 pp.
- [Shlyagin 1999] Shlyagi, M. G., S. V. Miridonov, D. Tentori, F. J. Mendieta y V. V. Spirin, 1999, "Multiplexing of grating-based fiber sensors using broadband spectral coding," *Proceedings of SPIE vol. 3541*, 271-278 pp.
- [Spammer 1997] Spammer S.S., P. L. Swart y A.A. Chtcherbakov, 1997, "Merged Sagnac-Michelson Interferometer for distributed disturbance detection", *Journal of Lightwave Technol.*, 15 (6), 1-4 pp.
- [Spillman 1997] Spillman W.B. Jr, 1997, "Fiber optics and smart structures", *Optical fiber Sensors: Applications, analysis, and future trends vol. 4*, editado por J. Dakin y B. Culshaw, Artech House, Boston, London.
- [Spirin 2000] Spirin V., S. Miridinov, M. Shlyagin, I. Márquez y R.M. López, 2000, "Diferential twin Bragg grating sensor for temperature and strain gradient measurement", *EOS/SPIE International Symposium on Applied Photonics, Glasgow, Escocia, Reino Unido.*
- [Spirin 1999 A] Spirin V., I. Márquez, R. López, M. Shlyagin y S. Miridonov, 1999. "Investigación del nuevo sensor químido basado en rejillas de Bragg en fibra óptica", *XLII Congreso Nacional de Física 1999*.
- [Spirin 1999 B] Spirin V.V., M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, F. J. Mendieta Jiménez, R. M. López Gutiérrez, 1999, "Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection", *Optics and Láser in Engineering*, 32 (5), 497 – 503 pp.
- [Spirin 2002 A] Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002, "Transmission / reflection analysis for distributed optical fibre loss sensor interrogation", *Electronics Letters*, 38 (3), 117 pp.
- [Spirin 2002 B] Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002, "Alarm-condition detection and localization using Rayleigh scattering for a fiber-optic bending sensor with an unmodulated light source", *Optics Communications*, 205 (1), 37-41 pp.
- [Spirin 2002 C] Spirin V. V., R.M. Lopez, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Marquez, E.A. Kuzin, G. Beltran-Perez y Pieter L. Swart, 2002, "Fiber Optic Sensor for Hydrocarbon Leak Detection and Localization", *Smart Structures and Materials 2002: Smart Sensor Technology and Measurement Systems, SPIE 4694*, 341-348pp.
- [Tateda 1989] Tateda M. y T. Horiguchi, 1989, "Advances in optical time domain reflectometry", *Journal of Lightwave Technology*, 7 1217-1224 pp.
- [Tesis] Tesis

- [Thévenaz 1998] Thévenaz L., Nikles M., Fellay A., Facchini M. Robert P., 1998, "Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers", Conference on sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for SSM, San Diego, Ca., SPIE Vol. 330, 301-314 pp.
- [Tsuji 1995] Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Coherent optical frequency domain reflectometry for a long single-mode optical fiber using a coherent lightwave source and an external phase modulator", IEEE Photonics Technology Letters 7, 804-806 pp.
- [Tsuji 1997 A] Tsuji K., Shimizu K., Horiguchi T. y Koyamada Y., 1997, "Spatial-resolution improvement in long-range coherent optical frequency domain reflectometry by frequency-sweep linearisation", Electronics Letters 33, 408-410 pp.
- [Tsuji 1997 B] Tsuji, K., Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997, "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave", Journal of Lightwave Technology 15, 1102-1109 pp.
- [Tsuji 1997 C] Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997, "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave", Journal of Lightwave Technology 15, 1102-1109 pp.
- [Tsuji 1998] Tsuji K. y T. Horiguchi, 1998, "Fading noise reduction for coherent optical frequency domain reflectometer with 30 cm spatial resolution and 15 dB dynamic range", Optical Fiber Sensor 13, 584-587 pp.
- [Udd 1991] Udd Eric, 1991, Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists, editado por Eric Udd, John Wiley & Sons, New York.
- [Uttam 1985] Uttam D. y B. Culshaw, 1985, "Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using frequency modulated continuous wave ranging technique", J. Lightwave Technol., 3, 971-977 pp.
- [Vivek 1995] Vivek Arya, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1995, "Microbend Losses in Singlemode Optical Fibers: Theoretical and Experimental investigation", Journal of Lightwave Technology 13 (10).
- [Von der Weid 1997] Von der Weid J. P., R. Passy, G. Mussi y N. Gisin, "On characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometer", J. Lightwave Technol. 15 (7), 1131-1141 pp.
- [Won 2001] Won P.C., L.K Seah y A.K. Asundi, 2001, "FMCW reflectometric optical fiber strain sensor", Smart Structure and Materials Proc. SPIE 4328, 54-62 pp.
- [Yariv 1984] Yariv. A. y P. Yen, 1984, Optical waves in crystals, John Wiley&Sons.
- [Tai 1987] Tai Hideo, H. Tanaka y Toshihiko Y., 1897, "Fiber optic evanescent-wave methane-gas sensor using optical absorption for the 3.392-  $\mu\text{m}$  line of a He=Ne laser", Optics Letters, 12 (6).
- [Brehnan 1988] Brehnan B. W., 1988, "Prototype polarimetric based fiber optic strain gauge", Reviews of progress in quantitative nondestructive evaluation, Plenum Press, New York, 547 pp.
- [Tan 1996] Tan Y., T. C. Tan, 1996, "Modeling and sensing characteristics of an amperometric hydrocarbon sensor", Chemical engineering science, 51(16), 4001-4011 pp.
- [Kashyap] Kashyap Raman, 1999, "Fiber Bragg gratings", Optics and Photonics, Academic Press.
- [Seitz] Seitz, W. Rudolf, 1988, "Chemical sensors based on immobilized indicators and fiber optics", CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry, 19 (2), 135-173 pp.

## **Introducción**

En este capítulo se presenta una breve explicación teórica de los polímeros, sus propiedades mecánicas en presencia de hidrocarburos, todo esto con la finalidad de tomar ventajas de éstas propiedades mecánicas, en especial, la posibilidad de expansión del material y su regreso al estado original. El proceso de expansión y contracción se lleva a cabo en la presencia de diferentes hidrocarburos, la expansión es cuando es expuesto el polímero al hidrocarburo y vuelve a su estado original después de un tiempo de que se haya retirado de la influencia. En este capítulo se presenta únicamente el polímero bajo diferentes hidrocarburos que será utilizado en los capítulos 4 y 5 como medio para lograr que un cambio en la luz de la fibra óptica, en el capítulo 4 será mostrara como prueba que el polímero tiene suficientemente fuerza para inducir estos cambios y en el 5 es empleado para sensores distribuidos de detección de hidrocarburo.

## **Descripción de las propiedades mecánicas de los polímeros**

Los polímeros son moléculas naturales o hechas por el hombre, frecuentemente llamada macro-moléculas. Estos son compuestos de pequeñas unidades, monomers, los cuales tienen reaccionadores juntos para dar una larga cadena, mas bien como una cadena de cuentas. En el polímero más simple, los monomers son idénticos y el polímero es llamado por el prefijo "poli" para el nombre del monomer del cual es derivado. Los monomers que constituyen un polímero puede ser el mismo en cualquier caso ellos son llamados homopolímeros o pueden contener mas de un monomer, en este caso ellos son copolímeros [Tesis]. Los polímeros de ligadura cruzada son insolubles en todos los solventes porque todas las cadenas de polímeros son atadas covalentemente juntas. Sin embargo, se pueden hinchar en diferentes extensiones, dependiendo de su grado de ligadura cruzada, debido a que pueden absorber los solventes. Una pieza de un material de ligadura cruzada que tiene una absorción a muchos solventes se llama gel [Grassino]. Los gels, bajo la influencia de cualquier deformación por presión, puede reaccionar con una fuerza retroactiva elástica. Entonces se dice que el gel tiene elasticidad. La fuerza del gel incrementa con el grado de la ligadura cruzada, entonces estos son los polímeros sólidos. Las propiedades del estado sólido son usualmente mantenidas cuando el sistema va hacia el gel. Esto significa que polímero quebradizo indicará un gel quebradizo y el polímero de goma formará gels con cierta dificultad. En los polímeros sólidos las cadenas son suficientemente juntas. Esto significa que el material puede resistir bien cualquier deformación sin romperse. Pero cuando las moléculas pretenden ser un gel, ellas penetran entre las cadenas aflojándose ellas a parte. Se puede concluir que los gels, siempre que sean covalente, tienen propiedades mecánicas pobres en la mayor parte del tiempo. Obviamente, la fuerza del gel dependerá del grado de la ligadura cruzada. Entre mas ligadura cruzada sea el material, es más elástico y más fuerte. Si los gels no tienen suficiente elasticidad, entonces se romperán antes de medir los parámetros como fuerza extensible, estiramiento y módulos. De acuerdo con Flory, la expansión del gel se puede ver como el resultado de la reducción del intervalo del potencial de solventes químicos donde el proceso en la expansión del gel es manejado por el gradiente del solvente químico a través del gel y los límites de la solución. Considerando un sistema de polímero gel y solvente dentro de un volumen de control (c.v.) como se muestra en la figura 17. El volumen de control cambia como el gel absorbe el solvente de su alrededor. Las consideraciones para el modelo son: (1) proceso relativamente bajo, (2) difusión limitada del solvente, (3) efectos de inercia y convección despreciables, (4) casi-estático, (5) isotérmico, (6) isobárico, (7) dos sub-procesos (mezclado/difusión y expansión elástica del polímero-solvente) y (8) polímero y solvente no comprimible. El c.v. se supone ser rodeado por un fluido solvente a temperatura constante  $T_0$  y presión constante  $P_0$ . Como el fluido solvente entra al c.v., el c.v. se expande y el estado de sistema dentro del control de volumen en un instante de tiempo puede ser descrito por la figura 17.

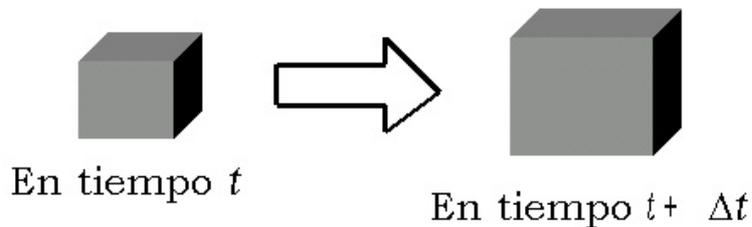


Figura 17. Aumento de volumen de un polímero.

### **Hinchamiento del polímero bajo influencia de hidrocarburo**

La expansión en un sentido físico, da una idea de cuanto solvente puede el gel absorber. Matemáticamente es una relación entre el peso o volumen ocupado por un gel hinchado,  $w_s$  y  $v_s$ , respectivamente, y el peso o volumen ocupado por el correspondiente gel seco,  $w_d$  y  $v_d$ . Esto se puede expresar mediante las siguientes ecuaciones. Cuando se consideran los pesos, la relación del equilibrio del peso de hinchamiento ( $q_w$ ) está dado por:

$$q_w = \frac{w_s}{w_d} \quad (40)$$

Si son considerados los volúmenes, entonces la relación de equilibrio del peso del volumen equilibrio ( $q_v$ ) se define por:

$$q_v = \frac{v_s}{v_d} \quad (41)$$

El porcentaje del grado de hinchamiento (%SD) dado por:

$$\%SD = 100 \frac{w_s - w_d}{w_d} \quad (42)$$

La expansión depende fuertemente del solvente y de la naturaleza de la cadena del polímero. Sin embargo, si un gel es suave no significa necesariamente que este tiene un alto poder de hinchamiento. Muchas veces, el bajo poder de hinchamiento es atribuido a las cadenas de polímero con bajo peso molecular. El poder de hinchamiento tiene un gran significado para los gels. El gel tiene el más alto poder de hinchamiento. Los polímeros se pueden diseñar selectivamente al hincharse e contraerse como una función de concentración analítica por introducir un grupo funcional que selectivamente se liga a lo analítico.

### **Polímeros sensibles al hidrocarburo**

El Isobutyleno-Isopropeno (IIR), comúnmente conocido como goma de butyl (*Butyl rubber*). Sus propiedades son copolímero de isobutyleno y 2 a 3% de isopropeno. Esta baja instauración, resulta en una goma muy resistente a la luz solar, al clima, oxígeno y ozono. Tiene una gran resistencia a ácidos, alcalinos y resiste a exposición de altas temperaturas. Especialmente este material tiene excelente propiedad de baja permeabilidad a gases. Es resistente al agua, pegamento basado en *ethylene-glycol* y detergentes pero no a aceites minerales o solvente aromáticos.

Es una goma sintética, fue anunciada en 1940. La goma de *butyl* es hecha mediante polimerización *isobutyleno* obtenida desde el petróleo con una pequeña cantidad de *isopreno* en una temperatura de 150° F (100° C).

Los polímeros expansibles en presencia de combustibles son de gran importancia para el desarrollo de sensores de fibra óptica para detección de fugas de hidrocarburos. Existen diferentes tipos de polímeros que se expanden en diferente grado bajo la influencia del hidrocarburo.

En [MacLean *et al.*, 2000 B] se ha reportado que los combustibles altamente volátiles causan un rápido incremento en el volumen del polímero, el incremento de su peso es de 200% dentro de los primeros minutos de humedad. Los combustibles menos volátiles tales como el diesel y aceite de gas causan hinchamiento en menor grado y toma ligeramente más tiempo para alcanzar el máximo hinchamiento. El tiempo tomado para alcanzar el máximo hinchamiento para cada combustible es proporcional al cuadrado de la profundidad del material

En [MacLean *et al.*, 2000C] se presenta una evaluación de muestras de polímeros de distintos materiales (Silicio, EPDM y goma butyl) para determinar el grado de hinchamiento bajo la influencia de diferentes solventes (keroseno, petróleo, condensado (material crudo), dodecylbenzene, diesel, aceite, carburante ligero, mediano y pesado) es realizado en. El grado de hinchamiento fue estimado como un porcentaje del peso de la muestra en seco. El petróleo, condensado y keroseno induce el más alto hinchamiento para el polímero basado en silicón. Los aceites más pesados tales como dodecylbenzene, diesel y aceite inducen un gran hinchamiento en polímeros basados en hidrocarburo EPDM (basado en ethylene ethylene-propylene-diene monomer) (figura 18). Todo esto conduce a tener cuidado en seleccionar el material del polímero para el combustible que se va a utilizar, así poder proporcionar suficiente hinchamiento para inducir una pérdida detectable en el sensor.

El cloroformo induce el máximo hinchamiento en el polímero, con tolueno, el petróleo, ciclohexeno ether también inducen significativamente al hinchamiento. El grado de hinchamiento inducido por inmersión en estos solventes se considera suficientes para proporcionar la fuerza necesaria para activar el sensor. La expansión causada por exposición al vapor del solvente toma considerablemente más tiempo en alcanzar un máximo valor sin llegar al máximo obtenido con la inmersión. A pesar de esto, este hinchamiento más bajo, hay aún potencial para que se pueda activar el sensor en presencia del vapor (figura 19).

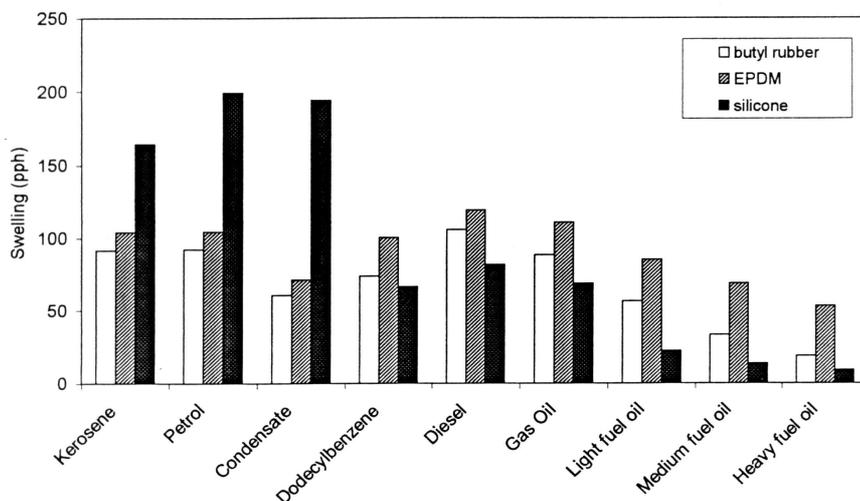


Figura 18. Diferentes polímero sumergidos en varios hidrocarburos.

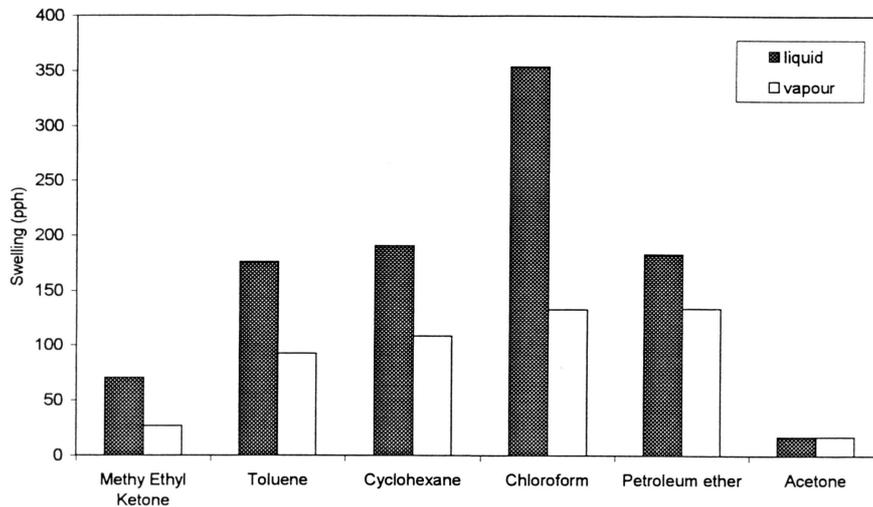


Figura 19. Un polímero expuesto al vapor y líquido.

En [MacLean *et al.*, 2000A] el hidrogel utilizado en el sensor se hincha pero no se disuelve en medio acuoso y es uno de la familia de poly(ethyle óxido)-co-poly(propylene óxido) en conjunto con copolímero polyuretano-urea hydrogel. El ligado de urethane/urea, siendo hidrofóbicos, se comporta como un ligado cruzado físico que mantiene la expansión junto con la estructura. La presencia de aguas causa expansión volumétrica, la extensión depende del porcentaje de hinchamiento, la relación PEO/PPO en el hidrogel y la resistencia mecánica de la estructura de hidrogel. En el sensor de agua presentado por este autor, la relación hidrofóbica PEO al hidrofóbico PPO ha sido seleccionada para producir un hidrogel que aumente un 40% volumétricamente cuando la expansión es completo.

Considerando la importancia del polímero en este tipo de sensores se realizaron varios experimentos. La finalidad de este experimento es observar la influencia del hidrocarburo cuando entra en contacto con un polímero. Es decir, cuanto se expande la muestra con relación al tiempo de exposición al hidrocarburo y cuanto tarda en volver a su estado original.

Los polímeros se pueden diseñar selectivamente para hincharse y contraerse como una función de concentración analítica por introducir un grupo funcional que selectivamente se liga a lo analítico.

Los polímeros expansibles en presencia de combustibles son de gran importancia para el desarrollo de sensores de fibra óptica para detección de fugas de hidrocarburo. Existen diferentes tipos de polímeros que se expanden en diferente grado bajo la influencia del hidrocarburo.

La goma de butyl tiene muchas propiedades como a prueba de agua, impermeabilidad, resistencia al agua, resistente a un intervalo amplio de temperatura, elasticidad, durabilidad, resistencia química y fácil de reparar [Franklin, 2002], [ IISRP 2002]

### **Investigación experimental del comportamiento de una goma de *butyl* bajo influencia de gasolina**

En el trabajo que presentamos se utiliza una goma blanca de *butyl* como polímero sensible en el sensor de hidrocarburo. Esta goma tiene buenas propiedades de envejecimiento a elevadas temperaturas y buena

estabilidad química. Además, es resistente al clima, a la luz solar, ozono, ácidos minerales, solventes como ketones y alcohol y a la absorción de agua. La goma de *butyl* absorbe y se hincha en medios de hidrocarburos sin disolución y cambio significativo de sus propiedades mecánicas. EL comportamiento de la expansión del polímero produce un incremento en las dimensiones físicas del material, el cual puede enseguida convertir a una respuesta mecánica. Para la investigación de la expansión del polímero fue colocada una muestra cilíndrica del material con diámetro igual a 6 mm y longitud igual a 5mm en un recipiente lleno de gasolina. La muestra se expande mas del 50% después de 10 horas en influencia de gasolina. La saturación del polímero se alcanza después de 24 horas bajo la influencia de la gasolina. Después de esto la gasolina se retira y la muestra se restablece casi a su forma y dimensión inicial después de 80 horas. El banco de medición consiste en un bernier para medir la expansión del material al exponerse a la gasolina, una muestra de polímero de determinadas dimensiones, gasolina y recipientes de vidrio. En la figura 20 se observa el banco de medición, la muestra de polímero (1) se coloca en el recipiente (3) de bajo el bernier (2).

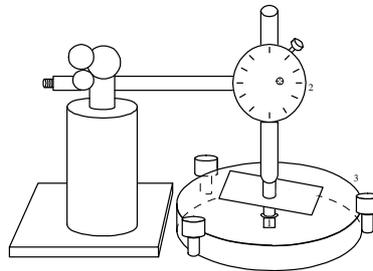


Figura 20. Banco experimental para medir la expansión del polímero.

El experimento se realizó para diferentes tiempos de exposición a la gasolina utilizando varias muestras del mismo polímero con las mismas dimensiones. La influencia del hidrocarburo se observa mediante dos formas, en la primera, la muestra entra en contacto directo con el hidrocarburo y la segunda, el contacto es indirecto, es decir, solamente con el vapor del hidrocarburo.

La muestra del polímero cuya longitud  $L$  se coloca bajo el bernier, sin contacto con la gasolina

$$\Delta X = \Delta L \quad (43)$$

donde el incremento  $\Delta L$  es igual a cero.

Al entrar en contacto con la gasolina en forma directa y de vapor, hay una expansión del polímero, de esta manera se mide la expansión lineal  $\Delta L$  es el incremento de la altura del y  $\Delta X$  es la variación de la distancia entre la base y el polímero bajo prueba (ver Figura 17).

El experimento para expansión y relajación se realizó con distintas condiciones, enseguida se explicaran:

1. Contacto Directo. Se coloca la muestra como se indica en la figura 20, enseguida se pone en contacto directo con la gasolina, es decir, se vierte la gasolina en el recipiente hasta cubrir la muestra (figura 21).

Después de un tiempo determinado se retira la gasolina. Este experimento se realizó para distintos

tiempos de exposición de la muestra en la gasolina. Para todos los tiempos de exposición se tomó el tiempo de relajación.

2. Contacto Indirecto. La muestra se coloca como se indica en la figura 20. Ahora la gasolina se pone en un recipiente a parte, como se muestra en la figura 22. En este experimento la exposición a la gasolina es solamente mediante el vapor que llega a la muestra. Se deja un determinado tiempo de exposición y se toma su tiempo de relajación.

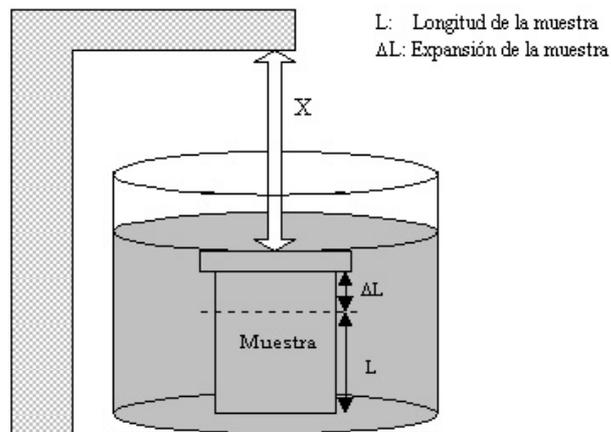


Figura 21. Banco de medición con muestra en contacto directo con gasolina.

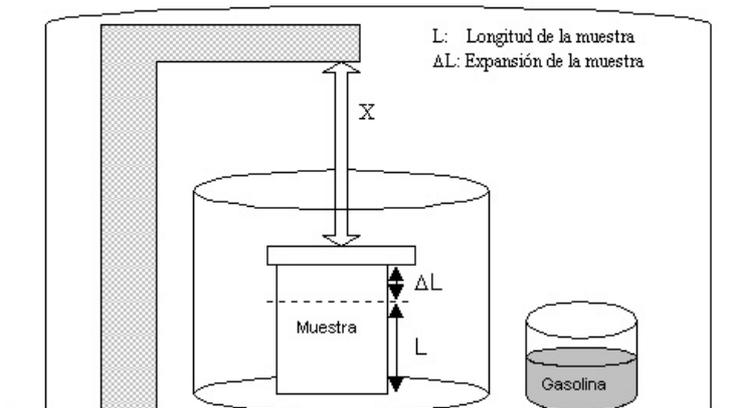


Figura 22. Banco de medición con muestra en contacto indirecto con gasolina, es decir, expuesta al vapor en saturación a 20 °C.

3. Contacto directo con peso adicional. Este experimento fue una variante del de contacto directo. Aquí se le colocó un peso adicional, como se muestra en la figura 23, de igual manera se midió su expansión y relajación con respecto del tiempo.

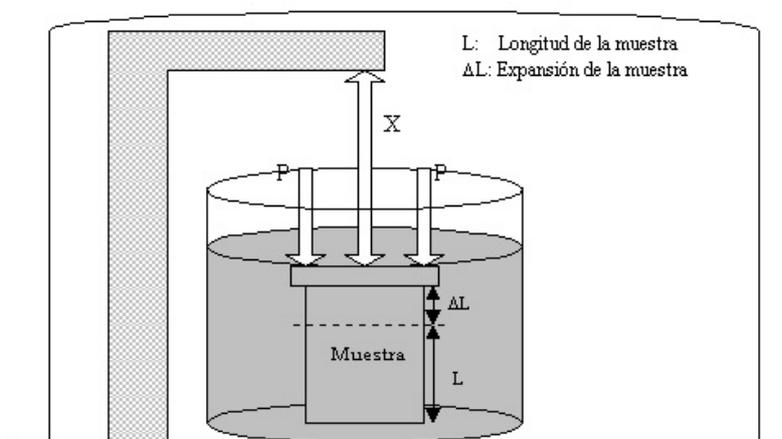


Figura 23. Banco experimental utilizando una muestra en contacto directo con peso adicional.

Las muestras utilizadas tienen las siguientes dimensiones, 6 mm de diámetro y una altura de 5 mm y se utilizó gasolina. El peso adicional que se utilizó en el experimento número 3, es de aproximadamente 700 gr.

Los experimentos tanto en exposición indirecta como directa con o sin peso adicional se realizaron hasta que las muestras alcanzaron la saturación.

a) Contacto directo.

- Este experimento se realizó para tres tiempos de exposición, 10, 20 y 60 minutos. Después se tomó el tiempo de relajación, esto se muestra en la figura 24.

La velocidad de expansión es:

Para  $t=10$  min una velocidad de  $v=.82\%/min$ .

Para  $t=20$  min una velocidad de  $v=.72\%/min$ .

Para  $t=60$  min una velocidad de  $v=.70\%/min$ .

- Una muestra se expuso 5 veces a la gasolina. El tiempo de exposición en cada una de las veces fue 10 minutos y de relajación fue de 50 minutos.

La velocidad de expansión para cada una de las exposiciones es:

Primera exposición, con una velocidad de  $v=0.74\%/min$ .

Segunda exposición, con una velocidad de  $v=0.82\%/min$ .

Tercera exposición, con una velocidad de  $v=0.78\%/min$ .

Cuarta exposición, con una velocidad de  $v=0.74\%/min$ .

Quinta exposición, con una velocidad de  $v=0.64\%/min$ .

- Una muestra se expuso hasta alcanzar la saturación y después se tomó el tiempo de relajación, figura 26.

b) Contacto indirecto.

- Una muestra se expuso hasta alcanzar la saturación y después se tomó el tiempo de relajación, figura 27.

c) Contacto directo con peso adicional.

- Una muestra con un peso adicional se expuso hasta alcanzar la saturación y después se tomó el tiempo de relajación, figura 28

La comparación de las gráficas de saturación para las distintas condiciones se muestra en la figura 29.

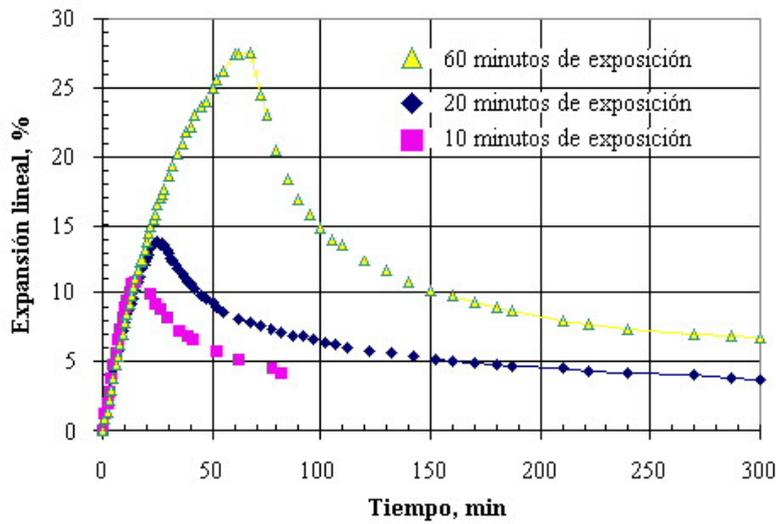


Figura 24. Exposición directa para una muestra con diferentes tiempos de exposición a la gasolina.

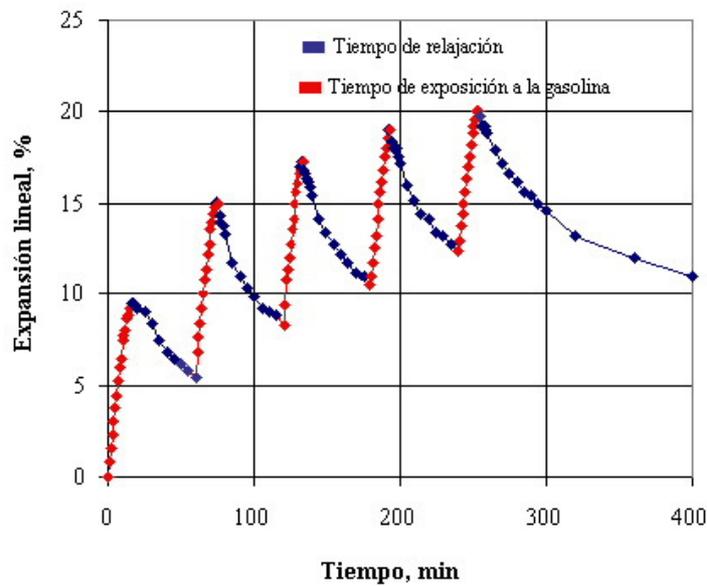


Figura 25. Exposición directa para una muestra en 5 ciclos de húmedo-seco.

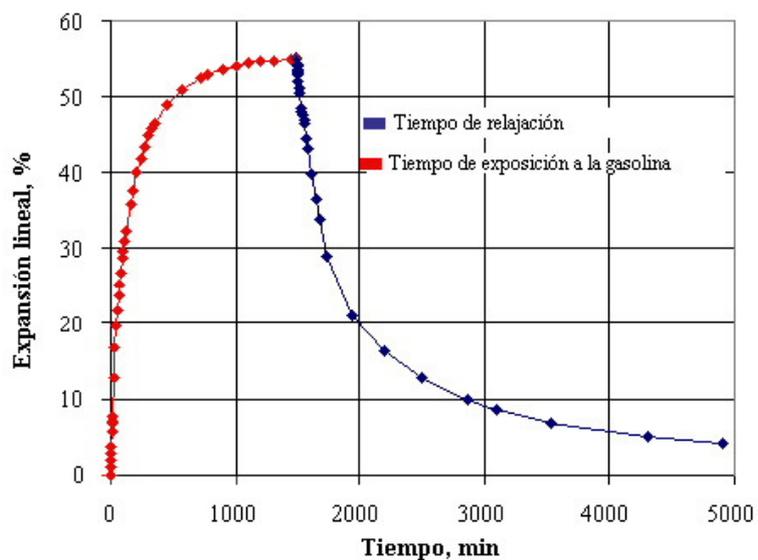


Figura 26. Saturación en exposición directa de la muestra hasta la saturación.

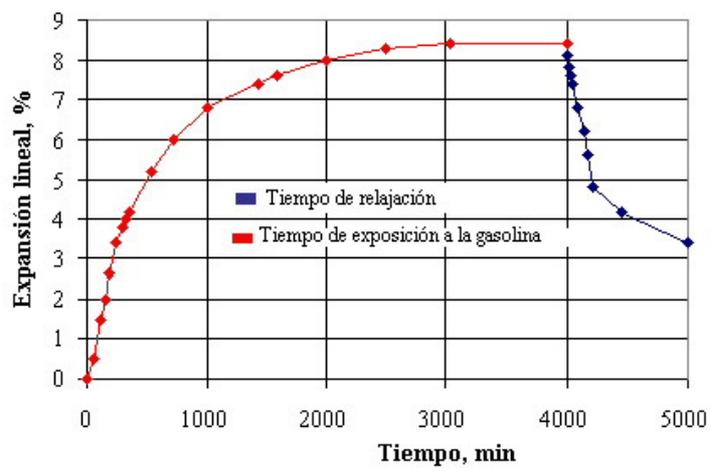


Figura 27. Saturación con exposición al vapor hasta llegar a la saturación del polímero.

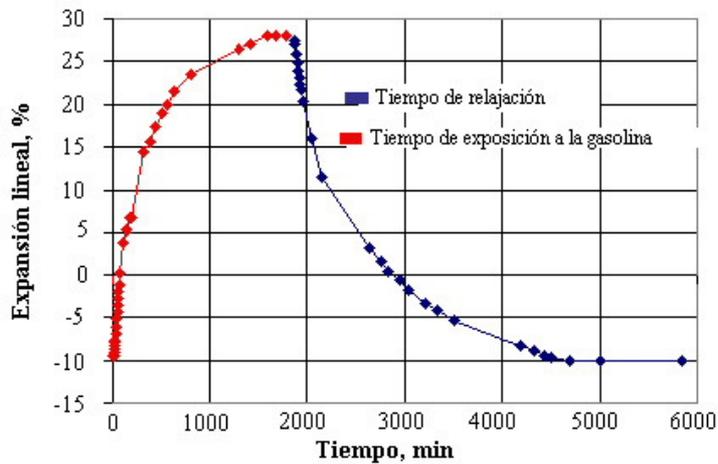


Figura 28. Saturación en exposición directa de la muestra con peso adicional hasta la saturación del polímero.

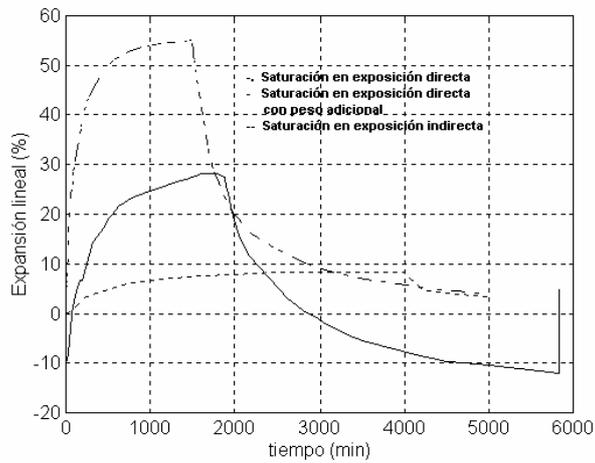


Figura 29. Comparación de los tiempos de saturación bajo distintas condiciones.

## Conclusiones

En este capítulo se ha presentado de manera breve el polímero que será utilizado como transductor en los siguientes dos capítulos. Se estudió y comprobó experimentalmente que la goma de *butyl* es capaz de hincharse y volver a su estado inicial cuando se coloca en ciclos húmedo/seco, respectivamente a través del

tiempo, tanto como para influencia directa (sumergido en hidrocarburo) como para influencia indirecta (únicamente el vapor). Cuando el polímero entra en contacto con la gasolina su máximo incremento es de más del 50% su expansión lineal, sin embargo, solamente el 8 % cuando la muestra está expuesta al vapor saturado. La muestra colocada con un peso adicional decrece un 15% de su tamaño original, su máximo incremento es de 28%.

Los resultados de los experimentos realizados con la goma de buytl concuerdan cualitativamente con los resultados presentados por otros autores, los cuales pusieron sus muestras bajo la influencia de otros hidrocarburos.

- [Allen 1972] Allen P. W., 1972, *Natural Rubber and the Synthetics*. New York, Wiley.
- [Askins 1995] Askins C. G., M.A. Putnam, E. J. Friebele, 1995, "Instrumentation for interrogating many-element fiber Bragg grating arrays", *Proc SPIE* vol. 2444, 257-266 pp.
- [Ayra 1998] Ayra V., K.A. Murphy, A. Wang, R. O. Claus, 1995, *J. Lightwave Technol.* LT-13, 1998 pp.
- [Bao 1994] Bao X., D. J. Webb y D. A. Jackson, 1994, "Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber", *Optics Lett.*, 19 (2), 141-143 pp.
- [Bao 1995] Bao X., J. Dhliwayo, N. Heron, D. J. Webb y D. A. Jackson, 1995, "Experimental and Theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering", *J. Lightwave Technol.*, 13, 1340-1348 pp.
- [Barnoski 1976] M. K. Barnoski y S. M. Jensen, 1976, "Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics", *Appl. Opt.*, 15 (9), 2112-2115 pp.
- [Beller 1998] Beller J., 'OTDRs and Backscatter Measurements', 1998, *Fiber Optic Test and Measurement*, Ed: D. Derickson. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- [Beltran 2002 A] Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, A. Marquez, R. Lopez y Spirin V.V., 2002, "Pérdidas por macrocurvaturas en fibras ópticas producidas por materiales suaves y expandibles para la detección de fugas de hidrocarburos", *Revista Mexicana de Física* 47 (5), 421-424 pp.
- [Beltran 2002 B] Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, J. Leon-Baez, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez-Lucero, 2002, Fiber bend losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection, *Optics communication*, 204, 145-150 pp.
- [Berthold III 1995] Berthold III J. W., 1995, "Historical Review of microbend Fiber-Optic Sensor", *Journal of Lightwave Technology*, 13 (7), 1193 pp.
- [Brinkmeyer 1980] Brinkmeyer E., 1980, *Electron. Lett.* 16 (1980), 329 pp.
- [Buck 1995] Buck J. A., 1995, *Fundamentals of Optical fibers*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, New York: Wiley.
- [Clark 1995] Clark T. y H. Smith, 1995, "Microbend fiber optic sensors", in *Fiber Optic Smart Structures*, editado por E. Udd: John Wiley & Sons, New York.
- [Conduit 1981] Conduit, A. J., D.N. Payne, A. H. Hartog y M. P. Gold, 1981, Optical fibre diameter variations and their effect on backscatter loss measurement, *Electron. Lett.*, 17, 308-310 pp.
- [Culshaw 1988] Culshaw B. 1988, "Optical fiber sensors: principles and components", *Basic concepts of optical fiber sensors 1*, Editado por Culshaw B. y Dakin J.
- [Dakin 1985 A] Dakin, J. P., D. J. Pratt, G. W. Bibby y J. N. Ross, 1985, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector, *Electron. Lett.* 21 (13), 569-570 pp.

- [Dakin 1985 B] Dakin J. P., D.J. Pratt., G.W. Bibby y J. N. Ross, 1985, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", *Electron. Lett.* 21 (13), 569-570, 1985 pp.
- [Dakin, 1992] Dakin J. P., 1992, "Distributed optical fiber sensors", *Distributed and Multiplexed fiber optic sensors II SPIE 1797*, 76-106 pp.
- [Dakin] Dakin J. y B. Culshaw, 1999, "Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends", Vol. 4, 1999.
- [Dakin 1999] Dakin J., S. Mackenzie y Hodgkinson J., 1999, "Optical Fiber – Chemical Sensing using direct Espectroscopy", *Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends*, Vol. 4, editado por John Dakin and Brain Culshaw.
- [Derickson 1998] Derickson Dennis, 1998, "Fiber optic Test and Measurement", editado por Derickson Dennis.
- [Di Vita 1980] Di Vita, P. y U. Rossi, 1980, "The backscattering technique: its field of applicability in fibre diagnostics and attenuation measurements", *Optical Quantum Electron.*, 11, 17-22pp.
- [Eickhoff 1981] Eickhoff W. y R. Ulrich, 1981, "Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber", *Appl. Phys. Lett.* 39 (9), 693-695 pp.
- [Falco 1989] Falco L. y P. Debergh, 1989, "Bimorphous distributed transduce for temperature threshold sensor", *Proc. SPIE* vol. 1011, 166-172 pp.
- [Ferrel 1988] Ferrel T.L., 1988, "Fiber-Optic Surface-Enhanced Raman System for field Screening of hazardous Compounds", *Proc. First International EPA Symposium on Field Screening Methods for Hazardous Waste Site Investigations*, Las Vegas, Nev.
- [Fields 1980 A] Fields J. N., 1980, "Pressure sensor", *J. Acoust. Soc. Am.*, 67, 816-818, pp.
- [Fields 1980 B] Fields J. N., 1980, "Attenuation of a parabolic-index fiber with periodic bends", *Appl. Phys. Lett.*, 36, 799-801 pp.
- [Franklin] Franklin Hodge, 2002, "Buytl rubber sheeting", Franklin Hodge Industries Limited, U.K.
- [Froggatt 2000] Froggatt M., B. Childers, J. Moore, T Erdogan, 2002, "High density strain sensing using optical frequency domain reflectometry", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical fiber Sensors, *Proc. SPIE Vol. 4185*, 249-255 pp.
- [Gambling 1978] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale y R. A. Sammut, 1978, "Measurement of radiation loss in curved singlemode fibers", *Microwaves, Opt. Aoust.*, 2 (4), 134-140 pp.
- [Gambling ] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale, 1979, "Curvature and microbending losses in single mode optical fibres", *Optical and Quantum Electronics* 11, 43-59 pp.
- [Gareth ] Gareth, Pierce S., Alistar MacLean, Brian Culshaw, 1995, "Optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend based optcar fibre sensors"
- [Garcus ] Garcus Dieter, T. Gogolla, K. Krebber y F. Schliep, 1997, "Brillouin Optical-Fiber Frequency-Domain Analysis for distributed temperature and strain Measurements", *Journal of Lightwave Technol.* 15 (4), 654-662 pp.
- [Gauthier 1997] Gauthier R. C. y C. Ross, 1997, "Theoretical and experimental consideration for single-mode fiber optic bend-type sensors", *Appl. Opt.*, 36 (25), 6264-6273 pp.
- [Giles 1983] Giles I. P., D. Uttam, B. Culshaw y D. E. N. Davies, 1983, "Coherent Optical-fibre sensors with modulated laser sources", *Electronics Letters*, 19, 14-15 pp.
- [Grassino] [Grassino B. Susan
- [Grattan 2000] Grattan K.T.V.y T. Sun, 2002, "Fiber Optic sensor technology: an overview", *Sensors and Actuators* 82, 40-61 pp.
- [Gysel 1990] Gysel P. y R.H.Staubli, 1990, "Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fiber", *J. Lightwave Technol.* 8 (4), 561-567 pp.
- [Hartog 1995] Hartog H., 1995, "Distributed fiber optic sensors", en *Optical fiber Sensor Technology*, editado por K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 347-382 pp.
- [Healey 1986] Healey, 1986, "Instrumentation principles for optical time domain reflectometry", *J. Phys. E: Sci Inst.*, 19, 334-341 pp.

- [Henderson 1997] Henderson PJ, N. E. Fisher y D.A. Jackson, "Current metering using fibre-grating based interrogation of a conventional current transformer", Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor, Williamsburg, USA, 186-9, 1997 pp.
- [Hewlett-Packard ] Hewlett-Packard company, 1992, "High-speed lighthwave component analysis", Application Note 1550-6
- [Horiguchi 1989 A] Horiguchi T. y M. Tateda, 1989, "Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave", Opt. Lett., 14 (8), 408-410 pp.
- [Horiguchi 1989 B] Horiguchi T. y M. Tateda, 1989, "BOTDA Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory", Journal Lightwave Technol., 7, 1170-1176 pp.
- [Horiguchi 1990] Horiguchi T., K. Shimizu, T. Kurashima, T., M. Tateda y Y. Koyamada, 1990, "Development of distributed sensing technique using Brillouin Scattering", J. of Lightwave Technol., 15 (8), 1038-1040 pp.
- [Horiguchi 1995 A] Horiguchi T., Shimizu, K., T. Kurashima, M. Tateda y Y. Koyamda, 1995, "Development of a Distributed Sensing Technique using Brillouin Scattering", J. Lightwave Techn., 13 (7), 1296-1302 pp.
- [Horiguchi 1995 B] Horiguchi Tsuneo, 1995, "Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering", Journal of Lightwave Technology, 13 (7).
- [Hymans 1960] Hymans A. J. y Lait J., 1960, "Analysis of a frequency modulated continuous wave ranging systems", Proc. IEEE, 107B, 365-372 pp.
- [IISRP ] IISRP company, 2002, "Butyl rubber", International Institute of Synthetic Rubber, inc.
- [Jones 1998 A] Jones J.D.C., R. McBride, 1998, "Multiplexing optical fiber sensor", Optical Fiber sensor technology, editado por Gratan K. y Meggot B.T., 12, London: Chapman & Hall.
- [Jones 1998 B] Jones S. L., G. Murtaza y J. M. Senior, 1998, "Single-Mode Optical Fiber Microbend Loss Modeling Using the Finite Difference Beam Propagation Method", Optical Fiber Technol. 4 pp. 471-479.
- [Kersey 1996] Kersey A. D., 1996, "A review of recent developments in fiber optic sensor technology", Optical fiber technology, 291-317 pp.
- [Kersey 1997] Kersey A. D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M, Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebel E.J., 1997, "Fiber grating sensors", J. Lightwave Technol. 15 (8), 14442-63 pp.
- [Kersey 1997B] Kersey Alan D., 1997, "Optical fiber sensors", Optical measurement and applications, editado por Pramod K. Rastogi, Artech House, Boston, 217-254 pp.
- [Kurashima 1990] Kurashima T., T. Horiguchi y M. Tateda, 1990, "Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers", Opt. Lett., 15 (8), 1038-1040 pp.
- [Kuzin 2001] Kuzin E.A., G. Beltran-Perez, J. Camas, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez, 2001, "Fiber losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection", Fiber Optic Sensor Technology and Applications, Newton, USA.
- [Kvasnik 1989] Kvasnik y McGrath A. D., 1989, "Distributed chemical sensing utilizing evanescent wave interactions", Chemical, Biomedical and Environmental Sensors, SPIE 1172, 75-82 pp.
- [Lecoeuche, 1999] Lecoeuche V., D. J. Webb, C.N. Pannell y D. A. Jackson, 1999, "25 km Brillouin based single-ended distributed fibre sensor for threshold detection of temperature or strain", Optics communications, 168, 95-102 pp.
- [Liaw 2000] Liaw S.K., S.L. Tzeng, y .J. Hung, 2001, "Rayleigh backscattering induced power penalty on bidirectional wavelength-reuse fiber systems", Opt. Comm. 188, 63-67 pp..
- [Lise] Lise Anderson Betty, 1995, "New approach to microbending fiber optic sensors: varying the spatial frequency", Optical Engineering, 34 (1), 208-213 pp.
- [López 2000] López R.M, V. Spirin, S. Miridinov, y M. Shlyagin, 2000, "Reflectometría óptica en el dominio de frecuencia para detección de fugas de hidrocarburos utilizando Sensores de fibra Óptica Basado en Microcurvaturas", XLIII Congreso Nacional de Física 2000.

- [López 2001] López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Márquez y A. Márquez, 2001, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend and macrobend-based fiber optic hydrocarbon sensors", Proc. SPIE vol. 4328, 114-121 pp.
- [López 2002A] López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, 2002, "Fiber optic distributed sensor for hydrocarbon leak localization based on transmission / reflection measurement", Optics & Laser Technology, 34 (6), 465-469 pp.
- [López 2002B] López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, 2002, "Sensor de Fibra óptica distribuido para localización de fugas de hidrocarburo basado en mediciones de transmisión / reflexión", Revista Mexicana de Física, 48 (5), 457-462 pp.
- [López 2002C] López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, G. Beltrán, E.A.Kuzin, A. Márquez, 2003, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of bend-based fiber optic hydrocarbon sensors", Optical fiber technology, aceptados bajo correcciones.
- [MacDonald 1981] MacDonald R. I., 1981, "Frequency domain optical reflectometer", Applied Optics. 20 (10), 1840-1844 pp.
- [MacDonald 1990] MacDonald R. I. y B. E. Swekla, 1990, "Frequency domain optical reflectometer using a GaAs optoelectronic mixer", Applied Optics 29 (31), 4578-4582 pp.
- [MacLean 2000A] MacLean, C. Moran, G. Thursby, S. G. Pierce, B. Culshaw, N.B. Graham, 2000, "Distributed Fibre Optic Sensors for Humidity and Hydrocarbon detection, Smart Structure and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation, SPIE vol. 3986, 342-351 pp.
- [MacLean 2000B] MacLean, C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw, D. Marsh, V. Watson y Geoff Andrews, 2000, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, SPIE Vol. 4185, 382-385 pp.
- [MacLean 2000C] MacLean A., C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw y D. Marsh, 2000, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", Smart Structure and Materials, SPIE vol. 4328, 47-53 pp.
- [Marcuse 1976 A] Marcuse D., 1976, "Curvature loss formula for optical fibers", J. Opt. Soc. Am., 66 (3), 216-220 pp.
- [Marcuse, 1976B] Marcuse D., 1976, "Microbending losses of single mode, step-index and multimode, parabolic-index fibers", Bell systems Techn. Journal 55, 937-955 pp.
- [Michie 1995 A] Michie W. C., B. Culshaw, I. Mckenzie, M. Konstantakis, N. B. Graham, C. Moran, F. Santos, E. Bergqvist, B. Carlstrom, 1995, "Distributed sensor for water and pH measurements using fiber optics and swellable polymeric systems", Optics Letters 20 (1), 103 pp.
- [Michie 1995 B] Michie W. C., B. Culshaw, M. Konstantakis, I. Mckenzie, S. Kelly, N. B. Graham, C. Moran, 1995, Distributed pH and water detection using fiber-optic sensors and hydrogels, J.Lightwave Technol. 13 (7), 1415 pp.
- [Miridonov 2001] Miridonov S.V., M.G. Shlyagin, D. Tentori, 2001, "Twin-grating fiber optic sensor demodulation", Optics Communications 191, 253-262 pp.
- [Mitchell] Mitchell G.L.", 1991, "Intensity-based and Fabry-Perot interferometer sensors", Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists, John Wiley & Sons, New York.
- [Morey 1991] Morey, W. W., J. R. Dunphy y G. Meltz, 1991, "Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensor", Distributed and Multiplexing Fiber-optic Sensor Proc. SPIE 1586, 216 pp.
- [Morton 1987] Morton M., 1987, Rubber Technology, New York: Von Nostrand Reinhold Co., edición 3era.
- [Mussi, 1996] Mussi G. y P. Stamp, 1996, "Polarization effects in C-OFDR", IEEE Photonics Tech. Letter, 8 (11), 1513-151 pp.
- [Murtaza 2001] Murtaza G., S.L. Jones, J.M. Senior y N. Haigh, 2001, "Loss Behavior of single-mode Optical Fiber Microbend Sensors", Fiber and Integrated Optics, 20, 53-58 pp.
- [Nasta 1994] Nasta M. N., V. Ayra, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1994, "Periodic microbending on single mode optical fibres for multiplexed sensing", Proc. SPIE, Smart Structures and Materials, 2191, 475-481 pp.
- [Nelson 1977] Nelson D. F., 1977, "Vibration-induced modulation of fiberguide transmission", Proc. Topical Meet. on Optical Fiber Transmission TU-E7-1 a TU-E7-4.

- [Ning 1998] Ning Y. N. y K.T.V. Grattan, 1998, "Optical Fiber Sensor technology: Devices and Technology vol. 2", editado por K.T.V. Grattan y B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 1998
- [Nolan 1991] Nolan D.A., P.E. Blaszyk y E. Udd., 1991., "Optical fibers", Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists, John Wiley & Sons, New York.
- [Ohno 2001] Ohno H., H. Naruse, M. Kihara y A. Shimada, 2001, "Industrial Applications of the BOTDR optical fiber Strain Sensor", Optical fiber technology 7, 45-64 pp.
- [Pacheco 1999] Pacheco M., F.M. Santoyo, L. A. Zenteno, 1999, "Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg gratin high-voltage sensor", Measurement Science Technol. 10 (9), 777 pp.
- [Passy 1994] Passy R., N. Gisin, J. P. von der Weid y H. H. Gilgen, 1994, "Experimental and theoretical investigation of coherent OFDR with semiconductor laser sources", Journal of Lightwave Technology 12, 1622-1630 pp.
- [Peng 1999] Peng Y.T., Y. Tang y J.S. Sirkis, 1999, "The characterization of hydrogen sensor based on palladium electroplated fiber Bragg gratings (FBG)", Proc. SPIE 3670, 42-53 pp.
- [Peterson 1980] Peterson J. I., S. R. Goldstein, Fitzgerald R. V. y D. K. Buckhold, 1980, "Fiber optic pH probe for physiological use", Anal. Chem., 52, 864 pp.
- [Probst 1989] Probst C. B., A. Bjarklev y S.B. Andreasen, 1989, "Experimental verification of microbending theory using mode coupling to discrete cladding modes", J. Lightwave Technol. 7 (1), 55-61 pp.
- [Rabiner 1975] Rabiner L.R. y B. G. Gold, 1975, "Theory and application of digital signal processing", Prentice-Hall, INC.
- [Rao 1999] Rao Y., 1999, "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors". Opt. Lasers Eng., 31, 297-324 pp.
- [Roger, 1980] Roger, A.J., 1980, "Polarization optical time domain reflectometry", Electron. Lett. 16, 489 pp.
- [Roger, 2002] Roger A.J., 2002 "Distributed fibre measurement using backscatter polarimetry"
- [Rogers 1994] Rogers A. J., 1994, "High resolution frequency-derived distributed optical fiber sensing", Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors IV, Proc. SPIE 2294, 2 pp.
- [Ross 1982] Ross J.N., 1982, "Birefringence measurement in optical fibers by polarization optical time domain reflectometry", Appl. Opti. 21, 3489 pp.
- [Sharma 1984] Sharma A. B., A.H. Al-Ani y S. J. Halme, 1984, "Constant-curvature loss in monomode fibers: an experimental investigation", Applied Optics, 23 (19), 3297-3301 pp.
- [Shimizu 1994 A] Shimizu Kaoru, T. Horiguchi, Y. Koyamada, T. Kurashima, 1994, "Coherent Self-Heterodyne Brillouin OTDR for Measurement of Brillouin Frequency Shift Distribution in Optical Fibers", Journal of Lightwave Technology, 12 (5), 730-736 pp.
- [Shimizu 1994 B] Shimizu, K., T. Horiguchi y Y. Koyamada., 1994, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network using Brillouin OTDR", Optical Fiber Sensor 10, 142-145 pp.
- [Shimizu 1995] Shimizu K., T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network by use of Brillouin optical time-domain reflectometry", Opt. Lett., 20 (5), 507-509 pp.
- [Shlyagin 1997] Shlyagin M.G., S.V. Miridonov y D. Tentori, Castillo J., 1997, "Twin grating -based interferometric fiber sensor", 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor. In: OSA Technical Digest Series, Vol. 16, 472-474 pp.
- [Shlyagin 1999] Shlyagi, M. G., S. V. Miridonov, D. Tentori, F. J. Mendieta y V. V. Spirin, 1999, "Multiplexing of grating-based fiber sensors using broadband spectral coding," Proceedings of SPIE vol. 3541, 271-278 pp.
- [Spammer 1997] Spammer S.S., P. L. Swart y A.A. Chtcherbakov, 1997, "Merged Sagnac-Michelson Interferometer for distributed disturbance detection", Journal of Lightwave Technol., 15 (6), 1-4 pp.
- [Spillman 1997] Spillman W.B. Jr, 1997, "Fiber optics and smart structures", Optical fiber Sensors: Applications, analysis, and future trends vol. 4, editado por J. Dakin y B. Culshaw, Artech House, Boston, London.

- [Spirin 2000] Spirin V., S. Miridonov, M. Shlyagin, I. Márquez y R.M. López, 2000, “Diferential twin Bragg grating sensor for temperature and strain gradient measurement”, EOS/SPIE International Symposium on Applied Photonics, Glasgow, Escocia, Reino Unido..
- [Spirin 1999 A] Spirin V., I. Márquez, R. López, M. Shlyagin y S. Miridonov, 1999. “Investigación del nuevo sensor químico basado en rejillas de Bragg en fibra óptica”, XLII Congreso Nacional de Física 1999.
- [Spirin 1999 B] Spirin V.V., M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, F. J. Mendieta Jiménez, R. M. López Gutiérrez, 1999, “Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection”, *Optics and Láser in Engineering*, 32 (5),. 497 – 503 pp.
- [Spirin 2002 A] Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002, “Transmission / reflection analysis for distributed optical fibre loss sensor interrogation”, *Electronics Letters*, 38 (3), 117 pp.
- [Spirin 2002 B] Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002, “Alarm-condition detection and localization using Rayleigh scattering for a fiber-optic bending sensor with an unmodulated light source”, *Optics Communications*, 205 (1), 37-41 pp.
- [Spirin 2002 C] Spirin V. V., R.M. Lopez, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Marquez, E.A. Kuzin, G. Beltran-Perez y Pieter L. Swart, 2002, “Fiber Optic Sensor for Hydrocarbon Leak Detection and Localization”, *Smart Structures and Materials 2002: Smart Sensor Technology and Measurement Systems*, SPIE 4694, 341-348pp.
- [Tateda 1989] Tateda M. y T. Horiguchi, 1989, “Advances in optical time domain reflectometry”, *Journal of Lightwave Technology*, 7 1217-1224 pp.
- [Tesis] Tesis
- [Thévenaz 1998] Thévenaz L., Nikles M., Fellay A., Facchini M. Robert P., 1998, “Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers”, *Conference on sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for SSM, San Diego, Ca.*, SPIE Vol. 330, 301-314 pp.
- [Tsuji 1995] Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, “Coherent optical frequency domain reflectometry for a long single-mode optical fiber using a coherent lightwave source and an external phase modulator”, *IEEE Photonics Technology Letters* 7, 804-806 pp.
- [Tsuji 1997 A] Tsuji K., Shimizu K., Horiguchi T. y Koyamada Y., 1997, “Spatial-resolution improvement in long-range coherent optical frequency domain reflectometry by frequency-sweep linearisation”, *Electronics Letters* 33, 408-410 pp.
- [Tsuji 1997 B] Tsuji, K., Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997, “Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave”, *Journal of Lightwave Technology* 15, 1102-1109 pp.
- [Tsuji 1997 C] Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997, “Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave”, *Journal of Lightwave Technology* 15, 1102-1109 pp.
- [Tsuji 1998] Tsuji K. y T. Horiguchi, 1998, “Fading noise reduction for coherent optical frequency domain reflectometer with 30 cm spatial resolution and 15 dB dynamic range”, *Optical Fiber Sensor* 13, 584-587 pp.
- [Udd 1991] Udd Eric, 1991, *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, editado por Eric Udd, John Wiley & Sons, New York.
- [Uttam 1985] Uttam D. y B. Culshaw, 1985, “Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using frequency modulated continuous wave ranging technique”, *J. Lightwave Technol.*, 3, 971-977 pp.
- [Vivek 1995] Vivek Arya, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1995, “Microbend Losses in Singlemode Optical Fibers: Theoretical and Experimental investigation”, *Journal of Lightwave Technology* 13 (10).
- [Von der Weid 1997] Von der Weid J. P., R. Passy, G. Mussi y N. Gisin, “On characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometer”, *J. Lightwave Technol.* 15 (7), 1131-1141 pp.

- [Won 2001] Won P.C., L.K Seah y A.K. Asundi, 2001, "FMCW reflectometric optical fiber strain sensor", Smart Structure and Materials Proc. SPIE 4328, 54-62 pp.
- [Yariv 1984] Yariv. A. y P. Yen, 1984, Optical waves in crystals, John Wiley&Sons.
- [Tai 1987] Tai Hideo, H. Tanaka y Toshihiko Y., 1897, "Fiber optic evanescent-wave methane-gas sensor using optical absorption for the 3.392-  $\mu\text{m}$  line of a He=Ne laser", Optics Letters, 12 (6).
- [Brehnan 1988] Brehnan B. W., 1988, "Prototype polarimetric based fiber optic strain gauge", Reviews of progress in quantitative nondestructive evaluation, Plenum Press, New York, 547 pp.
- [Tan 1996] Tan Y., T. C. Tan, 1996, "Modeling and sensing characteristics of an amperometric hydrocarbon sensor", Chemical engineering science, 51(16), 4001-4011 pp.
- [Kashyap] Kashyap Raman, 1999, "Fiber Bragg gratings", Optics and Photonics, Academic Press.
- [Seitz] Seitz, W. Rudolf, 1988, "Chemical sensors based on immobilized indicators and fiber optics", CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry, 19 (2), 135-173 pp.

## Mecanismo de sensado basado en polímeros expansibles

### Introducción

Para sensores de detección de hidrocarburo se ha optado por trabajar con sensores de fibra óptica debido a las ventajas que conlleva como se revisó en el capítulo II. Una vez que se decidió trabajar con sensores de fibra óptica, es necesario encontrar un transductor que provoque un cambio en la fibra óptica bajo alguna influencia externa y así cambiar los parámetros de la luz, en el capítulo III, se presentaron algunos polímeros sensibles al hidrocarburo que pueden perturbar a la fibra.

En este capítulo se presentarán dos mecanismos que pueden perturbar a la fibra bajo la influencia de hidrocarburo. Uno de ellos es perturbación basada en curvaturas<sup>1</sup>, el cual potencialmente puede utilizarse para sensores distribuidos. El segundo mecanismo es basado en rejillas de Bragg<sup>2</sup>, este mecanismo puede utilizarse como sensor multipunto y además se probará que el polímero tiene suficiente fuerza para producir perturbación en la fibra.

#### Mecanismo basado en pérdidas por curvaturas

Los sensores de fibra óptica que utilizan pérdidas por curvatura son asociados con microcurvaturas en las fibras. Los sensores que usan pérdidas por curvatura causada por materiales expansibles para agua e hidrocarburo dan resultados prometedores [Michie *et al.*, 1995A], [Michie *et al.*, 1995B], [MacLean *et al.*, 2000C]

Las microcurvaturas son pequeñas perturbaciones mecánicas que producen modos guiados con el núcleo de la fibra para ser acoplados a los modos de radiación.

Las pérdidas en fibras de índice graduado dependen fuertemente del período de perturbación con resonancia alrededor de 1-2mm. Las fibras de índice escalonado no tienen condición de resonancia, sin embargo, existe el valor umbral del período, para períodos mayores que el umbral, las pérdidas son pequeñas, el valor umbral típico es de 1mm. En estas fibras existe un efecto de saturación en desplazamientos grandes (son varios decimos de micrómetros). Se han publicado varios artículos sobre pérdidas en fibra por microcurvatura

[Jones *et al.*, 1998 B], [Nasta *et al.*, 1994], [Probst *et al.*, 1989], [Ayra *et al.*, 1998].

Es de importancia determinar el periodo de las curvaturas para el cual la transmisión decrece más rápidamente. El cambio en las propiedades de la luz se induce creando una fuerza significativa, produciendo curvaturas en la fibra óptica y de este modo se causan pérdidas.

Para medir las pérdidas por curvatura se utilizaron dos dispositivos para producir perturbaciones periódicas, se muestra en la figura 30 a) y b). La figura 30 a) consiste de un lab jack, con un material suave sobre la mesa y un tubo de aluminio con diez anillos de cobre cuyo diámetro es de 1mm y un indicador del nivel que se utilizó para medir el desplazamiento del lab jack.

Deleted: .

Deleted: potencialmente

Deleted: con el cual

Deleted: este mecanismo puede utilizarse como sensor multipunto,¶

Deleted: además

Deleted:

Deleted:

Deleted:

Deleted: para

Deleted: ¶

Deleted: es inducido

Deleted: de este modo produce

Deleted: .

Deleted: causando

Deleted: el

<sup>1</sup> El material presentado en la sección 4.3 está basado en los resultados que aparecen en [Beltran 2002A, Beltran 2000 B y Kuzin 2001]

<sup>2</sup> El material presentado en la sección 4.2 está basado en los resultados que aparecen en [Spirin 1999A, Spirin 1999B y Spirin 2000]

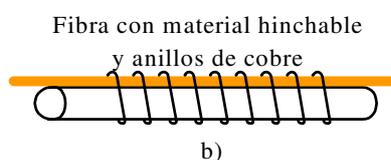
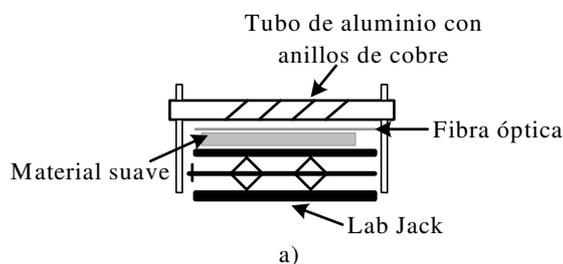


Figura 30. Mecanismos para producir curvaturas.

El segundo mecanismo (figura 30 b)), la fibra óptica y el polímero expandible se mantienen juntos con los anillos de cobre, en este mecanismo el sensor se expone a la gasolina para crear fuerza.

**Deleted:** hinchable

### *Pérdidas por macrocurvaturas producidas por materiales expansibles*

En la figura 31 se muestra el banco de medición que se utilizó para medir pérdidas por curvatura. El sistema general consiste de una fuente de luz, un monocromador, un amplificador lock-in, un detector de InGaAs y una computadora. La radiación desde una lámpara de tungsteno fue colimada a través de un lente L1 a la rendija de entrada del monocromador y se enfocó de la lente L2 a la fibra óptica. Se utilizó una fibra mono modo de 6 m de largo con un diámetro de  $9.3\mu\text{m}$  y un diámetro de recubrimiento de  $250\mu\text{m}$ . El extremo final de la fibra se conectó al detector y éste a su vez al amplificador y finalmente la información se almacenó en una computadora.

**Deleted:** , excepto un caso especialmente mencionado,

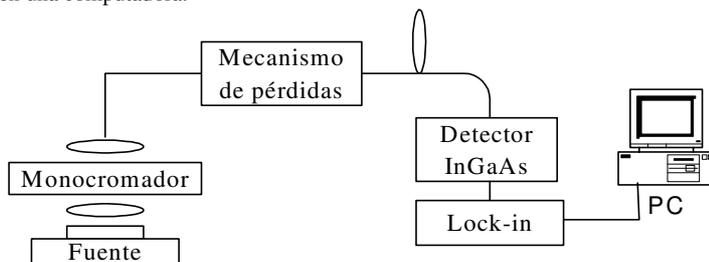


Figura 31. Banco de medición experimental para medición de pérdidas por curvaturas.

Con el mecanismo mostrado en la figura 30 a) se obtuvo la dependencia entre la transmisión para diferentes periodos en el intervalo de 1 a 15mm ejerciendo presión. Los resultados se muestran en la figura 32, donde claramente se observa que la transmisión empieza a decrecer para periodos grandes y después para periodos

**Deleted:** midió

cortos. Para los períodos grandes la transmisión decrece mas abruptamente, esto indica que para estos periodos hay que ejercer menos presión.

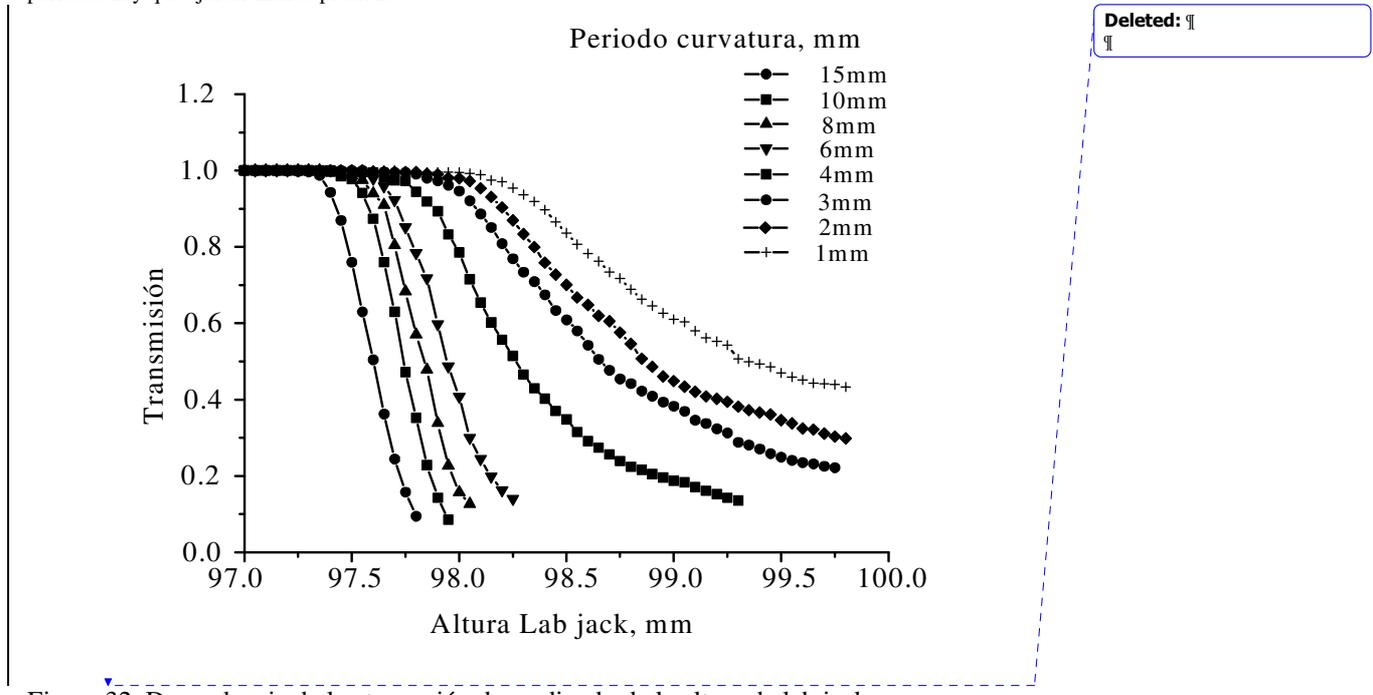


Figura 32. Dependencia de la atenuación dependiendo de la altura de lab jack.

Para validar los resultados del sensor se utilizó el mecanismo mostrado en la figura 30 b). Este mecanismo es un prototipo de sensor para detección de fugas de hidrocarburo.

A partir de las mediciones se calculó la dependencia de la atenuación del período para varios desplazamientos específicos. En la figura 33 se muestran los resultados para el desplazamiento igual a 0.37 mm para materiales con módulo de Young igual a 314 y 519 kPa. La altura es igual a 97.25 mm, donde las pérdidas empiezan a aparecer, este es referido como un cero. El número de anillos es constante para todos los períodos. así cuando el período incrementa, la longitud de fibra que sufre las curvaturas es mayor. En la figura 33 se puede observar que para períodos mayores a 3 mm la atenuación incrementa hasta el período de 10 mm. El material que tiene mas alto módulo de Young causa más alta atenuación por curvatura.

Deleted: ¶  
¶

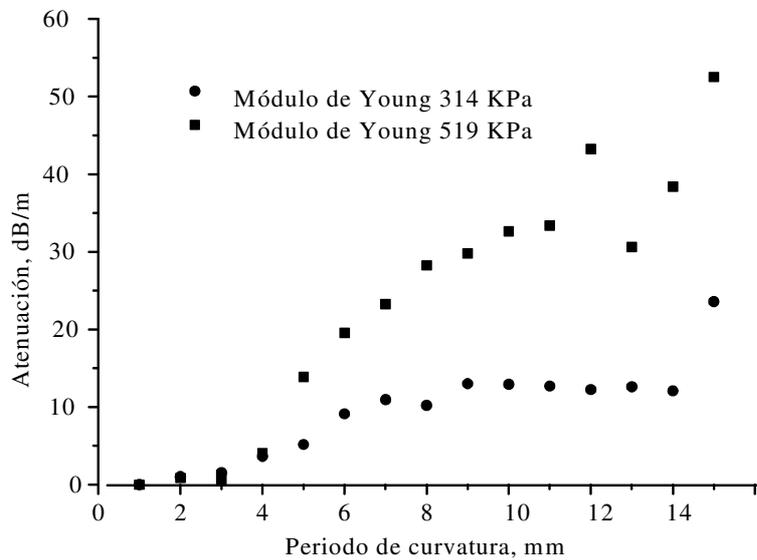
Deleted: . De ah

Deleted: i, c

Deleted: figura

Deleted: el cual

Deleted: a



Deleted: ¶

Figura 33. Dependencia de la atenuación de una fibra monomodal con respecto al periodo de perturbación para dos alturas específicas del lab jack (314 kPa y 519 kPa).

Un importante factor es la dependencia espectral de las pérdidas por curvatura. Con el mecanismo mostrado en la figura 30 a) se midió la atenuación en un intervalo de longitud de onda desde 1500 a 1600 nm. En la figura 34 se muestra la dependencia de la transmisión en función de la longitud de onda. Para [la que](#) se utilizó un material con módulo de Young de 519 kPa, un período de 10 mm y un desplazamiento igual a 0.37 y 0.5 mm. Las dependencias experimentales no tienen pequeños picos de atenuación, como [las que se presentan cuando se trata de](#) en pérdidas por microcurvaturas para fibras monomodales. Se hicieron varias mediciones espectrales para diferentes períodos y los resultados fueron los mismos.

Deleted: esta figura

Deleted: se esperaría

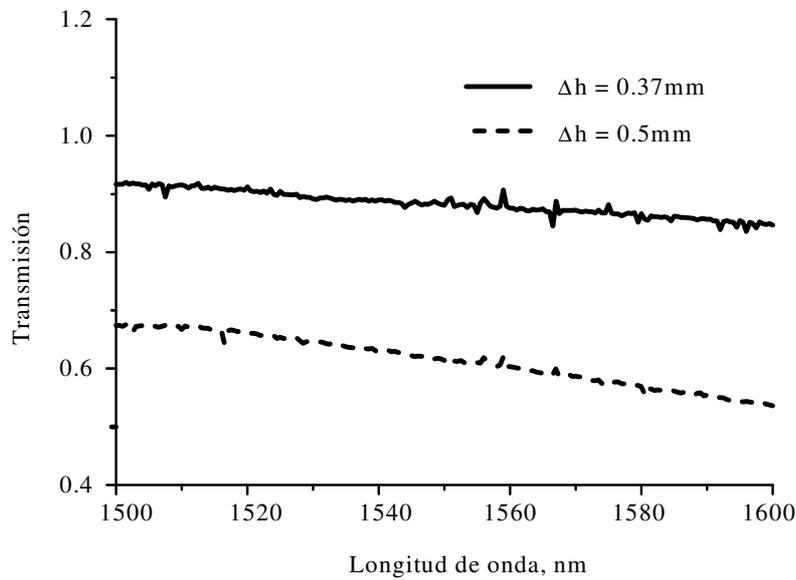


Figura 34. Dependencia espectral de la atenuación.

La figura 35 muestra la transmisión contra tiempo después que el sensor entra en contacto con gasolina para el mecanismo mostrado en la figura 30 b). Aquí también se puede ver que la atenuación crece más rápido para el período de 20 mm que para el de 5mm. Ambos mecanismos concuerdan, es decir, para períodos grandes decae más rápidamente la transmisión.

La figura 36 muestra los resultados para el sensor con fibra multimodo de índice de graduado. Se utilizó una fibra con el diámetro del núcleo de  $62.5\ \mu\text{m}$  y una diámetro de cubierta de  $500\ \mu\text{m}$ .

Deleted:

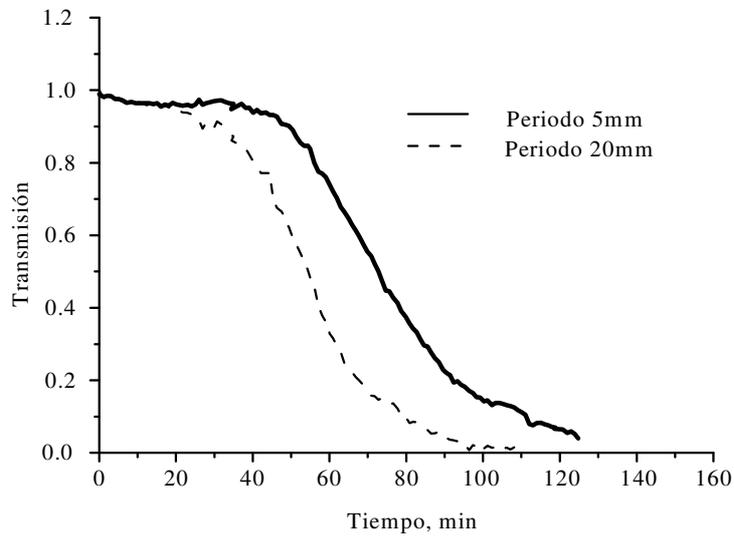


Figura 35. Atenuación experimental para sensor de fibra monomodal.

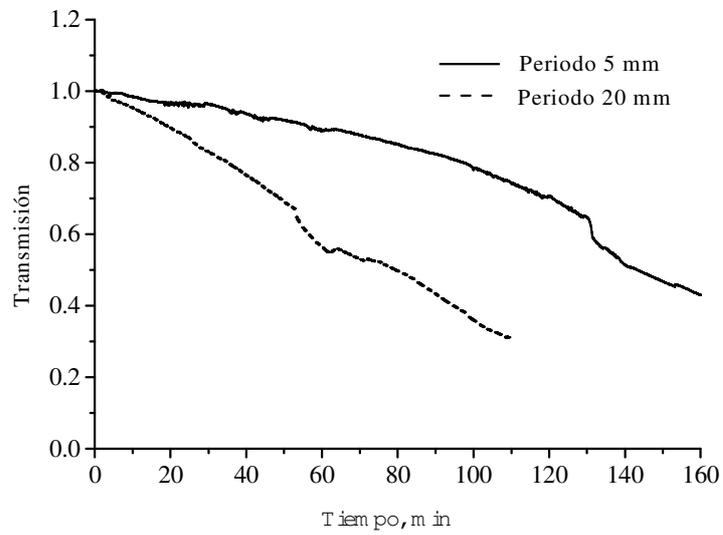


Figura 36. Atenuación experimental para sensor de fibra multimodal.

En la figura 35 se puede observar que para obtener la mitad de la transmisión, para un período de 5 mm hay que esperar 80 minutos, mientras que para un período de 20mm el tiempo de espera es de 60 minutos.

Los resultados existentes sobre microcurvaturas muestran:

- (a) Atenuación más pequeña para períodos grandes.
- (b) Existen picos de atenuación sobre la dependencia espectral de la atenuación, estos picos son tan altos como de 25 dB para fibras monomodales.
- (c) La atenuación en fibras monomodales es menor que en las multimodo.

Los resultados muestran que la atenuación es más pequeña para períodos pequeños y no existen picos de atenuación con respecto al barrido espectral de la longitud de onda.

La explicación sobre el inciso (c) se puede basar en el hecho que estas configuraciones los desplazamientos son más profundas y los períodos son más grandes comparados con los microcurvadores convencionales (experimental y teóricamente).

Estos resultados son compatibles cualitativamente con los resultados producidos por pérdidas únicamente por curvatura.

Cuando se colocan dos anillos con una separación de 10 mm y otros dos con una separación de 5 mm, lo que sucede es que con una separación de 5 mm, la fibra está casi recta cuando hay presión sobre los anillos mientras que cuando la separación es de 10 mm y de igual manera al ejercer presión sobre los anillos, a la fibra entre los dos anillos tiene cierta curvatura. De ahí, se puede ver que la curvatura de la fibra depende del período, para períodos más grandes es mayor la curvatura. Esto permite entender la dependencia de la atenuación sobre el período.

### Mecanismo de sensado basados en rejillas de Bragg

Los sensores de fibra óptica utilizando rejillas de Bragg son muy atractivos tanto para científicos como para ingenieros debido a su capacidad de multicanalización. Las rejillas de Bragg en fibra óptica se producen con variaciones periódicas en el índice de refracción a lo largo de secciones cortas en el núcleo en una fibra óptica. Si hay alguna perturbación se determina a partir del desplazamiento de la longitud de onda de Bragg.

Existen sensores basados en dos rejillas de Bragg separadas por una distancia corta. Este sensor trabaja como un interferómetro no balanceado sensible a la temperatura o variaciones de tensión axial. El procedimiento de demodulación del sensor consiste en la evaluación de la fase del patrón de interferencia producido por la luz reflejada de ambas rejillas y en la determinación del corrimiento de la longitud de onda de Bragg. Esta información se puede extraer desde la distribución de fase de la imagen del espectro óptico en el dominio de Fourier [Miridonov, 2001].

### Sensor utilizando una rejilla de Bragg

Usualmente, las rejillas de Bragg en fibra son utilizadas como sensores de temperatura y estrés ya que un espectro de reflexión impreso en el núcleo de la fibra depende principalmente de la temperatura de la fibra y estrés axial. Sin embargo, la lista de influencias medidas por un sensor de FBG se puede ampliar utilizando un material sensible o transductor, que tense a la rejilla de Bragg bajo alguna influencia externa. La FBG sujeta a materiales especiales, fue utilizada para medición de voltaje y corriente eléctrica [Pacheco et al., 1999]. [Henderson et al., 1997], detección hidrocarburo.

Como es bien conocido, el petróleo es clasificado como sustancia peligrosa, de ahí las fugas en las pipas y tanques de almacenaje son muy peligrosas, esto puede conducir a una contaminación significativa del medio ambiente y tener resultados catastróficos si no son detectados, localizados y reparados en la etapa inicial. De ahí, el desarrollo de un sistema de rápida respuesta para detección y localización de fugas de hidrocarburo tiene un objetivo muy importante.

El principio básico de medición utilizando sensor de rejilla de Bragg, es monitorear el espectro de reflexión de la rejilla y determinando el corrimiento de la longitud de onda de Bragg desde su posición calibrada. Una

Deleted: ¶

Deleted: aros

Deleted: A partir del desplazamiento de la longitud de onda

Deleted: determinar si hay alguna perturbación.¶

Deleted: que consisten

Deleted: o

Deleted: se basa en

Deleted: desde

Deleted: porque

Deleted: n

Deleted: extender

Deleted: tensan

Deleted: fueron

Deleted: ]-{

relación entre la tensión axial  $\epsilon$ , un cambio de temperatura  $\Delta T$  y el corrimiento relativo de la longitud de onda Bragg  $\Delta\lambda_B/\lambda_B$  se representa por [Rao, 1999]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = K_\epsilon \epsilon + K_T \Delta T \quad (44)$$

donde  $\lambda_B$  es la longitud de la rejilla de Bragg de la rejilla sin tensión en la temperatura de calibración.  $K_\epsilon$ ,  $K_T$  son los coeficientes de tensión y temperatura y  $\epsilon$  y  $\Delta T$  son la tensión axial y el cambio de temperatura en la fibra, respectivamente. Los coeficientes de tensión y temperatura medidos para la rejilla con  $\lambda_B \approx 1550$  nm fueron  $K_\epsilon = 0.78 \times 10^{-6} 1/\mu\epsilon$  y  $K_T = 6.67 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ , respectivamente [Kersey *et al.*, 1997]

### Sensor de fibra óptica para detección de gasolina con una rejilla de Bragg

Para realizar este sensor se utilizó una rejilla de Bragg grabada en fibra atada a un polímero especial, que se expande con la absorción de hidrocarburo. Se crea una fuerza en la fibra con la rejilla por la expansión del polímero, alcanzando una tensión axial y corrimiento de la longitud de Bragg. Ya que el corrimiento de la longitud de onda  $\Delta\lambda_B$  depende de ambos, tensión y temperatura y una gran variación de temperatura es común en aplicaciones prácticas, mediciones especiales no deben tomarse para distinguir entre efectos mecánicos y térmicos [Jones y McBride 1998A]. Esta también es llamada sensibilidad cruzada, se puede superar en este caso, utilizando un polímero con una velocidad de expansión altamente lineal y con un modulo de Young para transformar eficientemente la expansión del polímero en tensión de la fibra. La variación de la temperatura ambiente  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$  deja un corrimiento en la longitud de onda de la rejilla de Bragg de alrededor de 0.5 nm, esto corresponde aproximadamente a una variación de  $430\mu\epsilon$  en la tensión en una temperatura fija. La tensión en la fibra debido a la expansión del polímero puede exceder significativamente este valor. De ahí, el sensor puede detectar confiablemente la presencia de hidrocarburo. En la figura 37 se presenta el sensor de una rejilla. La sección de la fibra donde fue grabada en el núcleo la rejilla de Bragg se coloca dentro de un cilindro de goma de butyl a lo largo de su eje atado por un par de platos metálicos en ambos lados de la rejilla. El polímero se expande bajo la influencia de hidrocarburo dando como resultado, el alargamiento de la fibra, produciendo el corrimiento de la longitud de onda de la rejilla de Bragg hacia una longitud de onda más grande. Las rejillas de Bragg se grabaron en el núcleo de una fibra monomodo usando una técnica de máscara de fase y cuarta armónica de un láser Q-switched Nd: YAG en la longitud de onda de 266nm. La rejilla tiene una longitud de alrededor de 1mm y una reflectividad del 2%.

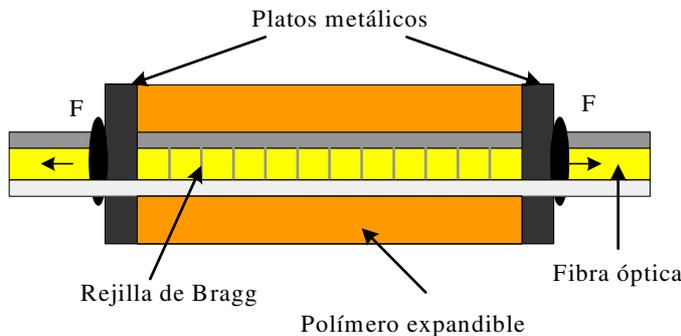


Figura 37. Configuración del sensor de una rejilla de Bragg.

El banco experimental para detección de fugas de hidrocarburo se muestra en la figura 38. El haz de un diodo láser sintonizable con barrido en un intervalo de longitud de onda de 1534-1538 nm se introduce a la fibra sensor a través de un acoplador de 3 dB. Se utilizó un multimetro óptico HP8153A para medir la

- Deleted: Deleted:
- Deleted: Deleted: U
- Deleted: Deleted: se crea
- Deleted: Deleted: el hinchamiento
- Deleted: Deleted: siendo aplicada a la fibra a la fibra con la rejilla,
- Deleted: Deleted: son
- Deleted: Deleted: deben ser no tomadas
- Deleted: Deleted:
- Deleted: Deleted: Este
- Deleted: Deleted: es
- Deleted: Deleted: llamado
- Deleted: Deleted: ser superado
- Deleted: Deleted: por utilizar
- Deleted: Deleted: de variación
- Deleted: Deleted: hinchamiento
- Formatted: Formatted
- Deleted: Deleted: hincha
- Deleted: Deleted: y el efecto de la fibra a través de un par de platos metálicos atados a la fibra en ambos lados de la rejilla. C
- Deleted: Deleted: de
- Deleted: Deleted: al lado de la longitud
- Deleted: Deleted: de
- Deleted: Deleted: en presencia del hidrocarburo.¶
- Deleted: Deleted: S

Deleted: Deleted: Un

intensidad de la luz reflejada. El puerto no ocupado del acoplador y el extremo final de la fibra sensor fueron sumergidos en líquido de inmersión para prevenir reflexiones. Para controlar el barrido de longitud de onda y adquisición de datos se utilizó una computadora. Todos los experimentos fueron realizados con una temperatura entre 22-25°C.

Para el estudio de la respuesta del sensor, éste se colocó en un recipiente con gasolina. El espectro de reflexión de la rejilla fue siempre grabado en 1-2 minutos. El espectro grabado se realizó con una resolución de longitud de onda de 0.01 nm. El corrimiento del espectro de reflexión se observó debido al proceso de expansión del polímero.

En la figura 39 se muestra la dependencia temporal de la longitud de onda resonante de Bragg de la rejilla bajo la influencia de gasolina. Después de 20 minutos la gasolina fue removida del recipiente y un tiempo después el polímero vuelve a su estado original. Se puede ver el corrimiento de la longitud de onda de Bragg de la medición, donde el corrimiento es mayor a 2 nm en 20 minutos bajo influencia de gasolina. Este corrimiento excede significativamente el ancho del espectro de reflexión de la rejilla que es aproximadamente de 0.5nm.

**Deleted:** colocados

**Deleted:** siempre

**Deleted:** fue realizado

**Deleted:** observo

**Deleted:** hinchamiento

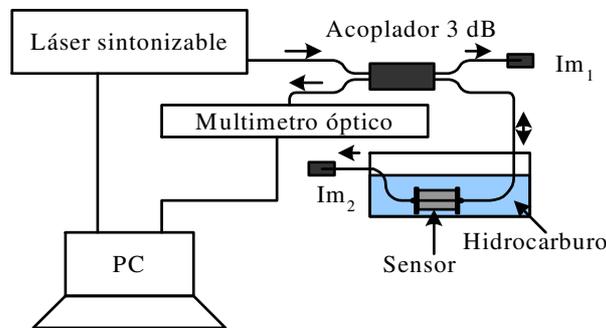


Figura 38. Banco experimental del sensor de prueba para una rejilla de Bragg.

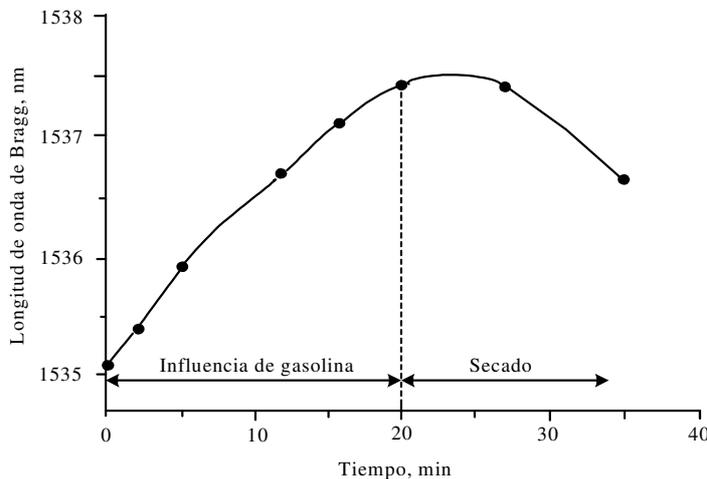


Figura 39. Dependencia temporal de la longitud de onda de Bragg del sensor bajo influencia de gasolina.

**Deleted:** En la Fig. 39 se muestra la dependencia temporal de la longitud de onda resonante de Bragg de la rejilla bajo la influencia de gasolina. Después de 20 minutos la gasolina fue removida del recipiente, para que el polímero vuelva a su estado original. Se puede ver el corrimiento de la longitud de onda de Bragg de la medición, donde el corrimiento es mayor a 2 nm en 20 minutos bajo influencia de gasolina. Este corrimiento excede significativamente el ancho del espectro de reflexión de la rejilla el cual es de alrededor de 0.5nm.

## Sensores utilizando doble rejilla de Bragg

El elemento básico del sensor diferencial es un interferómetro formado por un par de rejillas débiles [Shlyagin *et al.*, 1997] con igual reflectividad de bajo porcentaje (1%) separadas por una distancia  $L_{FP}$ . La rejilla de referencia es separada por una distancia de aproximadamente 2 cm de la rejilla de medición. La configuración experimental del sensor se muestra en la figura 40. Las rejillas son idénticas y su espectro se traslapa en la condición de no perturbación.

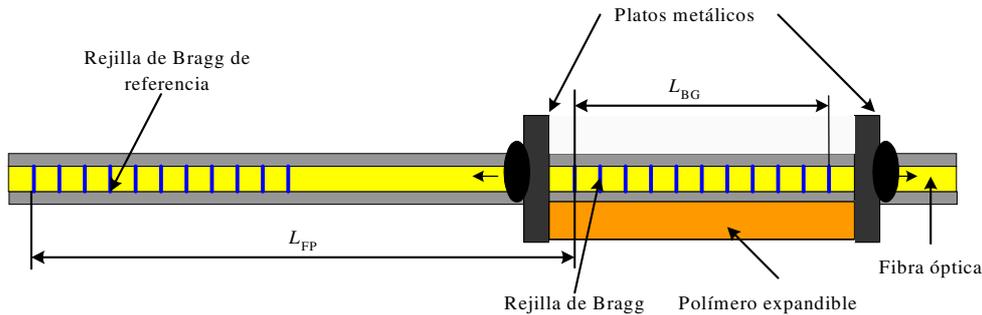


Figura 40. Configuración del sensor de doble rejilla de Bragg.

La interferencia producida por los haces reflejados de las dos rejillas aparece como una modulación senoidal en el espectro de reflexión en el intervalo de la longitud de onda donde el espectro de ambas rejillas se traslapa una con la otra. La distancia  $L_{FP}$  entre las dos rejillas define el valor de la frecuencia de modulación. El espectro de reflexión  $R_{12}(\lambda)$  de la doble estructura con dos rejillas diferentes se encuentra [Miridonov *et al.*, 2001]

$$R_{12}(\lambda) = |r_{12}(\lambda)|^2 = |r_1(\lambda) + r_2(\lambda) \exp(-i4\pi n L_{FP} / \lambda)|^2 = |r_1(\lambda)|^2 + |r_2(\lambda)|^2 + 2|r_1(\lambda)r_2(\lambda)| \cos(4\pi n L_{FP} / \lambda) \quad (45)$$

donde  $r_{12}$  es la reflectividad compleja de la estructura de doble rejilla,  $n$  es el índice efectivo del núcleo,  $r_1$  y  $r_2$ , son las reflectividades complejas de la primera y segunda rejilla, respectivamente, las cuales se pueden encontrar a partir de las ecuaciones de modos acoplados (ver ejemplo [Yariv y Yen, 1984]).

La idea básica del sensor diferencial de doble rejilla es medir la energía del patrón de interferencia en el espectro de reflexión que es creado por el par de rejillas de Bragg. La energía de la modulación senoidal  $E_{AC}$  se define como

$$E_{AC} = \int 2|r_1(\lambda)r_2(\lambda)| \cos(4\pi n L_{FP} / \lambda) d\lambda \quad (46)$$

y alcanza el máximo para rejillas idénticas, es decir, cuando el espectro de las dos rejillas coinciden completamente y llega a ser cero cuando el espectro no se traslapa. La energía de la señal de interferencia cambia cuando las rejillas no son uniformes, cambia los parámetros debido a las diferentes temperatura y tensión en puntos donde las rejillas se localizan. Sin embargo, si los efectos externos de tensión y temperatura son iguales en ambas rejillas, no cambia la energía de las componentes de interferencia. Así, el sensor diferencial de doble rejilla de Bragg es sensible al gradiente espacial de temperatura y tensión, es libre de la influencia de temperatura y tensión espacialmente uniforme.

La energía de la componente de interferencia fácilmente se puede calcular a partir de la transformada de Fourier del espectro de reflexión. Además, tomando en cuenta el teorema de Parseval que conecta la energía de la señal con su patrón de energía de Fourier (ver ejemplo [Rabiner y Gold, 1975]):

Deleted: .1

Deleted: una

Deleted: del

Formatted

Deleted: El elemento básico del sensor diferencial de doble rejilla es a partir de rejillas de Bragg débiles con igual reflectividad de aproximadamente de bajo porcentaje, separadas por una longitud  $L_{FP}$ .

Deleted: dos

Deleted: sde

Formatted

Deleted: como

Deleted: ¶

Formatted

Formatted

Formatted

Formatted

Formatted

Deleted: comienza

Deleted: son

Deleted: das.

Deleted: pero este

$$\sum_{n=0}^{N-1} |r_{12}(\lambda_n)|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} |c_k|^2 \quad (47)$$

el coeficiente de la transformada de Fourier de la función de reflectividad:

$$c_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} r_{12}(\lambda_n) e^{-2\pi i k n / N} \quad (48)$$

donde  $N$  es el número de muestras del espectro medido en la longitud de onda  $\lambda_n$  y  $c_k$  es el coeficiente de la transformada de Fourier.

Se puede calcular la energía normalizada  $E_{AC}^N$  de la componente de interferencia sumando los cuadrados de las amplitudes de las componentes de Fourier del patrón de interferencia alrededor de la frecuencia de modulación central  $K_0$ :

$$E_{AC}^N = \frac{\sum_{k=k_0-\Delta k}^{k_0+\Delta k} |c_k|^2}{\sum_{k=0}^{(N/2)-1} |c_k|^2} \quad (49)$$

donde  $2\Delta k$  es el ancho del intervalo sumado que debe exceder ligeramente el ancho del pico de la señal,  $(N/2-1)$  es la longitud de la mitad de la imagen de Fourier de la señal.

### Sensor para detección de gasolina utilizando dos rejillas de Bragg

El banco experimental para detección de fugas de hidrocarburo se muestra en la figura 41. El haz de un diodo láser sintonizable con barrido en un intervalo de longitud de onda de 1534-1538 nm se introduce a la fibra sensor a través de un acoplador de 3 dB. Se utilizó un multimetro óptico HP8153A para medir la intensidad de la luz reflejada. El puerto no ocupado del acoplador y el extremo final de la fibra sensor se sumergieron en líquido de inmersión para prevenir reflexiones. Para controlar el barrido de longitud de onda y adquisición de datos se utilizó una computadora. Todos los experimentos fueron realizados con una temperatura entre 22-25°C.

La figura 42 muestra la dependencia de la energía normalizada del término de interferencia contra el tiempo de influencia de gasolina. Aquí, se normalizó la energía del término de interferencia sobre la energía total del espectro de reflexión incluyendo la componente de DC.

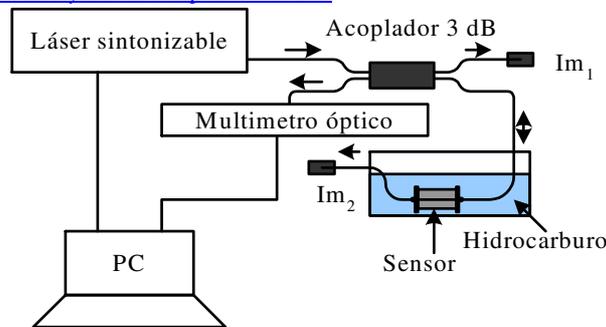


Figura 41. Banco experimental del sensor de prueba para doble rejillas de Bragg.

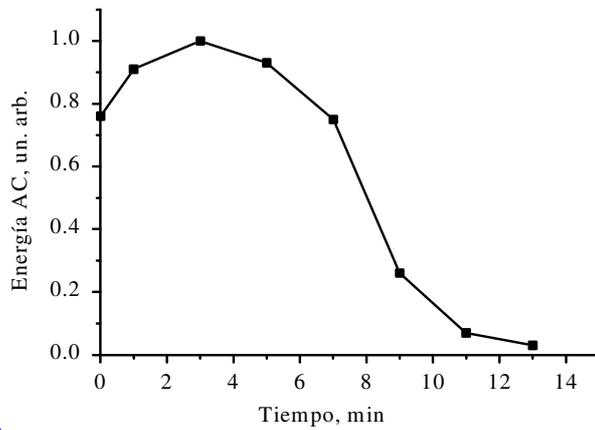
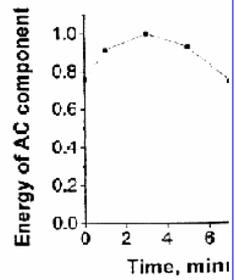


Figura 42. Dependencia del término de energía de interferencia sobre el tiempo de influencia de gasolina.

**Deleted:** La Fig. 42 muestra la dependencia de la energía normalizada del término de interferencia contra el tiempo de influencia de gasolina. Aquí, se normalizó la energía del término de interferencia sobre la energía total del espectro de reflexión incluyendo la componente de DC.



La longitud de onda inicial de la rejilla medida fue aproximadamente de 0.1 nm menor que la rejilla de referencia. Esto es porque la energía del término de interferencia alcanza un máximo aproximadamente 3 minutos después de sumergir el sensor en gasolina. La evolución del espectro reflejado del sensor se muestra en la figura 43, éste muestra una reversibilidad del sensor, es decir, el espectro regresa a su forma inicial y la posición de la longitud de onda después de un período de secado.

La principal ventaja del sensor diferencial es su baja sensibilidad a las variaciones de temperatura, siempre y cuando el coeficiente térmico del transductor sea igual al coeficiente del vidrio, la variación de la temperatura ambiente afecta de igual manera a las dos rejillas, así no cambia la energía de la componente de interferencia.

**Deleted:** La reflectividad de la rejilla medida es dos veces más alta que de la referencia de una.

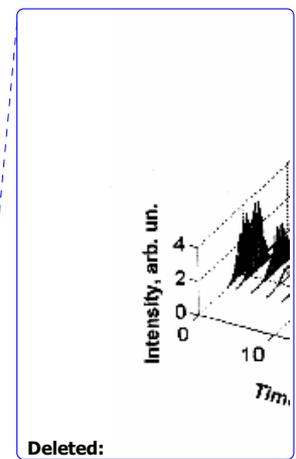
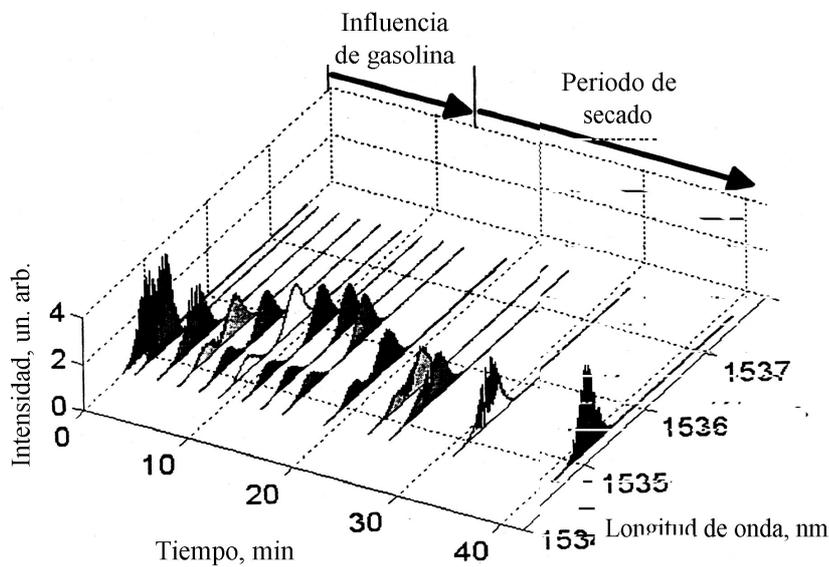
**Deleted:** una de

**Deleted:** .

**Deleted:**

**Deleted:** Si

**Deleted:** varía a



Deleted:

Figura 43. Comportamiento del espectro de reflexión con respecto al tiempo durante el periodo de humedad y secado.

### Conclusión del capítulo IV

En este capítulo se presentan los dos principales mecanismos de sensado que se pueden utilizar para detección de fuga de hidrocarburo.

En el mecanismo utilizando curvatura, puede alcanzar la más alta atenuación y rápida operación del sensor con periodos grandes de perturbación (5-10mm). Las fibras monomodal tienen pérdidas más altas que las fibras multimodo bajo las mismas condiciones experimentales después de 40 minutos de exposición al hidrocarburo. Las pérdidas son causadas únicamente por curvaturas.

Los sensores de rejillas de Bragg (una y doble), fueron utilizados para probar que el polímero tiene la suficiente fuerza para cambiar los parámetros de la luz. Esto queda demostrado ya que cuando se utiliza la estructura basada en una sola rejilla de Bragg se tiene que el corrimiento de la longitud de onda de Bragg. Esta estructura puede utilizarse como sensor de punto para detección de fugas de hidrocarburo ya que la longitud de onda puede exceder 2nm bajo 20 minutos de influencia de gasolina, este corrimiento es significativamente más grande que el posible corrimiento debido a la variación de la temperatura ambiente, el cual es usualmente menor que .5 nm.

La configuración de doble rejilla de Bragg depende del coeficiente de expansión de temperatura solamente en el caso que el polímero tuviera el mismo coeficiente que el vidrio el sensor es libre de la influencia de temperatura y puede reducir significativamente el tiempo de respuesta para la detección de hidrocarburos sin falsa alarma.

Las rejillas de Bragg se pueden utilizar como sensores multipuntos para detección de hidrocarburo.

Deleted: se

Deleted: altas

|

- [Allen 1972] Allen P. W., 1972, *Natural Rubber and the Synthetics*. New York, Wiley.
- [Askins 1995] Askins C. G., M.A. Putnam, E. J. Friebele, 1995, "Instrumentation for interrogating many-element fiber Bragg grating arrays", *Proc SPIE* vol. 2444, 257-266 pp.
- [Ayra 1998] Ayra V., K.A. Murphy, A. Wang, R. O. Claus, 1995, *J. Lightwave Technol.* LT-13, 1998 pp.
- [Bao 1994] Bao X., D. J. Webb y D. A. Jackson, 1994, "Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber", *Optics Lett*, 19 (2), 141-143 pp.
- [ Bao 1995] Bao X., J. Dhliwayo , N. Heron, D. J. Webb y D. A. Jackson, 1995, "Experimental and Theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering", *J. Lightwave Technol.*, 13, 1340-1348 pp.
- [Barnoski 1976] M. K. Barnoski y S. M. Jensen, 1976, "Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics", *Appl. Opt.*, 15 (9), 2112-2115 pp.
- [Beller 1998] Beller J. , 'OTDRs and Backscatter Measurements', 1998, *Fiber Optic Test and Measurement*, En: D. Derickson. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- [Beltran 2002 A] Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, A. Marquez, R. Lopez y Spirin V.V., 2002, "Pérdidas por macrocurvaturas en fibras ópticas producidas por materiales suaves y expandibles para la detección de fugas de hidrocarburos", *Revista Mexicana de Física* 47 (5), 421-424 pp.
- [Beltran 2002 B] Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, J. Leon-Baez, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez-Lucero, 2002, Fiber bend losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection, *Optics communication*, 204, 145-150 pp.
- [Berthold III 1995] Berthold III J. W., 1995, "Historical Review of microbend Fiber-Optic Sensor", *Journal of Lightwave Technology*, 13 (7), 1193 pp.
- [Brinkmeyer 1980] Brinkmeyer E., 1980, *Electron. Lett.* 16 (1980), 329 pp.
- [Buck 1995] Buck J. A., 1995, *Fundamentals of Optical fibers*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, New York: Wiley.
- [Clark 1995] Clark T. y H. Smith, 1995, "Microbend fiber optic sensors", in *Fiber Optic Smart Structures*, editado por E. Udd: John Wiley & Sons, New York.
- [Conduit 1981] Conduit, A. J., D.N. Payne, A. H. Hartog y M. P. Gold, 1981, Optical fibre diameter variations and their effect on backscatter loss measurement, *Electron. Lett.*, 17, 308-310 pp.
- [Culshaw 1988] Culshaw B. 1988, "Optical fiber sensors: principles and components", *Basic concepts of optical fiber sensors 1*, Editado por Culshaw B. y Dakin J.

- [Dakin 1985 A] Dakin, J. P., D. J. Pratt, G. W. Bibby y J. N. Ross, 1985, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector, *Electron. Lett.* 21 (13), 569-570 pp.
- [Dakin 1985 B] Dakin J. P., D.J. Pratt., G.W. Bibby y J. N. Ross, 1985, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", *Electron. Lett.* 21 (13), 569-570, 1985 pp.
- [Dakin, 1992] Dakin J. P., 1992, "Distributed optical fiber sensors", *Distributed and Multiplexed fiber optic sensors II SPIE 1797*, 76-106 pp.
- [Dakin] Dakin J. y B. Culshaw, 1999, "Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends", Vol. 4, 1999.
- [Dakin 1999] Dakin J., S. Mackenzie y Hodgkinson J., 1999, "Optical Fiber – Chemical Sensing using direct Espectroscopy", *Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends*, Vol. 4, editado por John Dakin and Brain Culshaw.
- [Derickson 1998] Derickson Dennis, 1998, "Fiber optic Test and Measurement", editado por Derickson Dennis.
- [Di Vita 1980] Di Vita, P. y U. Rossi, 1980, "The backscattering technique: its field of applicability in fibre diagnostics and attenuation measurements", *Optical Quantum Electron.*, 11, 17-22pp.
- [Eickhoff 1981] Eickhoff W. y R. Ulrich, 1981, "Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber", *Appl. Phys. Lett.* 39 (9), 693-695 pp.
- [Falco 1989] Falco L. y P. Debergh, 1989, "Bimorphous distributed transduce for temperature threshold sensor", *Proc. SPIE vol. 1011*, 166-172 pp.
- [Ferrel 1988] Ferrel T.L., 1988, "Fiber-Optic Surface-Enhanced Raman System for field Screening of hazardous Compounds", *Proc. First International EPA Symposium on Field Screening Methods for Hazardous Waste Site Investigations*, Las Vegas, Nev.
- [Fields 1980 A] Fields J. N., 1980, "Pressure sensor", *J. Acoust. Soc. Am.*, 67, 816-818, pp.
- [Fields 1980 B] Fields J. N., 1980, "Attenuation of a parabolic-index fiber with periodic bends", *Appl. Phys. Lett.*, 36, 799-801 pp.
- [Franklin] Franklin Hodge, "Buytl rubber sheeting", Franklin Hodge Industries Limited, U.K.
- [Froggatt 2000] Froggatt M., B. Childers, J. Moore, T Erdogan, 2002, "High density strain sensing using optical frequency domain reflectometry", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical fiber Sensors, *Proc. SPIE Vol. 4185*, 249-255 pp.
- [Gambling 1978] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale y R. A. Sammut, 1978, "Measurement of radiation loss in curved singlemode fibers", *Microwaves, Opt. Aoust.*, 2 (4), 134-140 pp.
- [Gambling ] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale, 1979, "Curvature and microbending losses in single mode optical fibres", *Optical and Quantum Electronics* 11, 43-59 pp.
- [Gareth ] Gareth, Pierce S., Alistar MacLean, Brian Culshaw, 1995, "Optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend based optical fibre sensors"
- [Garcus ] Garcus Dieter, T. Gogolla, K. Krebber y F. Schliep, 1997, "Brillouin Optical-Fiber Frequency-Domain Analysis for distributed temperature and strain Measurements", *Journal of Lightwave Technol.* 15 (4), 654-662 pp.
- [Gauthier 1997] Gauthier R. C. y C. Ross, 1997, "Theoretical and experimental consideration for single-mode fiber optic bend-type sensors", *Appl. Opt.*, 36 (25), 6264-6273 pp.
- [Giles 1983] Giles I. P., D. Uttam, B. Culshaw y D. E. N. Davies, 1983, "Coherent Optical-fibre sensors with modulated laser sources", *Electronics Letters*, 19, 14-15 pp.
- [Grassino] [Grassino B. Susan
- [Grattan 2000] Grattan K.T.V. y T. Sun, 2002, "Fiber Optic sensor technology: an overview", *Sensors and Actuators* 82, 40-61 pp.
- [Gysel 1990] Gysel P. y R.H. Staubli, 1990, "Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fiber", *J. Lightwave Technol.* 8 (4), 561-567 pp.
- [Hartog 1995] Hartog H., 1995, "Distributed fiber optic sensors", en *Optical fiber Sensor Technology*, editado por K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 347-382 pp.

- [Healey 1986] Healey, 1986, "Instrumentation principles for optical time domain reflectometry", J. Phys. E: Sci Inst., 19, 334-341 pp.
- [Henderson 1997] Henderson PJ, N. E. Fisher y D.A. Jackson, "Current metering using fibre-grating based interrogation of a conventional current transformer", Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor, Williamsburg, USA, 186-9, 1997 pp.
- [Hewlett-Packard] Hewlett-Packard company, 1992, "High-speed lighthwave component analysis", Application Note 1550-6
- [Horiguchi 1989 A] Horiguchi T. y M. Tateda, 1989, "Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave", Opt. Lett., 14 (8), 408-410 pp.
- [Horiguchi 1989 B] Horiguchi T. y M. Tateda, 1989, "BOTDA Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory", Journal Lightwave Technol., 7, 1170-1176 pp.
- [Horiguchi 1990] Horiguchi T., K. Shimizu, T. Kurashima, T., M. Tateda y Y. Koyamada, 1990, "Development of distributed sensing technique using Brillouin Scattering", J. of Lightwave Technol., 15 (8), 1038-1040 pp.
- [Horiguchi 1995 A] Horiguchi T., Shimizu, K., T. Kurashima, M. Tateda y Y. Koyamda, 1995, "Development of a Distributed Sensing Technique using Brillouin Scattering", J. Lightwave Techn., 13 (7), 1296-1302 pp.
- [Horiguchi 1995 B] Horiguchi Tsuneo, 1995, "Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering", Journal of Lightwave Technology, 13 (7).
- [Hymans 1960] Hymans A. J. y Lait J., 1960, "Analysis of a frequency modulated continuous wave ranging systems", Proc. IEEE, 107B, 365-372 pp.
- [IISRP] IISRP company, "Butyl rubber", International Institute of Synthetic Rubber, inc.
- [Jones 1998 A] Jones J.D.C., R. McBride, 1998, "Multiplexing optical fiber sensor", Optical Fiber sensor technology, editado por Gratan K. y Meggot B.T., 12, London: Chapman & Hall.
- [Jones 1998 B] Jones S. L., G. Murtaza y J. M. Senior, 1998, "Single-Mode Optical Fiber Microbend Loss Modeling Using the Finite Difference Beam Propagation Method", Optical Fiber Technol. 4 pp. 471-479.
- [Kersey 1996] Kersey A. D., 1996, "A review of recent developments in fiber optic sensor technology", Optical fiber technology, 291-317 pp.
- [Kersey 1997] Kersey A. D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M, Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebel E.J., 1997, "Fiber grating sensors", J. Lightwave Technol. 15 (8), 1444-63 pp.
- [Kersey 1997B] Kersey Alan D., 1997, "Optical fiber sensors", Optical measurement and applications, editado por Pramod K. Rastogi, Artech House, Boston, 217-254 pp.
- [Kurashima 1990] Kurashima T., T. Horiguchi y M. Tateda, 1990, "Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers", Opt. Lett., 15 (8), 1038-1040 pp.
- [Kuzin 2001] Kuzin E.A., G. Beltran-Perez, J. Camas, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez, 2001, "Fiber losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection", Fiber Optic Sensor Technology and Applications, Newton, USA.
- [Kvasnik 1989] Kvasnik y McGrath A. D., 1989, "Distributed chemical sensing utilizing evanescent wave interactions", Chemical, Biomedical and Environmental Sensors, SPIE 1172, 75-82 pp.
- [Lecoeuche, 1999] Lecoeuche V., D. J. Webb, C.N. Pannell y D. A. Jackson, 1999, "25 km Brillouin based single-ended distributed fibre sensor for threshold detection of temperature or strain", Optics communications, 168, 95-102 pp.
- [Liaw 2000] Liaw S.K., S.L. Tzeng, y .J. Hung, 2001, "Rayleigh backscattering induced power penalty on bidirectional wavelength-reuse fiber systems", Opt. Comm. 188, 63-67 pp..
- [Lise] Lise Anderson Betty, 1995, "New approach to microbending fiber optic sensors: varying the spatial frequency", Optical Engineering, 34 (1), 208-213 pp.
- [López 2000] López R.M, V. Spirin, S. Miridinov, y M. Shlyagin, 2000, "Reflectometría óptica en el dominio de frecuencia para detección de fugas de hidrocarburos utilizando Sensores de fibra Óptica Basado en Microcurvaturas", XLIII Congreso Nacional de Física 2000.

- [López 2001] López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Márquez y A. Márquez, 2001, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend and macrobend-based fiber optic hydrocarbon sensors", Proc. SPIE vol. 4328, 114-121 pp.
- [López 2002A] López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, 2002, "Fiber optic distributed sensor for hydrocarbon leak localization based on transmission / reflection measurement", Optics & Laser Technology, 34 (6), 465-469 pp.
- [López 2002B] López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, 2002, "Sensor de Fibra óptica distribuido para localización de fugas de hidrocarburo basado en mediciones de transmisión / reflexión", Revista Mexicana de Física, 48 (5), 457-462 pp.
- [López 2002C] López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, G. Beltrán, E.A.Kuzin, A. Márquez, 2003, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of bend-based fiber optic hydrocarbon sensors", Optical fiber technology, aceptados bajo correcciones.
- [MacDonald 1981] MacDonald R. I., 1981, "Frequency domain optical reflectometer", Applied Optics. 20 (10), 1840-1844 pp.
- [MacDonald 1990] MacDonald R. I. y B. E. Swekla, 1990, "Frequency domain optical reflectometer using a GaAs optoelectronic mixer", Applied Optics 29 (31), 4578-4582 pp.
- [MacLean 2000A] MacLean, C. Moran, G. Thursby, S. G. Pierce, B. Culshaw, N.B. Graham, 2000, "Distributed Fibre Optic Sensors for Humidity and Hydrocarbon detection, Smart Structure and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation, SPIE vol. 3986, 342-351 pp.
- [MacLean 2000B] MacLean, C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw, D. Marsh, V. Watson y Geoff Andrews, 2000, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, SPIE Vol. 4185, 382-385 pp.
- [MacLean 2000C] MacLean A., C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw y D. Marsh, 2000, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", Smart Structure and Materials, SPIE vol. 4328, 47-53 pp.
- [Marcuse 1976 A] Marcuse D., 1976, "Curvature loss formula for optical fibers", J. Opt. Soc. Am., 66 (3), 216-220 pp.
- [Marcuse, 1976B] Marcuse D., 1976, "Microbending losses of single mode, step-index and multimode, parabolic-index fibers", Bell systems Techn. Journal 55, 937-955 pp.
- [Michie 1995 A] Michie W. C., B. Culshaw, I. Mckenzie, M. Konstantakis, N. B. Graham, C. Moran, F. Santos, E. Bergqvist, B. Carlstrom, 1995, "Distributed sensor for water and pH measurements using fiber optics and swellable polymeric systems", Optics Letters 20 (1), 103 pp.
- [Michie 1995 B] Michie W. C., B. Culshaw, M. Konstantakis, I. Mckenzie, S. Kelly, N. B. Graham, C. Moran, 1995, Distributed pH and water detection using fiber-optic sensors and hydrogels, J.Lightwave Technol. 13 (7), 1415 pp.
- [Miridonov 2001] Miridonov S.V., M.G. Shlyagin, D. Tentori, 2001, "Twin-grating fiber optic sensor demodulation", Optics Communications 191, 253-262 pp.
- [Mitchell] Mitchell G.L.", 1991, "Intensity-based and Fabry-Perot interferometer sensors", Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists, John Wiley & Sons, New York.
- [Morey 1991] Morey, W. W., J. R. Dunphy y G. Meltz, 1991, "Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensor", Distributed and Multiplexing Fiber-optic Sensor Proc. SPIE 1586, 216 pp.
- [Morton 1987] Morton M., 1987, Rubber Technology, New York: Von Nostrand Reinhold Co., edición 3era.
- [Mussi, 1996] Mussi G. y P. Stamp, 1996, "Polarization effects in C-OFDR", IEEE Photonics Tech. Letter, 8 (11), 1513-151 pp.
- [Murtaza 2001] Murtaza G., S.L. Jones, J.M. Senior y N. Haigh, 2001, "Loss Behavior of single-mode Optical Fiber Microbend Sensors", Fiber and Integrated Optics, 20, 53-58 pp.
- [Nasta 1994] Nasta M. N., V. Ayra, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1994, "Periodic microbending on single mode optical fibres for multiplexed sensing", Proc. SPIE, Smart Structures and Materials, 2191, 475-481 pp.
- [Nelson 1977] Nelson D. F., 1977, "Vibration-induced modulation of fiberguide transmission", Proc. Topical Meet. on Optical Fiber Transmission TU-E7-1 a TU-E7-4.

- [Ning 1998] Ning Y. N. y K.T.V. Grattan, 1998, "Optical Fiber Sensor technology: Devices and Technology vol. 2", editado por K.T.V. Grattan y B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 1998
- [Nolan 1991] Nolan D.A., P.E. Blaszyk y E. Udd., 1991., "Optical fibers", Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists, John Wiley & Sons, New York.
- [Ohno 2001] Ohno H., H. Naruse, M. Kihara y A. Shimada, 2001, "Industrial Applications of the BOTDR optical fiber Strain Sensor", Optical fiber technology 7, 45-64 pp.
- [Pacheco 1999] Pacheco M., F.M. Santoyo, L. A. Zenteno, 1999, "Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg gratin high-voltage sensor", Measurement Science Technol. 10 (9), 777 pp.
- [Passy 1994] Passy R., N. Gisin, J. P. von der Weid y H. H. Gilgen, 1994, "Experimental and theoretical investigation of coherent OFDR with semiconductor laser sources", Journal of Lightwave Technology 12, 1622-1630 pp.
- [Peng 1999] Peng Y.T., Y. Tang y J.S. Sirkis, 1999, "The characterization of hydrogen sensor based on palladium electroplated fiber Bragg gratings (FBG)", Proc. SPIE 3670, 42-53 pp.
- [Peterson 1980] Peterson J. I., S. R. Goldstein, Fitzgerald R. V. y D. K. Buckhold, 1980, "Fiber optic pH probe for physiological use", Anal. Chem., 52, 864 pp.
- [Probst 1989] Probst C. B., A. Bjarklev y S.B. Andreasen, 1989, "Experimental verification of microbending theory using mode coupling to discrete cladding modes", J. Lightwave Technol. 7 (1), 55-61 pp.
- [Rabiner 1975] Rabiner L.R. y B. G. Gold, 1975, "Theory and application of digital signal processing", Prentice-Hall, INC.
- [Rao 1999] Rao Y., 1999, "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors". Opt. Lasers Eng., 31, 297-324 pp.
- [Roger, 1980] Roger, A.J., 1980, "Polarization optical time domain reflectometry", Electron. Lett. 16, 489 pp.
- [Roger, 2002] Roger A.J., 2002 "Distributed fibre measurement using backscatter polarimetry"
- [Rogers 1994] Rogers A. J., 1994, "High resolution frequency-derived distributed optical fiber sensing", Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors IV, Proc. SPIE 2294, 2 pp.
- [Ross 1982] Ross J.N., 1982, "Birefringence measurement in optical fibers by polarization optical time domain reflectometry", Appl. Opti. 21, 3489 pp.
- [Sharma 1984] Sharma A. B., A.H. Al-Ani y S. J. Halme, 1984, "Constant-curvature loss in monomode fibers: an experimental investigation", Applied Optics, 23 (19), 3297-3301 pp.
- [Shimizu 1994 A] Shimizu Kaoru, T. Horiguchi, Y. Koyamada, T. Kurashima, 1994, "Coherent Self-Heterodyne Brillouin OTDR for Measurement of Brillouin Frequency Shift Distribution in Optical Fibers", Journal of Lightwave Technology, 12 (5), 730-736 pp.
- [Shimizu 1994 B] Shimizu, K., T. Horiguchi y Y. Koyamada., 1994, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network using Brillouin OTDR", Optical Fiber Sensor 10, 142-145 pp.
- [Shimizu 1995] Shimizu K., T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network by use of Brillouin optical time-domain reflectometry", Opt. Lett., 20 (5), 507-509 pp.
- [Shlyagin 1997] Shlyagin M.G., S.V. Miridonov y D. Tentori, Castillo J., 1997, "Twin grating -based interferometric fiber sensor", 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor. In: OSA Technical Digest Series, Vol. 16, 472-474 pp.
- [Shlyagin 1999] Shlyagi, M. G., S. V. Miridonov, D. Tentori, F. J. Mendieta y V. V. Spirin, 1999, "Multiplexing of grating-based fiber sensors using broadband spectral coding," Proceedings of SPIE vol. 3541, 271-278 pp.
- [Spammer 1997] Spammer S.S., P. L. Swart y A.A. Chtcherbakov, 1997, "Merged Sagnac-Michelson Interferometer for distributed disturbance detection", Journal of Lightwave Technol., 15 (6), 1-4 pp.
- [Spillman 1997] Spillman W.B. Jr, 1997, "Fiber optics and smart structures", Optical fiber Sensors: Applications, analysis, and future trends vol. 4, editado por J. Dakin y B. Culshaw, Artech House, Boston, London.

- [Spirin 2000] Spirin V., S. Miridonov, M. Shlyagin, I. Márquez y R.M. López, 2000, "Diferential twin Bragg grating sensor for temperature and strain gradient measurement", EOS/SPIE International Symposium on Applied Photonics, Glasgow, Escocia, Reino Unido..
- [Spirin 1999 A] Spirin V., I. Márquez, R. López, M. Shlyagin y S. Miridonov, 1999. "Investigación del nuevo sensor químico basado en rejillas de Bragg en fibra óptica", XLII Congreso Nacional de Física 1999.
- [Spirin 1999 B] Spirin V.V., M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, F. J. Mendieta Jiménez, R. M. López Gutiérrez, 1999, "Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection", *Optics and Láser in Engineering*, 32 (5),. 497 – 503 pp.
- [Spirin 2002 A] Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002, "Transmission / reflection analysis for distributed optical fibre loss sensor interrogation", *Electronics Letters*, 38 (3), 117 pp.
- [Spirin 2002 B] Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002, "Alarm-condition detection and localization using Rayleigh scattering for a fiber-optic bending sensor with an unmodulated light source", *Optics Communications*, 205 (1), 37-41 pp.
- [Spirin 2002 C] Spirin V. V., R.M. Lopez, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Marquez, E.A. Kuzin, G. Beltran-Perez y Pieter L. Swart, 2002, "Fiber Optic Sensor for Hydrocarbon Leak Detection and Localization", *Smart Structures and Materials 2002: Smart Sensor Technology and Measurement Systems*, SPIE 4694, 341-348pp.
- [Tateda 1989] Tateda M. y T. Horiguchi, 1989, "Advances in optical time domain reflectometry", *Journal of Lightwave Technology*, 7 1217-1224 pp.
- [Tesis] Tesis
- [Thévenaz 1998] Thévenaz L., Nikles M., Fellay A., Facchini M. Robert P., 1998, "Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers", *Conference on sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for SSM, San Diego, Ca.*, SPIE Vol. 330, 301-314 pp.
- [Tsuji 1995] Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Coherent optical frequency domain reflectometry for a long single-mode optical fiber using a coherent lightwave source and an external phase modulator", *IEEE Photonics Technology Letters* 7, 804-806 pp.
- [Tsuji 1997 A] Tsuji K., Shimizu K., Horiguchi T. y Koyamada Y., 1997, "Spatial-resolution improvement in long-range coherent optical frequency domain reflectometry by frequency-sweep linearisation", *Electronics Letters* 33, 408-410 pp.
- [Tsuji 1997 B] Tsuji, K., Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997, "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave", *Journal of Lightwave Technology* 15, 1102-1109 pp.
- [Tsuji 1997 C] Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997, "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave", *Journal of Lightwave Technology* 15, 1102-1109 pp.
- [Tsuji 1998] Tsuji K. y T. Horiguchi, 1998, "Fading noise reduction for coherent optical frequency domain reflectometer with 30 cm spatial resolution and 15 dB dynamic range", *Optical Fiber Sensor* 13, 584-587 pp.
- [Udd 1991] Udd Eric, 1991, *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, editado por Eric Udd, John Wiley & Sons, New York.
- [Uttam 1985] Uttam D. y B. Culshaw, 1985, "Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using frequency modulated continuous wave ranging technique", *J. Lightwave Technol.*, 3, 971-977 pp.
- [Vivek 1995] Vivek Arya, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1995, "Microbend Losses in Singlemode Optical Fibers: Theoretical and Experimental investigation", *Journal of Lightwave Technology* 13 (10).
- [Von der Weid 1997] Von der Weid J. P., R. Passy, G. Mussi y N. Gisin, "On characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometer", *J. Lightwave Technol.* 15 (7), 1131-1141 pp.

- [Won 2001] Won P.C., L.K Seah y A.K. Asundi, 2001, "FMCW reflectometric optical fiber strain sensor", Smart Structure and Materials Proc. SPIE 4328, 54-62 pp.
- [Yariv 1984] Yariv. A. y P. Yen, 1984, Optical waves in crystals, John Wiley&Sons.
- [Tai 1987] Tai Hideo, H. Tanaka y Toshihiko Y., 1897, "Fiber optic evanescent-wave methane-gas sensor using optical absorption for the 3.392-  $\mu\text{m}$  line of a He=Ne laser", Optics Letters, 12 (6).
- [Brehnan 1988] Brehnan B. W., 1988, "Prototype polarimetric based fiber optic strain gauge", Reviews of progress in quantitative nondestructive evaluation, Plenum Press, New York, 547 pp.
- [Tan 1996] Tan Y., T. C. Tan, 1996, "Modeling and sensing characteristics of an amperometric hydrocarbon sensor", Chemical engineering science, 51(16), 4001-4011 pp.
- [Kashyap] Kashyap Raman, 1999, "Fiber Bragg gratings", Optics and Photonics, Academic Press.
- [Seitz] Seitz, W. Rudolf, 1988, "Chemical sensors based on immobilized indicators and fiber optics", CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry, 19 (2), 135-173 pp.

## Interrogación de sensores distribuidos para detección de fugas de hidrocarburo

### Introducción

Los esquemas multicanalizados para sensores de fibra óptica son una de las características prometedoras con un mayor beneficio sobre los dispositivos convencionales. La multicanalización de sensores ofrece la posibilidad del uso de una fuente y sistema de detección común y una de las ventajas de los sistemas de fibra óptica es el hecho que algunos sensores multicanalizados se pueden alcanzar en una manera relativamente directa. Los tres arreglos importantes más utilizados para la multicanalización son por división de longitud de onda (WDM *wavelength division multiplexing*), división de tiempo (TDM, *time division multiplexing*) y división de frecuencia (FDM, *frequency division multiplexing*).

Para extender el número de sensores de una red simple es posible realizar varias combinaciones de estas técnicas. Estas técnicas se aplican generalmente a una variedad de diferentes sensores de punto, más recientemente se han asociados cercanamente con rejillas de Bragg o a sistemas interferométricos donde los esquemas de multicanalización son tales que un gran número de sensores se pueden utilizar. La multicanalización es muy importante en los sistemas de sensores de fibra óptica para reducir el costo y maximizar el impacto del proceso de medición. En cuanto al procesamiento de señal, viene a ser más complejo, sin embargo, hay ventajas significativas en crear estos sistemas para una variedad de aplicaciones de sensores.

Las mediciones distribuidas sobre estructuras extendidas son utilizadas, por ejemplo, en mediciones de tensión distribuida en operaciones de aviones cerca de los límites de diseño, fugas de algún solvente, la distribución de temperatura en calentadores o presión en una nave y en transformadores de alto voltaje. Las mediciones distribuidas operan mediante reflectometría óptica. Las fibras ópticas, toman ventaja de su susceptibilidad a efectos lineales y no lineales que sostienen, ofreciendo ventajas únicas para sentido distribuido.

En este capítulo se presentan dos de las más imperantes formas de interrogar un sensor, ellas son mediante reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR, *optical time domain reflectometer*) y reflectometría óptica coherente en el dominio de la frecuencia (COFDR, *coherent optical frequency domain reflectometer*) y una nueva técnica basada en el análisis de transmisión / reflexión de la potencia (TRA, *Transmission/Reflection Analysis*). Las aportaciones obtenidas utilizando COFDR fueron publicadas<sup>3</sup>, de igual manera las aportaciones obtenidas con la nueva técnica presentada fueron igualmente publicadas<sup>4</sup>.

### Interrogación de sensores basado en rejillas de Bragg

#### Interrogación de sensores basados en una sola rejilla.

Las rejillas de Bragg grabadas en fibra óptica proporcionan la posibilidad de utilizar técnicas de división por longitud de onda, utilizando una serie de rejillas de Bragg grabadas en el núcleo, cada una de ellas con una pequeña diferencia de longitud de onda. De este modo cuando una de ellas se perturba, el espectro tendrá un corrimiento en su longitud de onda y se localiza la perturbación en la figura 44

<sup>3</sup> El material presentado en la sección 5.3 está basado en los resultados que aparecen en [López 2000, López B 2001 y López 2002C]

<sup>4</sup> El material presentado en la sección 5.4 está basado en los resultados que aparecen en [López 2002 A, López 2002 B y Spirin 1999 B]

**Deleted:** Los esquemas multicanalizados para sensores de fibra óptica son una de las características prometedoras con un mayor beneficio sobre los dispositivos convencionales. La multicanalización de sensores ofrece la posibilidad del uso de una fuente y sistema de detección común y una de las ventajas de los sistemas de fibra óptica es el hecho que algunos sensores multicanalizados se pueden alcanzar en una manera relativamente directa. Los tres arreglos importantes más utilizados para la multicanalización son por división de longitud de onda (WDM *wavelength division multiplexing*), división de tiempo (TDM, *time division multiplexing*) y división de frecuencia (FDM, *frequency division multiplexing*).¶ Para extender el número de sensores de una red simple es posible realizar varias combinaciones de estas técnicas. Estas técnica se aplican generalmente a una variedad de diferentes sensores de punto, más recientemente se han asociados cercanamente con rejillas de Bragg o a sistemas interferométricos donde los esquemas de multicanalización son tales que un gran número de sensores se pueden utilizar. La multicanalización es muy importante en los sistemas de sensores de fibra óptica para reducir el costo y maximizar el impacto del proceso de medición. En cuanto al procesamiento de señal, viene a ser más complejo, sin embargo, hay ventajas significativas en crear estos sistemas para una variedad de aplicaciones de sensores.¶ Las mediciones distribuidas sobre estructuras extendidas son utilizadas, por ejemplo, en mediciones de tensión distribuida en operaciones de aviones cerca de los límites de diseño, fugas de algún solvente, la distribución de temperatura en calentadores o presión en una nave y en transformadores de alto voltaje. Las mediciones distribuidas operan mediante reflectometría óptica. Las fibras ópticas, toman ventaja de su susceptibilidad a efectos lineales y no lineales que sostienen, ofreciendo ventajas únicas para sentido distribuido.¶ En este capítulo se presenta ... [1]

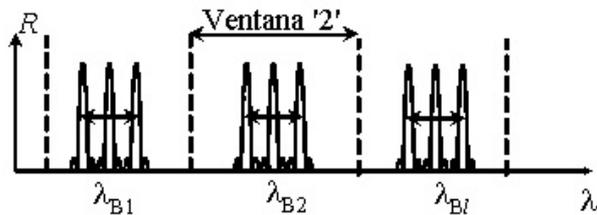


Figura 44. Interrogación de sensores basados en una rejilla de Bragg.

### Interrogación de sensores basados en doble rejilla de Bragg

Hay que remarcar que la técnica de doble rejilla de Bragg permite la multicanalización de sensores de punto basada en la combinación de los principios de multicanalización por división de longitud de onda (WDM) y la multicanalización por división de frecuencia (FDM) [Shlyagin *et al.*, 1999]. En la figura 45 se muestra el espectro de reflexión compuesto de un sensor DDBG que consiste de 4 pares de rejillas de Bragg con la misma longitud de onda de resonancia pero con diferente distancia entre las rejillas. Para separar las señales que vienen de los diferentes sensores en un solo canal de longitud de onda, se procesa el espectro compuesto correspondiente utilizando el algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT). El resultado de esta operación se muestra en la figura 45 a), en la figura se pueden observar claramente cuatro picos que indican la presencia de señales desde el quinto sensor local. Las señales se pueden de-multicanalizar utilizando filtros digitales, cuya frecuencia central se sintoniza para acoplar la frecuencia de modulación de cada elemento sensor. La señal separada se muestra en la figura 45 b)

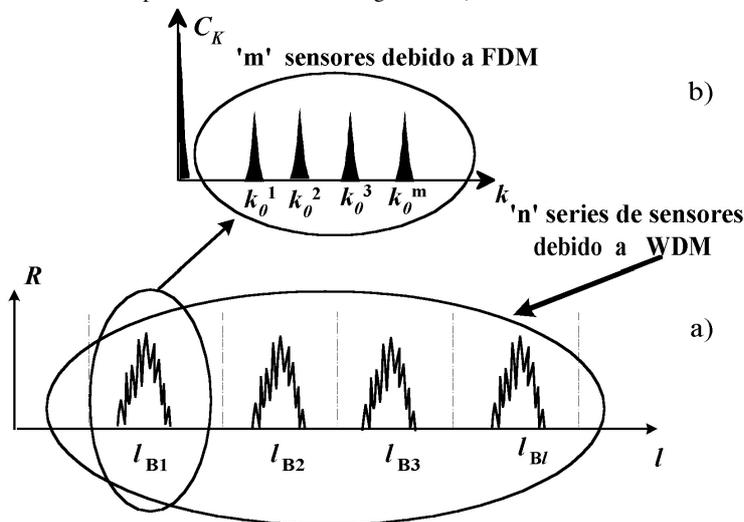


Figura 45. Interrogación de sensores basados en doble rejilla de Bragg.

### Localización de perturbaciones usando (OTDR)

Los sensores distribuidos operan mediante reflectometría óptica. En el dominio tiempo (OTDR) se utiliza para la localización local de pérdidas en la fibra, esta técnica fue explotada primeramente para localizar fallas. Conociendo el tiempo de propagación de una pulso en una longitud de onda particular a lo largo de la fibra con un índice de refracción específico da la posición de la interacción, de esta manera se localiza y se sensa la medición y perturbación en la fibra. Este sistema utiliza el concepto radar óptico para examinar la continuidad y atenuación de fibras ópticas desde la medición de reflexión contra características de tiempo cuando un pulso corto de luz se introduce en la fibra.

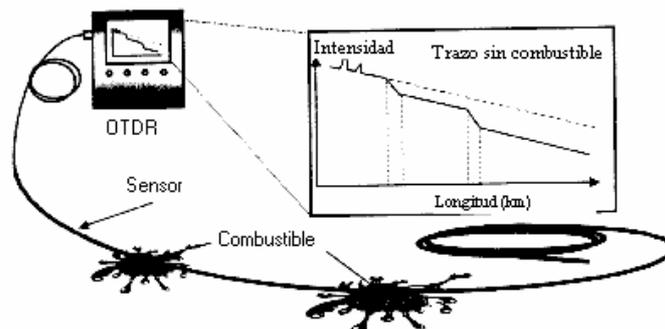
El OTDR ha llegado ser el instrumento primario para caracterización utilizando un solo extremo de la fibra óptica basado en mediciones de dispersión reflejada [Derickson, 1998].

La técnica de retrodispersión OTDR indirectamente permite la determinación de la atenuación de la fibra. Esta es una técnica capaz de hacer mediciones en el lugar y requiere acceso en solamente un extremo de la fibra. Además, proporciona información extra sobre la fibra bajo prueba, como la dependencia de la atenuación de la fibra con respecto a la longitud y pérdidas por inserción producidos por defectos, empalmes, curvaturas o conectores. La localización y tipo de fallas ocurridas durante la fabricación, la homogeneidad de las características de la fibra, longitud de la fibra se pueden probar.

### Sensor de fibra óptica distribuido para detección de hidrocarburo con OTDR

La experiencia muestra que las propiedades como pérdidas en la fibra y alteran a través de la influencia del medio ambiente como humedad, temperatura o tensión física. Las pérdidas en la fibra óptica son de gran importancia para instalar fibras ligadas ya que la atenuación de la fibra determina directamente la pérdida total y como la calidad de un sistema de transmisión.

La técnica OTDR se utiliza ampliamente, por ejemplo, MacLean en [MacLean *et al.*, 2000A] presenta un sensor de fibra óptica que utiliza un polímero expandible al hacer contacto con el hidrocarburo, esta expansión se transduce en perturbaciones para la fibra, como se muestra en la figura 46. Para la interrogación del sensor se utiliza un instrumento OTDR que proporciona la posibilidad de conocer el lugar donde ocurre la perturbación a lo largo de la longitud de la fibra.



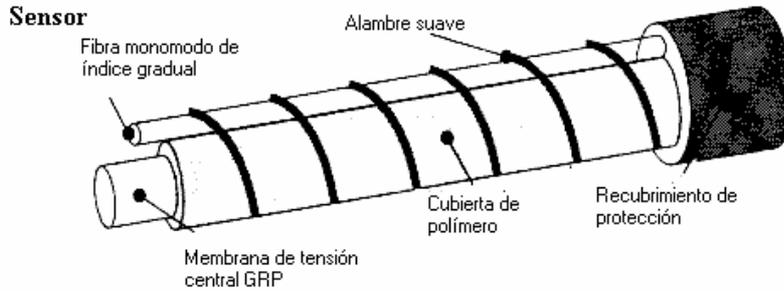


Figura 46. Esquemático de operación OTDR y construcción del sensor.

La localización precisa de la distribución (utilizando una fibra óptica de 2780 m) se encontró con un OTDR. En la figura 47 y figura 48, se muestran el trazo para 1 dB de pérdidas después de 5 y 0.10 minutos de promediación. En la figura 49 se presenta el trazo de la fibra sin ninguna perturbación.

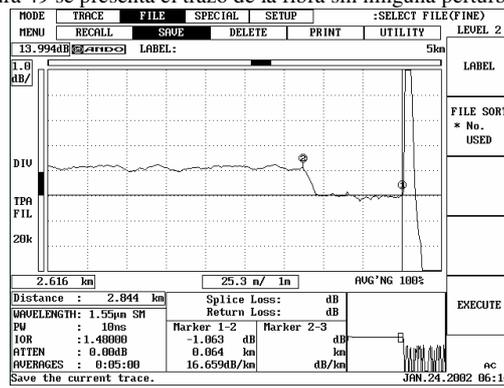


Figura 47. Trazo de la perturbación utilizando OTDR, con promediación de 5 min.

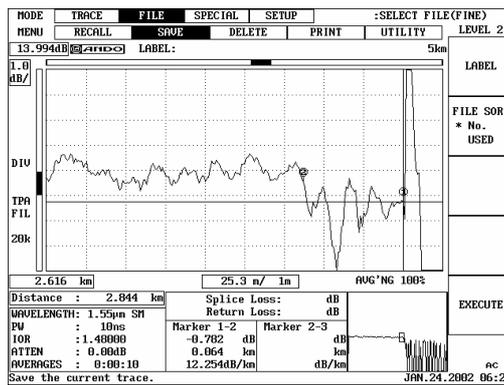


Figura 48. Trazo de la perturbación utilizando OTDR, con promediación de 10 seg.

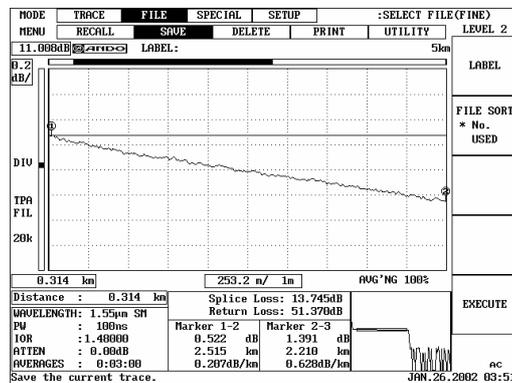


Figura 49. Trazo de la fibra sin perturbación utilizando OTDR.

## Localización de perturbaciones mediante COFDR

La técnica COFDR actual, utiliza un campo óptico como una señal de prueba modulada en tiempo. En COFDR, la amplitud y la fase óptica de la señal reflejada son medidas como una función de la frecuencia del láser.

Formatted: Bullets and Numbering

### *Sensor para detección de fugas de hidrocarburo basados en COFDR.*

En esta sección se presenta un sensor de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo basado en la técnica C-OFDR. Para inducir las pérdidas por curvatura se emplea un polímero sensible, que es reversible a la expansión bajo influencia de hidrocarburo. El sensor para detección de fugas de hidrocarburo propuesto comprende de elementos sensibles distribuidos, a los que se les inducen pérdidas adicionales en presencia de hidrocarburo y de rejillas de Bragg grabadas en el núcleo de la fibra entre los elementos sensibles. Las rejillas de Bragg en la fibra incrementan significativamente el nivel de la señal, así permite eliminar cualquier procedimiento de promediación. Por otra parte, los reflectores concentrados se colocan en posiciones fijas que permiten localizar la región de perturbación.

En el presente trabajo, para la detección de hidrocarburo, se utilizó el corrimiento del borde de la trayectoria de la frecuencia de batimiento. Típicamente el espectro de batimiento para 3 rejillas de Bragg separadas a la misma distancia a lo largo de la fibra para una frecuencia de modulación de 50 Hz se presenta en la figura 50. Bajo la influencia de hidrocarburo entre la primera y segunda rejilla el valor de la señal de batimiento para las dos últimas rejillas decrece significativamente y el borde de la trayectoria del corrimiento del espectro de batimiento a la izquierda debido a pérdidas adicionales inducidas en la sección de las rejillas. El valor del corrimiento de la frecuencia de corte permiten localizar la perturbación con precisión igual a la distancia entre las rejillas adyacentes. El modo de operación del sensor propuesto puede ser caracterizado como detección distribuida con localización de secciones (*Distributed Detection with Section Localization, DDSL*) de la perturbación. El método propuesto, basado en la medición del corrimiento de borde de la trayectoria del espectro de batimiento se puede utilizar aún si los reflectores se colocan tan cercanamente, que los picos

correspondientes no puedan ser resueltos como picos individuales. El banco experimental para prueba del sensor DDSL se muestra en la figura 51. La luz emitida de un láser sintonizable New Focus 6262 a una longitud de onda 1534.5 nm con un ancho de línea  $\Delta\nu$  menor que 300 kHz, el haz modulado fue introducido a un aislador (para prevenir las reflexiones en el láser) con una potencia alrededor de 500µW, de ahí se

introdujo a un acoplador 50/50, en uno de los brazos se conectó la fibra bajo prueba. La luz reflejada de la fibra bajo prueba pasó por el acoplador 50/50 y se mezcló con el haz de referencia por un acoplador 10/90. Para medir la señal se conectó a un fotodetector New focus 1811. La componente de batimiento de la fotocorriente se analizó con un analizador de espectros eléctrico con una resolución de 100kHz. La frecuencia óptica del láser fue barrida por variaciones de la longitud de la cavidad del láser. Para realizarlo, se utilizó una onda triangular de voltaje que se aplicó al transductor piezoeléctrico el cual mantiene un espejo del láser. Como resultado, la longitud de onda del láser fue barrida linealmente dentro de un intervalo de 10 GHz con una frecuencia de modulación hasta 200 Hz y con una pendiente de barrido de frecuencia óptica de 4 THz/s. En la figura 52 se muestra el diseño de sensor distribuido para detección de hidrocarburos que fue utilizado en nuestro experimento.

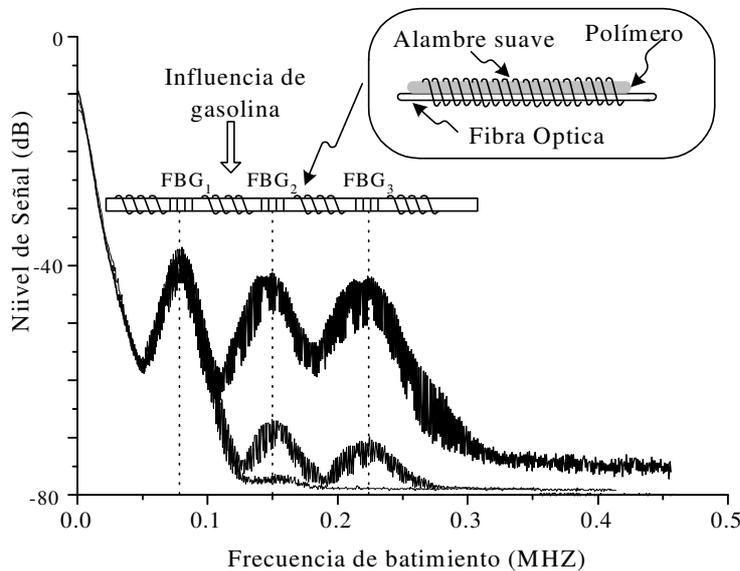


Figura 50. Espectro de batimiento a) sin influencia de gasolina, b) 30 minutos bajo la influencia de gasolina entre la primera y segunda rejilla y c) cuarenta minutos bajo influencia de gasolina.

El sensor está compuesto por tres elementos sensibles distribuidos con longitud idéntica igual a 12 m y tres rejillas de Bragg colocadas al final de cada elemento sensible, las cuales nos sirven como reflectores. Las rejillas de Bragg se grabaron en fibras monomodo utilizando una técnica de máscara de fase y la cuarta armónica de un láser Q-switched Nd:YAG en longitud de onda de 266 nm. Cada rejilla tiene una longitud de aproximadamente 1 mm, una reflectividad alrededor de (2 o 3) % y espectro de reflexión con un ancho de banda de cerca de 0.3nm. Para estudiar la respuesta se colocaron 20-cm de longitud del segundo elemento sensible en un recipiente con gasolina, el polímero se expande induciendo pérdidas por curvatura, produciendo un decremento en las señales de batimiento de la segunda y tercera rejilla. Después de 40 minutos la gasolina se quitó del recipiente y el sensor se secó. La figura 53 muestra la dependencia de la señal de batimiento para las tres rejillas contra el tiempo durante el ciclo húmedo-seco. Todas las señales regresan a su posición inicial aproximadamente en 200 minutos (figura 2).

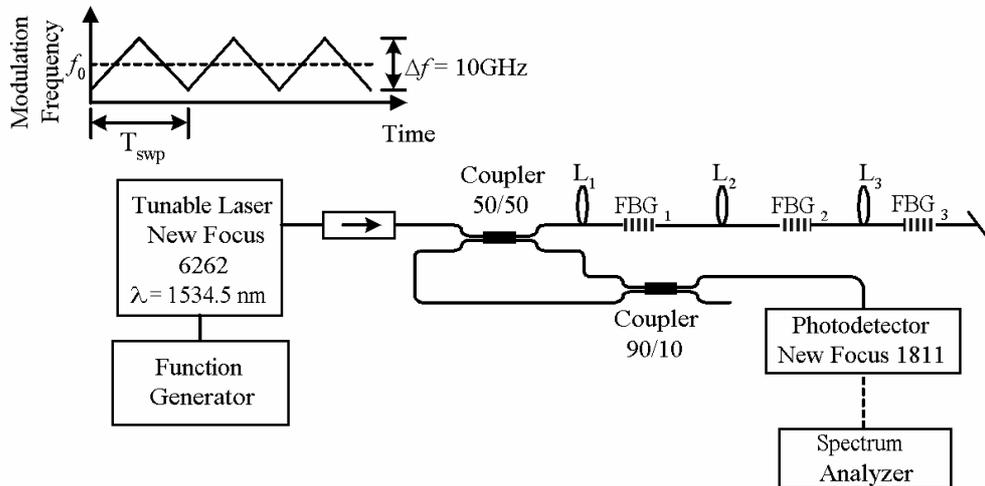


Figura 51. Banco experimental para probar un sensor distribuido para detección de hidrocarburo.

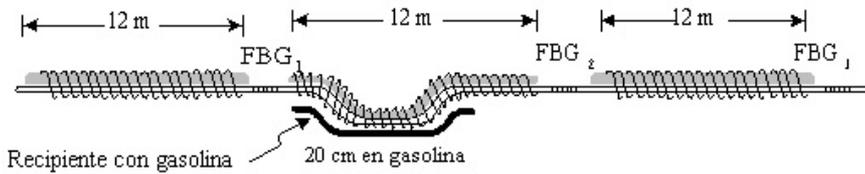


Figura 52. Diagrama esquemático del sensor de fibra con elementos sensitivos.

Bajo la influencia de gasolina una pequeña variación de la señal de batimiento también tiene lugar desde la primera rejilla. Esta variación se atribuye al cambio no controlado del estado de polarización (*State Of Polarization, SOP*) [Mussi y Stamp, 1996]-[Von der Weid *et al.*, 1997]. La linealidad de la dependencia de la señal de batimiento con la frecuencia de modulación se muestra en la figura 55 su comportamiento es casi lineal para las tres rejillas desde 30 Hz hasta 200Hz.

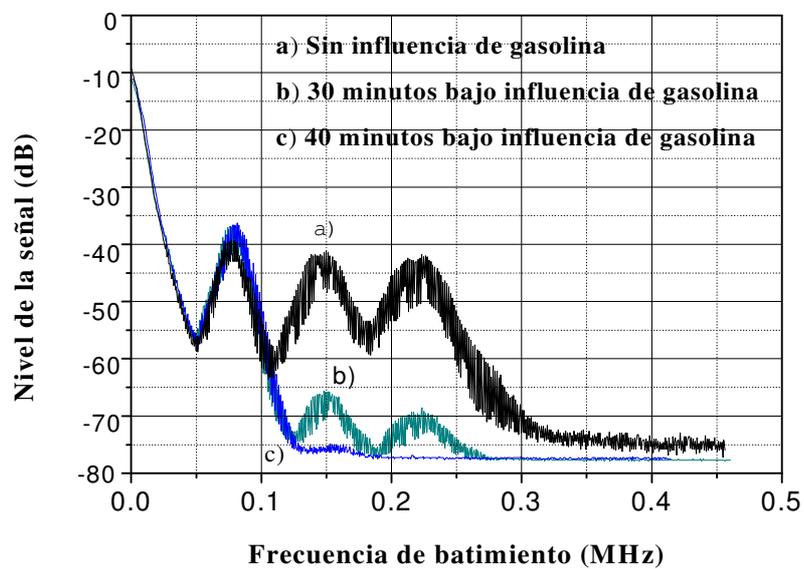


Figura 53. Evolución del espectro de batimiento bajo influencia de gasolina entre la 1<sup>ra</sup> y 2<sup>da</sup> rejilla.

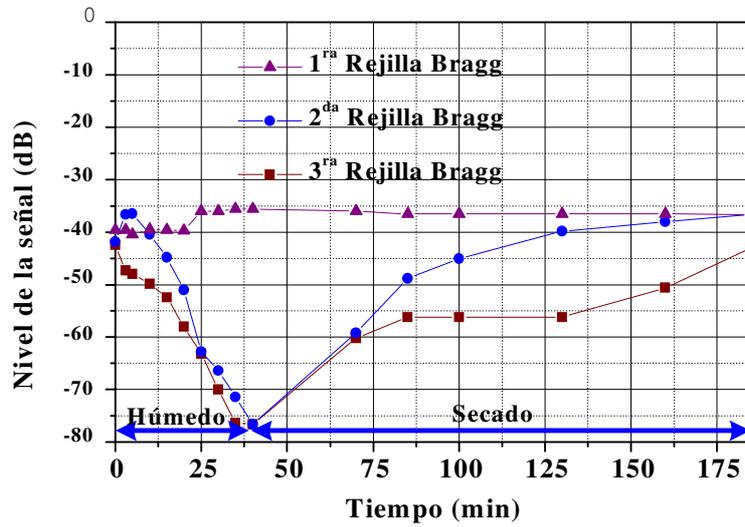


Figura 54. Dependencia de la señal de batimiento de las rejillas de Bragg en el tiempo. La presencia de gasolina puede detectarse cuando el nivel de la señal de batimiento de cualquier rejilla decrece para un valor, el cual excede el nivel de variaciones aleatorias de la señal. Para el experimento, esta variación no excede 5 dB durante el ciclo húmedo-seco figura 2). De ahí, se puede detectar claramente presencia de gasolina en 8 minutos, ya que después de este tiempo la señal de batimiento de la segunda y tercera rejilla decrecen más de 5 dB. El tiempo de respuesta del sensor depende de la longitud del elemento sensible bajo la influencia de gasolina, si la longitud es más grande, la respuesta es más rápida (figura 56).

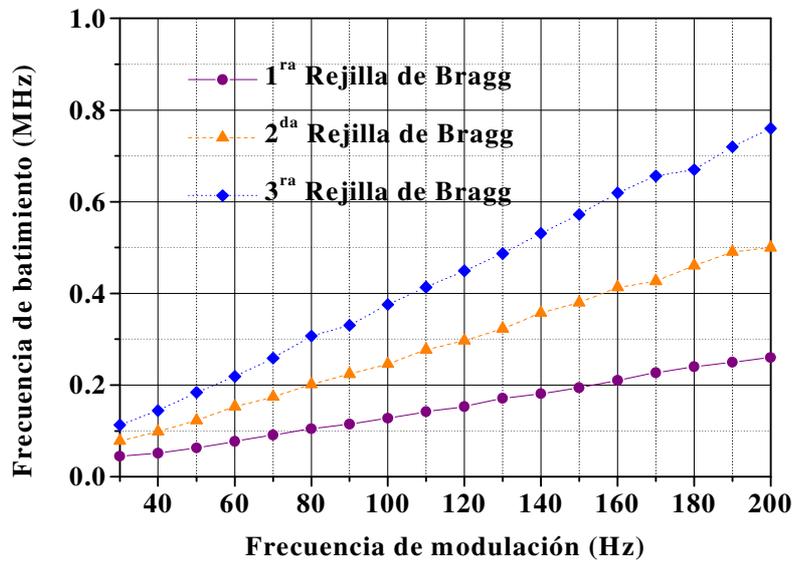


Figura 55. Dependencia de la frecuencia de batimiento con respecto a la frecuencia de modulación. a) 1<sup>era</sup> rejilla, b) 2<sup>da</sup> rejilla y c) 3<sup>era</sup> rejilla.

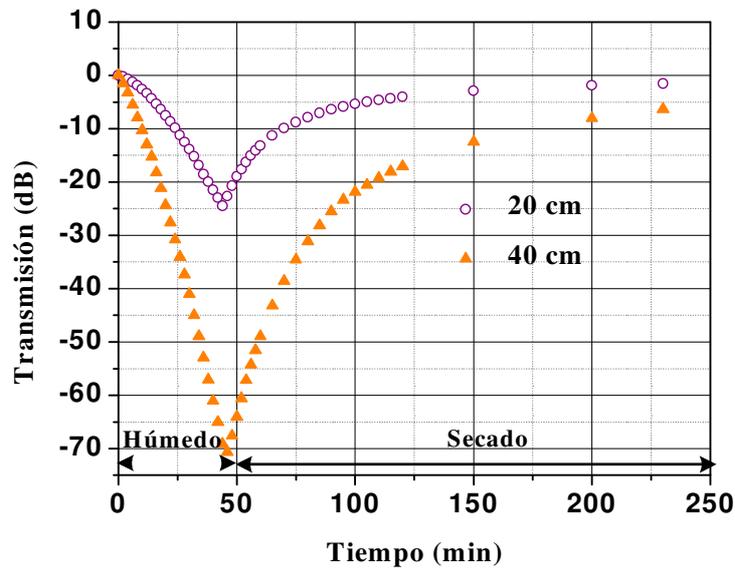


Figura 56. Evolución de la transmisión de la fibra bajo prueba durante el ciclo húmedo-seco.

EL espectro de batimiento demuestra cualitativamente el mismo comportamiento cuando la influencia de gasolina es en los diferentes elementos sensitivos (figura 57). La figura 58 a) muestra la dependencia del corrimiento del borde de la trayectoria contra la distancia entre las rejillas para el barrido de modulación en frecuencia de 50 Hz. Todos los datos son grabados después de 40 minutos de influencia de gasolina para distancias diferentes entre las rejillas. El corrimiento del borde depende linealmente de las distancias entre las rejillas. La figura 58 b) también demuestra el corrimiento del borde de la trayectoria del espectro de batimiento después de 40 minutos de influencia de gasolina entre dos rejillas separadas de 1.5 m para un barrido de modulación de frecuencia de 50 Hz. También se puede ver, mediante la medición del borde de la trayectoria del espectro de batimiento se puede localizar la perturbación aún si no se puede resolver las señales de dos rejillas adyacentes. Como regla, se midió el corrimiento del corrimiento en el nivel medio del valor pico, pero el valor de este corrimiento cercano a la misma (con una precisión de alrededor del 10%) dentro de intervalo (0.2 a 0.7) del valor pico de la señal figura 58 b).

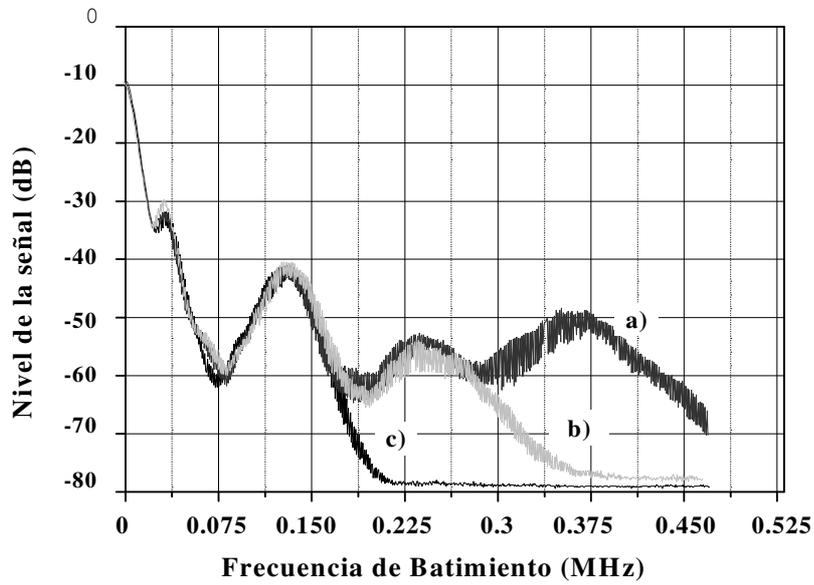
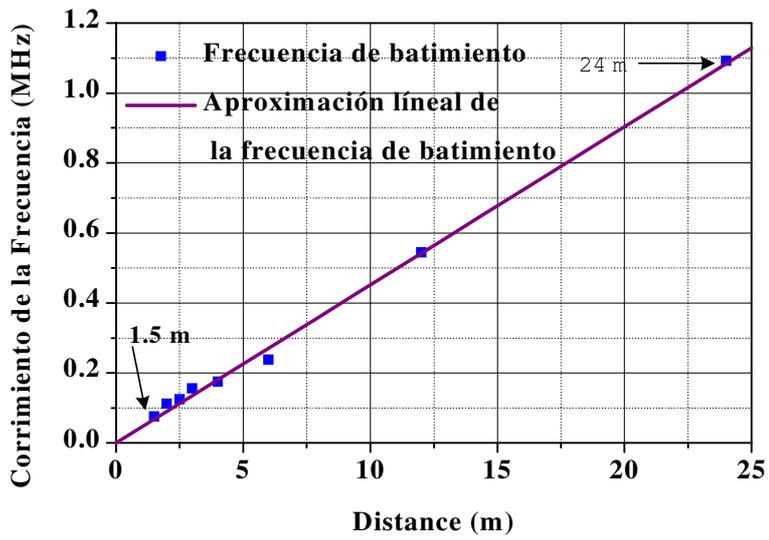
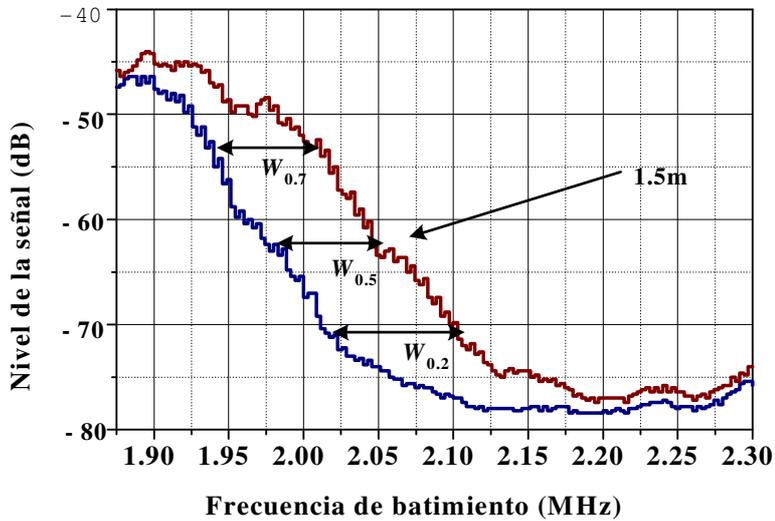


Figura 57. Espectro de batimiento después de 40 minutos en influencia de gasolina 20 cm de longitud. a) Antes de la 1<sup>ra</sup> rejilla, b) entre la 1<sup>ra</sup> y 2<sup>da</sup> rejillas y c) después de la 2<sup>da</sup> rejilla.

Corrimiento de la trayectoria del borde del espectro de batimiento después de 40 minutos entre dos rejillas con una distancia de 1.5 m.



a)



b)

Figura 58. a) Corrimiento de la trayectoria del borde del espectro contra la distancia entre las rejillas y b) espectro después de 40 minutos en influencia de gasolina

### ***Limitaciones teóricas de máxima distancia***

La máxima longitud en los sensores basados en el convencional COFDR es limitada por la longitud de coherencia del láser utilizado [Tsuji *et al.*, 1995]-[Tsuji *et al.*, 1997C].

$$2z_0 < L_{coh} \quad (50)$$

La relación entre  $L_{coh}$  y ancho de línea del láser  $\Delta\nu$  está dada por

$$\Delta\nu = \frac{v_g}{\pi L_{coh}} \quad (51)$$

donde  $v_g$  es la velocidad de grupo.

Utilizando las ecuaciones (50) y (51) se obtiene que la longitud de coherencia del láser sintonizable New Focus 6262 es igual a 500m. Que da la máxima longitud del sensor igual a 250 m.

El decaimiento y ensanchamiento de los picos detectables se deben al barrido no lineal [Von der Weid *et al.*, 1997], esto reduce el intervalo máximo detectable del sensor a 150–180m. Utilizando COFDR con el llamado fase-decorrelacionada de la luz reflejada y de referencia [Tsuji *et al.*, 1997C] la limitación impuesta por la longitud de coherencia de la fuente se puede superar.

### ***Limitaciones de resolución espacial***

La reflexión en la distancia  $z_0$  se relaciona con la frecuencia de batimiento  $f_b$  utilizando una velocidad de barrido de frecuencia  $\gamma$  dado de la siguiente manera:

$$z_0 = \frac{v_g}{2\gamma} f_b \quad (52)$$

donde  $v_g$  es la velocidad de grupo de la luz y el promedio del barrido en frecuencia del láser  $\gamma$  se define usando un tiempo de barrido  $T_{swp}$  y un intervalo de barrido de frecuencia  $\Delta f$  como sigue:

$$\gamma = \frac{\Delta f}{T_{swp}} \quad (53)$$

La resolución espacial depende de la frecuencia de batimiento  $f_b$  y de  $\gamma$ .

Para una longitud de coherencia mayor que  $2z_0$ , las fases de la señal y la de referencia correlacionan substancialmente una con otra. Esto sigue que el espectro de batimiento tiene una línea fina en la frecuencia de batimiento y la resolución espacial  $\Delta z_B$  se determina por el ancho de banda de la resolución en frecuencia  $\Delta B$  del analizador de espectros, de la siguiente manera:

$$\Delta z_B = \frac{v_g}{2\gamma} \Delta B \quad (54)$$

donde el barrido de frecuencia se asume lineal con respecto del tiempo. La resolución espacial  $\Delta z_B$  se mejora reduciendo la resolución del ancho de banda  $\Delta B$ , el cual reduce el ruido en el receptor.

En la práctica la señal de batimiento se genera solamente en un tiempo de barrido finito  $T_{\text{swp}}$ , de lo cual se deriva otra limitación en la resolución espacial  $\Delta z_{\text{min}}$ , dado como sigue:

$$\Delta z_{\text{min}} = \frac{v_g}{2\gamma} \frac{1}{T_{\text{swp}}} = \frac{v_g}{2\Delta f} \quad (55)$$

Para una fuente óptica ideal con ancho de línea cero el límite de la resolución espacial está dado por la ecuación (55). Un barrido completo cuyos límites son 10 GHz la resolución es aproximadamente de 1 cm. Sin embargo, en sistemas reales COFDR el límite de la resolución espacial es restringida por la fuente de luz y el ancho de banda del receptor [Von der Weid *et al.*, 1997].

Además, el ensanchamiento del pico de reflexión en el experimento fue causado por la modulación de intensidad de la luz reflejada del espectro selectivo de la rejilla de Bragg durante el barrido de frecuencia del láser y la inestabilidad del estado de polarización

Un serio problema con la implementación práctica de los sensores interferométricos ha sido el desvanecimiento de polarización inducida (PIF) en interferómetros de fibras de baja birrefringencia. El problema comienza con la división el haz en dos trayectorias separadas, la evolución del estado de polarización (*State Of Polarization*, SOP) de la luz guiada en estas fibras varía independientemente en una manera aleatoria e impredecible. Consecuentemente, el SOP de la recombinación de componentes ópticos desde los dos brazos del acoplador varía independientemente y esto deja una reducción en la eficiencia de la mezcla óptica interferométrica y una pérdida (desvanecimiento) de la señal de interferencia [Mussi y Stamp, 1996].

En este esquema de detección coherente, la sensibilidad de esta técnica de medición se mejora ampliamente comparada con las técnicas en el dominio del tiempo, pero se ve afectada por el estado de polarización de la luz reflejada de la señal de la fibra bajo prueba. Además, si el SOP de la haz de referencia y el haz de la señal reflejada de prueba son ortogonales en el detector, la reflexión desaparecerá completamente. Por este motivo, es necesario usar controladores de polarización para eliminar las variaciones del estado de polarización de la señal de referencia y la de prueba. OFDR se basa en el barrido de frecuencia óptica, y muchas espurias son introducidas en el espectro de batimiento cuando las señales son elevadas al cuadrado y sumadas cada vez mas que una reflexión se presenta en el brazo de prueba.

Las pequeñas variaciones en la señal de batimiento se atribuyen a cambios no controlados del estado de polarización de la luz reflejada [Mussi y Stamp, 1996], [Von der Weid *et al.*, 1997]. La inestabilidad del SOP se puede eliminar utilizando receptores de diversas polarizaciones o un procedimiento de promediación de polarización [Von der Weid *et al.*, 1997]

La no-linealidad en barrido de frecuencia impone un deterioro adicional de la resolución, ya que la frecuencia de batimiento corresponde a un determinado pico de reflexión que varía durante la adquisición de datos. El barrido no lineal es el factor más importante de limitación en la resolución [Von der Weid *et al.*, 1997]

En este trabajo se define la presencia de hidrocarburo por el corrimiento del borde del espectro de batimiento. De ahí la variación aleatoria del borde del camino da un límite real de la resolución. Mediciones experimentales muestran que la máxima variación aleatoria del corrimiento del borde del camino corresponde a la máxima variación de la distancia igual a  $\pm 0.3$  m del extremo cerca de la fuente y de  $\pm 0.5$  m para la rejilla localizada a 100 m desde la fuente.

### ***Análisis de la relación señal a ruido***

Se realizó un análisis de señal a ruido para sistemas que contienen reflectores concentrado en múltiples puntos. Los reflectores incrementan significativamente el valor de la señal, pero por otro lado, el ruido originado producido por reflexiones múltiples de los reflectores también pueden restringir de manera importante el diseño del sensado distribuido con localización discreta (SDL). Se analiza la influencia de reflexiones múltiples en la relación señal a ruido (SNR) de los sensores DDSL.

Consideraremos el sensor DDSL con longitud  $L$ , que consiste de una serie de  $n$  independientes reflectores concentrados con la misma reflectividad  $r$ , separados por distancias iguales. Se supondrá que la señal es producida debido a la reflexión desde el último reflector concentrado  $n^{\text{ésimo}}$  colocado al final de la fibra. En este caso la señal se escribe como

$$S_0 = P_0 r (1-r)^{2(n-1)} e^{-2\alpha L} \quad (56)$$

donde  $P_0$  es la potencia introducida,  $\alpha$  es el coeficiente de pérdidas en la fibra y  $L$  es la longitud de la fibra. Considerando que el ruido es producido solamente por múltiples reflexiones desde los espejos. En el análisis solamente se debe tomar en cuenta aquellas reflexiones múltiples que tengan una longitud de trayectoria total de  $2L$ , ya que solamente estas componentes producen ruido en la misma frecuencia de batimiento de la señal. Sin pérdidas de generalidad, se puede suponer que todas las distancias entre los espejos es 1. Se estima el número de diferentes trayectorias para las componentes de ruido con la longitud total igual a la trayectoria de la señal  $2(n-1)$ . El número de reflexiones debe ser impar, ya que la luz de ruido regresa así como la señal. El máximo número de reflexiones con trayectoria total  $2(n-1)$  es igual a  $(2n-3)$ . Esto toma lugar cuando la luz consecuentemente se refleja  $(2n-3)$  veces entre el segundo y primer espejo solamente. Primeramente, se considera el ruido, el cual es producido por haces con 3 reflexiones. El número de diferentes trayectorias en este caso se calculó utilizando la figura 59 a). Esta figura muestra todas las posibles trayectorias con 3 reflexiones cuando la primera reflexión ocurre en  $(n-1)^{\text{ésimo}}$  espejo. Como se puede ver el número total de tales combinaciones es  $(n-2)$ . Si la primera reflexión es desde el espejo  $(n-2)^{\text{ésimo}}$  hay solamente  $(n-3)$  diferentes posibilidades para colectar una longitud de trayectoria  $2(n-1)$  después de tres reflexiones. Además, si la primera reflexión ocurre en el segundo espejo, hay solamente una posibilidad para colectar una longitud de  $2(n-1)$ . Esta trayectoria está trazada con línea punteada figura 59 b). Así, el número total de diferentes caminos con 3 reflexiones  $A_3$  está dado por la suma de la serie aritmética

$$A_3 = (n-2) + (n-3) + \dots + 1 = \frac{(n-1)(n-2)}{2} \quad (57)$$

Para calcular el número total de diferentes trayectorias para el caso general con  $M$  reflexiones, donde  $M > 3$ , es complicado, sin embargo, se puede encontrar el límite superior de este número total. Además, la reflexión 5 se puede considerar como una consecuencia de 2 y 3 reflexiones. El número de todas las posibles trayectorias con 2 reflexiones, sin ninguna restricción para reunir una longitud de trayectoria total son igual al número de combinaciones de 2 objetos desde un grupo de  $n$  objetos  ${}_n C_2$ . Este valor da un máximo absoluto de posibles trayectorias con 2 reflexiones. El número de diferentes trayectorias con 3 reflexiones es menor que  $(n-1)(n-2)/2$ , ya que aún se colecta la misma longitud de trayectoria durante 2 reflexiones iniciales y por eso, se debe reunir la longitud de trayectoria menor que  $2(n-1)$  durante las últimas 3 reflexiones. De ahí, el número de diferentes caminos de ruido con 5 reflexiones esta dado por

$$A_5 < {}_n C_2 \frac{(n-1)(n-2)}{2} \quad (58)$$

y para  $M$  reflexiones

$$A_M < {}_n C_{M-3} \frac{(n-1)(n-2)}{2} = A_M^{\max} \quad (59)$$

donde  ${}_n C_{M-3}$  es el número de combinaciones de  $M-3$  objetos desde un grupo de  $n$  objetos. La potencia de la componente de ruido sufre  $M$  reflexiones y tiene la misma trayectoria que la señal, se puede escribir en la siguiente forma

$$N_M = P_0 r^M (1-r)^{(2n-M-1)} A_M e^{-2\alpha L} \quad (60)$$

donde  $A_M$  es el número de diferentes caminos cuya longitud de trayectoria total.

Si se consideran componentes de 3 reflexiones solamente en el modo de ruido y se desprecian las otras componentes de ruido caracterizado por mas de 3 reflexiones, se puede obtener el límite superior para SNR como sigue

$$SNR_{up} = \frac{mS}{mN_3 + P_{NPh}} = \frac{mP_0 r (1-r)^{2(n-1)} e^{-2\alpha L}}{0.5mP_0 e^{-2\alpha L} r^3 (1-r)^{2n-4} (n-1)(n-2) + P_{NPh}} \quad (61)$$

donde  $P_{NPh} = NEP \sqrt{B}$ ,  $NEP = 2.5 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  para el fotodetector New Focus 1811,  $B = 100 \text{ kHz}$ ,  $m$  es el coeficiente de ramificación igual a 0.45 para los acopladores utilizados en el experimento,  $P_0 = 2.5 \text{ }\mu\text{W}$ ,  $\alpha = 0.19 \text{ dB/km}$  y  $L = 36$ .

Para calcular la potencia total de ruido, se necesita sumar las componentes de ruido desde todas las posibles reflexiones:  $M = 2k + 1$ , donde  $k = 1 \dots n-2$ . Tomando en cuenta el máximo número de combinaciones con  $M$  reflexiones  $A_M^{max}$ , se puede encontrar el límite inferior para SNR:

$$SNR_{low} = \frac{P_0 r (1-r)^{2(n-1)}}{P_0 \sum_{k=1}^{n-2} r^{2k+1} (1-r)^{2(n-k-1)} n^{2(k-1)} \frac{(n-1)(n-2)}{2} + P_{NPh}} \quad (62)$$

La figura 60 a) presenta el resultado numérico de los límites superior e inferior de SNR contra el coeficiente de reflexión  $r$  para 4 elementos sensitivos separados por un reflector concentrado. Los límites superior e inferior, prácticamente coinciden para la reflectividad  $r$  hasta 0.03. Se puede ver desde los datos presentados en la figura 60 a) para los reflectores concentrados con una reflectividad de alrededor de (2-3)%, la cual fue utilizada en el experimento, se puede despreciar completamente el ruido que se produce debido a múltiples reflexiones. Sin embargo, incrementando el número de elementos sensitivos, la reflexión múltiple puede reducir significativamente la SNR.

La figura 60 b) muestra el cálculo de los límites superior e inferior de SNR contra el coeficiente de reflexión  $r$  para 30 reflectores concentrados. La SNR real descansa entre estos límites. Por ejemplo, para obtener la SNR mejor que 3, la reflectividad de los reflectores concentrados deben ser menor que 2.5 %. Remarcando que el mismo análisis SNR se puede aplicar a sistemas con reflectores concentrados basados en OTDR, ya que solamente las componentes de ruido de multireflexiones con trayectoria total igual a la trayectoria de la señal llegan al detector simultáneamente.

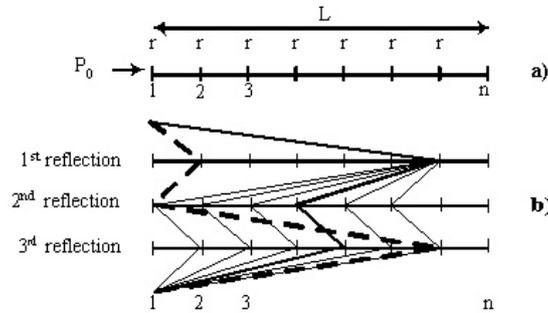


Figura 59. Diferentes caminos para tres reflexiones.

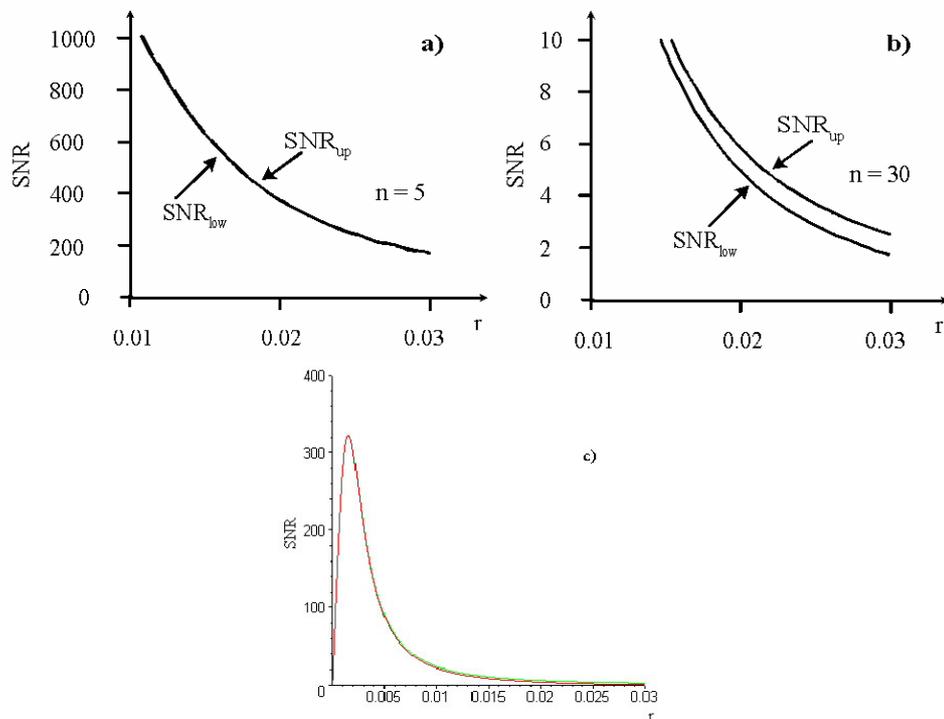


Figura 60. Relación S/N para los límites superior a), inferior inferior b) y c) tomando en cuenta el ruido del fotodetector  $P_{NPh}$ .

### Análisis de transmisión y reflexión (ATR)

Para algunas aplicaciones, es importante detectar y localizar una condición de alarma peligrosa la cual ocurre típicamente como un evento simple no frecuente, tal como fuga en una pipa, fuego o explosión. Para estas aplicaciones, se propone un nuevo sensor de fibra óptica simple y económico que utiliza una fuente de luz no modulada, detectores de potencia y una fibra de sensado [Spirin *et al.*, 2002 A, Spirin *et al.*, 2002 B]. La técnica propuesta utiliza un novedoso principio de localización de perturbación inducida por pérdidas, basada en la medición de potencias transmitida y reflejada o de retrodispersión de Rayleigh, resultando un nuevo sensor de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo y localización.

La estructura del sensor incluye un polímero sensible, que se expande reversiblemente en presencia de hidrocarburo e induce pérdidas por curvaturas en la fibra. La localización de la región de pérdidas se determina desde una relación única entre las potencias normalizadas de transmisión y retrodispersión de Rayleigh para diferentes posiciones de la perturbación a lo largo de la fibra de prueba.

### Principio de localización de la perturbación mediante ATR

El principio de operación se basa en la medición de las potencias transmitida y reflejada en la fibra bajo prueba. Considerando una fibra con retrodispersión de Rayleigh, una longitud determinada y pérdidas adicionales inducidas. Si las pérdidas inducidas ocurren en el extremo lejano de la fibra sensada (ver figura 61), existe un decremento proporcional de la potencia transmitida. Sin embargo, la potencia de retrodispersión de Rayleigh no cambia debido a que toda la longitud de la fibra participa en la retrodispersión y la distribución de la potencia introducida es la misma como para una fibra sin perturbación. Sin embargo, si las pérdidas en la fibra sensada están cerca al extremo inicial (figura 62), la potencia transmitida decrece que es acompañada de un decremento de la potencia de retrodispersión de Rayleigh. Esto sucede porque las pérdidas inducida cerca del extremo inicial decrece la potencia propagándose hacia delante y de ahí, decrece la potencia de retrodispersión de Rayleigh. Además, la potencia retrodispersada decrece cuando esta pasa de regreso a través de la región de pérdidas. Cuando las pérdidas en la fibra sensada ocurren a la mitad (figura 63), la primera mitad de la fibra, que esta cerca al extremo inicial aun dispersa la luz en la misma manera como una fibra sin perturbación, pero la potencia dispersada en la segunda mitad es menor debido a las pérdidas inducidas. Así, en general, para perturbaciones por pérdidas inducidas idénticas el decremento de la potencia de retrodispersión de Rayleigh depende de la localización de la región con exceso de pérdidas.

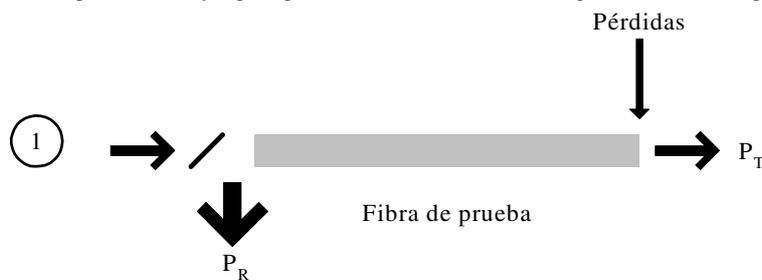


Figura 61. Comportamiento de las potencias transmitida y reflejada con pérdidas en el extremo final de la fibra.

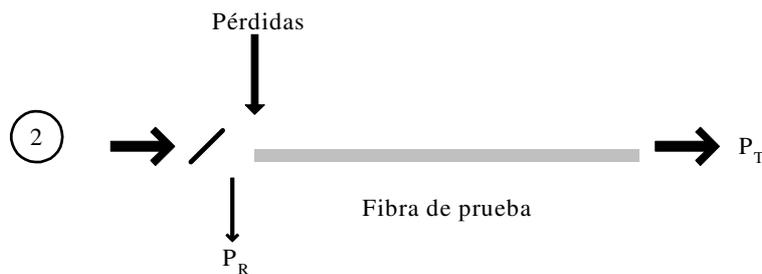


Figura 62. Comportamiento de las potencias transmitida y reflejada con pérdida al inicio de la fibra.

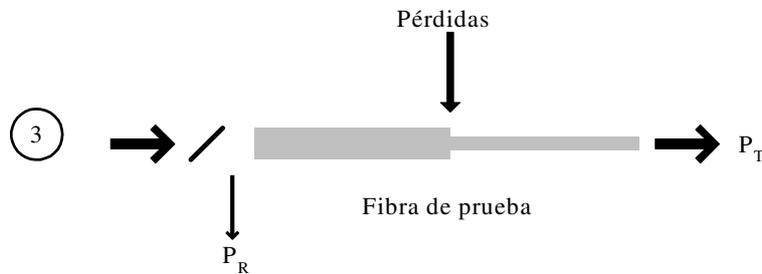


Figura 63. Comportamiento de las potencias transmitida y reflejada con pérdida a la mitad de la fibra.

En la figura 64 se muestra el comportamiento de la relación de potencias transmitida y reflejada cuando la perturbación va desde cero pérdidas hasta una pérdida total, las curvas muestran cuando las pérdidas son inducidas en la fibra al final, al inicio y a la mitad, 1, 2 y 3 respectivamente. Los puntos que caen sobre el eje horizontal ( $P_R$ ) son producidos con una perturbación fuerte y el punto donde convergen todas las curvas (Punto a) es cuando no hay perturbación.

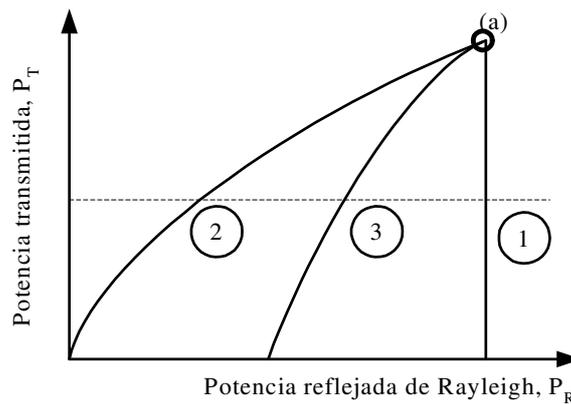


Figura 64. Relación de potencias transmitida y reflejada en distintos puntos a lo largo de la fibra desde cero pérdidas hasta pérdida total.

### ***Simulación numérica de la relación transmitida / reflejada***

Se calcularon la transmisión y la reflexión para dos segmentos de fibra la dispersión de Rayleigh con longitudes de  $l_1$  y  $l_2$ , separadas por un segmento corto con pérdidas inducidas para la simulación numérica de la relación entre las potencias de transmisión y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas cuando las pérdidas ocurren en diferentes distancias a lo largo de la fibra de prueba, como se muestra en la figura 65.

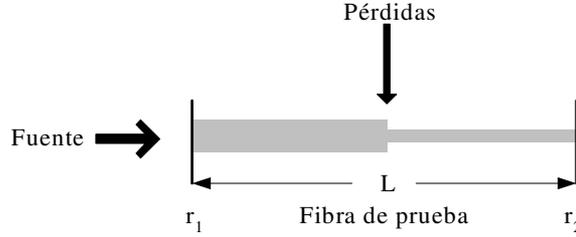


Figura 65. Comportamiento de las potencias transmitida y reflejada con pérdida en cualquier lugar de la fibra para simulación.

La potencia del coeficiente de reflexión de cada segmento de dispersión de Rayleigh en fibra es [Spirin *et al.*, 2002 A, Spirin *et al.*, 2002 B]:

$$R_{\delta L} = S(\alpha_s / \alpha)[1 - \exp(-2\alpha\delta L)]/2 \quad (63)$$

Donde  $\alpha_s$  es el coeficiente de atenuación debido a la dispersión de Rayleigh,  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación total de la fibra de prueba,  $\delta L$  es la longitud del segmento de fibra y el factor de recaptura  $S$  para la fibra de índice escalonado se define como [Gysel y Staubli, 1990]:

$$S = b(n_1^2 - n_2^2) / n_1^2 \quad (64)$$

Aquí  $b$  es un parámetro el cual depende de la propiedad de guía de onda de la fibra y es usualmente en el intervalo de 0.21 a 0.24 para fibras monomodo de índice escalonado [Gysel y Staubli, 1990]  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del núcleo y recubrimiento de la fibra, respectivamente.

Introduciendo un parámetro  $S_\alpha = S(\alpha_s/2\alpha)$ , los coeficientes de transmisión y de retrodispersión de secciones de fibra completa se pueden escribir como  $T_{1,2} = \exp(-l_{1,2})$  y  $R = S_\alpha[1 - \exp(-2l_{1,2})]$ , respectivamente. Un tramo corto de fibra se afecta por una condición de monitoreo, se introduce pérdida de luz y tiene una transmisión  $T_s \leq 1$ .

Considerando que la dispersión es relativamente débil y la porción de la luz dispersada es muy pequeña. Esto permite simplificar el análisis, despreciando dispersión múltiple en ambas direcciones. Se tomaron en cuenta la reflexión de los extremos inicial y final de la fibra con coeficientes  $r_1$  y  $r_2$ , respectivamente, ya que una reflexión débil se puede comparar con la retrodispersión. Sin embargo, se puede asumir que  $r_{1,2} \ll 1$  y despreciar reflexiones múltiples también. En este caso, los coeficientes de transmisión  $T$  y la retrodispersión  $R$  de este sistema óptico se puede escribir como

$$T = T_1 T_s T_2 = T_s e^{-\alpha L} \quad (65)$$

$$R = r_1 + S_\alpha(1 - e^{-2\alpha l_1}) + T_1^2 T_s^2 S_\alpha(1 - e^{-2\alpha l_2}) + T_1^2 T_s^2 T_2^2 r_2 \quad (66)$$

donde  $L = l_1 + l_2$  es la longitud total del sensor.

Los coeficientes normalizados son definidos como  $T_{norm} = T/T_{max}$  y  $R_{norm} = R/R_{max}$ , donde  $T_{max}$  y  $R_{max}$  se pueden evaluar a partir de las ecuaciones anteriores cuando  $T_s = 1$ . Esto deja

$$T_{norm} = T_s \quad (67)$$

$$R_{norm} = \frac{S_\alpha + r_1 - (S_\alpha + r_2)T_s^2 e^{-2\alpha l_1} - S_\alpha(1 - T_s^2)e^{-2\alpha l_1}}{S_\alpha + r_1 - (S_\alpha - r_2)e^{-2\alpha l_1}} \quad (68)$$

La relación entre las potencias transmitida  $T_{norm}$  y de retrodispersión de Rayleigh  $R_{norm}$  normalizadas se pueden encontrar en las (67)-(68):

$$T_{norm}^2 = \frac{(S_\alpha + r_1)(R_{norm} - 1) - R_{norm}(S_\alpha - r_2)e^{-2\alpha l_1} + S_\alpha e^{-2\alpha l_1}}{S_\alpha(e^{-2\alpha l_1} - e^{-2\alpha l_1}) + r_2 e^{-2\alpha l_1}} \quad (69)$$

La potencia normalizada transmitida se obtiene a partir de

$$T_{norm} = \sqrt{\frac{(S_{\alpha} + r_1)(R_{norm} - 1) - R_{norm}(S_{\alpha} - r_2)e^{-2\alpha L} + S_{\alpha}e^{-2\alpha L_1}}{S_{\alpha}(e^{-2\alpha L_1} - e^{-2\alpha L}) + r_2e^{-2\alpha L}}} \quad (70)$$

despejando de la ecuación (70)  $l_1$ :

$$l_1 = \frac{1}{2\alpha} \ln \frac{S_{\alpha}(1 - T_{norm}^2)}{(1 - R_{norm})(S_{\alpha} + r_1) + (R_{norm} - T_{norm}^2)(S_{\alpha} - r_2)e^{-2\alpha L}} \quad (71)$$

Entonces utilizando las potencias normalizadas transmitidas y reflejadas,  $T_{norm}^2$  y  $R_{norm}$ , respectivamente, se puede determinar el punto  $l_1$  donde está ocurriendo una perturbación. La pendiente de la dependencia de la potencia transmitida normalizada al cuadrado ( $T_{norm}^2$ ) respecto a la potencia retrodispersión de Rayleigh normalizada ( $R_{norm}$ ) es:

$$\frac{\partial(T_{norm}^2)}{\partial R_{norm}} = \frac{S_{\alpha} + r_1 - (S_{\alpha} - r_2)e^{-2\alpha L}}{S_{\alpha}(e^{-2\alpha L_1} - e^{-2\alpha L}) + r_2e^{-2\alpha L}} \quad (72)$$

donde  $\partial(T_{norm}^2)/\partial R_{norm}$  se obtiene a partir de datos experimentales, se toma lectura ( $T_{norm}$ ,  $R_{norm}$ ) en dos puntos, el primero sin perturbación y el segundo con pérdidas inducidas, entonces se grafica ( $T_{norm}^2$ ,  $R_{norm}$ ) para cada punto, se traza una recta entre estos puntos y la pendiente de este recta es el término que corresponde a la derivada del cuadrado de la potencia transmitida con respecto a la potencia de retrodispersión de Rayleigh (ver Figura 66). Una vez que se conoce  $\partial(T_{norm}^2)/\partial R_{norm}$ , la localización de la región de pérdida  $l_1$  se encuentra directamente desde la ecuación (72) obteniendo la siguiente expresión:

$$l_1 = \frac{1}{2\alpha} \ln \left[ \frac{S_{\alpha} \frac{\partial(T_{norm}^2)}{\partial R_{norm}}}{S_{\alpha} + r_1 - (S_{\alpha} - r_2) \left( 1 - \frac{\partial(T_{norm}^2)}{\partial R_{norm}} \right) e^{-2\alpha L}} \right] \quad (73)$$

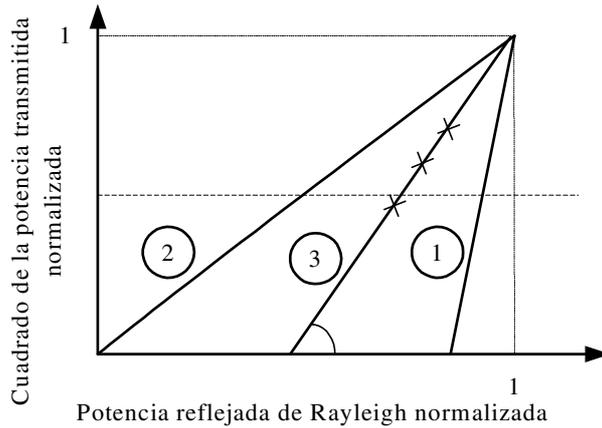


Figura 66. Relaciones teóricas entre las potencias normalizadas transmitida al cuadrado y de retrodispersión de Rayleigh para pérdidas inducidas por curvatura en diferentes localizaciones espaciadas igualmente a lo largo de la fibra de prueba.

**Resultados numéricos para localización de pérdidas.**

Considerando una fibra monomodo con longitud de 2844 m para telecomunicaciones SMF-28, con dispersión de Rayleigh y pérdidas inducidas en diferentes posiciones a lo largo de ésta. El resultado de los cálculos numéricos cuando las pérdidas adicionales ocurren en distancias  $l_{1,n} = n\Delta L$  desde el inicio hasta el final de la fibra de prueba, donde  $n = 0, 1, \dots, 10$  y el intervalo entre la localización de curvaturas  $\Delta L = 284.4$  m. Las potencias transmitida y de retrodispersión fueron normalizadas con respecto a sus valores iniciales sin perturbación. Se utilizó un valor típico para  $b = 1/4.55$  para fibra monomodal [Liaw *et al.*, 2000] en los cálculos. Se obtiene una buena aproximación entre datos experimentales y la teoría obtenida utilizando  $(\alpha_s/\omega) = 0.68$ , que es bastante razonable para la fibra utilizada en los experimentos con coeficiente de atenuación total  $\alpha = 0.19$  dB/km [Liaw *et al.*, 2000]. Las reflexiones al inicio y al final de la fibra sensada en nuestro experimento son igual a  $4.7 \times 10^{-6}$  y  $1.5 \times 10^{-5}$  respectivamente, donde también se toman en cuenta los cálculos.

Como se puede ver, entre las curvas paramétricas de los extremos  $l_{1,0}$  y  $l_{1,10}$  cada punto localizado con coordenadas  $(T_{norm}, R_{norm})$  corresponde únicamente a una curva paramétrica que atraviesa este punto (figura 67). Por lo tanto, para localizar la perturbación con el método propuesto, se necesitan las coordenadas dadas por las potencias de retrodispersión de Rayleigh y la transmitida normalizadas. Lo mismo sucede cuando utilizamos con coordenadas  $(T_{norm}^2, R_{norm})$  (figura 68)

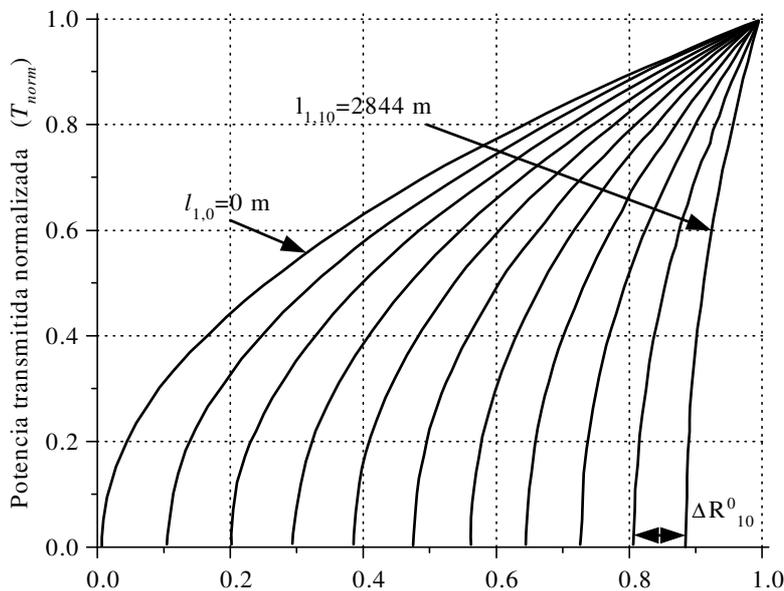


Figura 67. Relaciones teóricas entre las potencias transmitidas y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas para pérdidas inducidas por curvatura en diferentes localizaciones espaciadas igualmente a lo largo de la fibra de prueba.

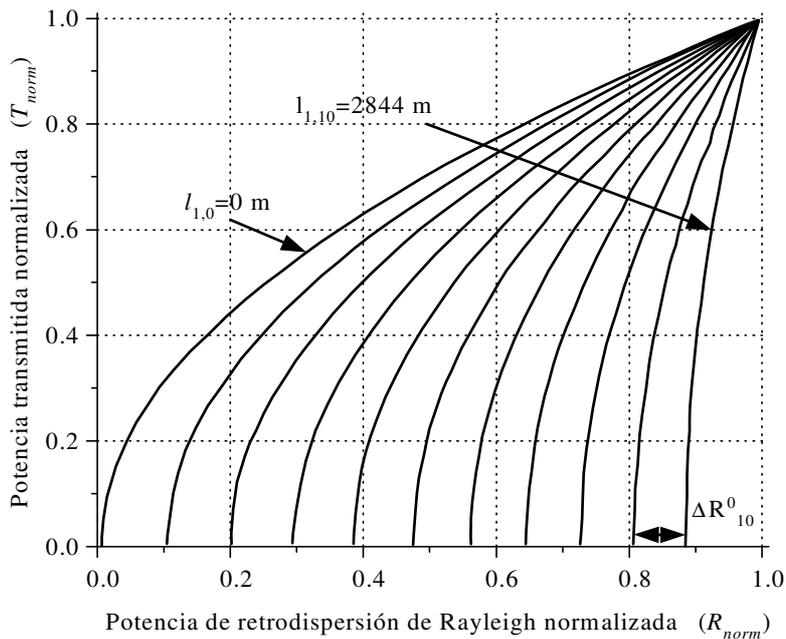


Figura 68. Relaciones teóricas entre el cuadrado de la potencia transmitida normalizada y la de retrodispersión de Rayleigh para pérdidas inducidas por curvatura en diferentes localizaciones espaciadas igualmente a lo largo de la fibra de prueba.

Por otro lado, como es bien sabido, el exceso de pérdidas por curvaturas depende de la amplitud de la perturbación [Nolan *et al.*, 1991], [Mitchell, 1991] y [Clark y Smith, 1995]. De ahí, el decremento en la potencia transmitida se puede utilizar para medición del valor integral de la perturbación sobre algún dominio espacial [Brinkmeyer, 1980]. Por lo tanto, el método propuesto proporciona ambas, detección y localización de una sola perturbación con pérdidas inducidas en la fibra de prueba.

### **Sensor para detección de fugas de gasolina.**

El diagrama esquemático del sensor de fibra óptica se muestra en la figura 69. Se introdujo una onda continua de luz emitida por una fuente ASE que opera cerca de la longitud de onda de 1550 nm con un ancho de línea de pocos nanómetros una fibra estándar para comunicaciones monomodal de índice escalonado con una longitud de 2.884 Km a través de un acoplador de 3 dB. La potencia óptica introducida fue alrededor de 1.1 mW y el coeficiente de atenuación  $\alpha$  de la fibra de prueba fue de 0.19 dB/km que fue medida con un

OTDR. Para anular las retrorreflexiones de la fuente ASE se utilizó un aislador óptico. Todos los extremos finales de las fibras fueron colocados en líquidos de inmersión para reducir las retrorreflexiones. Se utilizó un HP 8153A Lightwave Multimeter de alta precisión para medir la potencia de retrodispersión de Rayleigh con un tiempo de promediación de 5ms y la potencia transmitida con un medidor de potencia estándar.

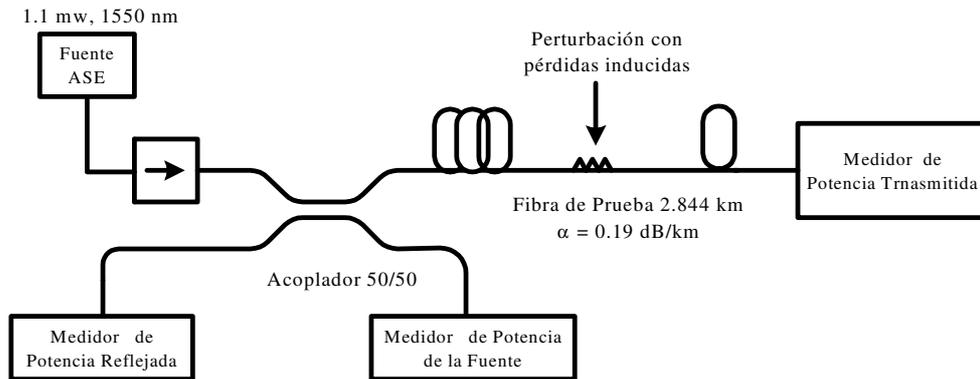


Figura 69. Diagrama esquemático experimental para el método ATR.

Para inducir las pérdidas de curvatura bajo la influencia de gasolina, como transductor sensible se utilizó un polímero expandible. El diseño de los elementos sensible se muestra esquemáticamente en la figura 70. La fibra óptica y el polímero expandible se alinearon juntos y acoplados mecánicamente por un alambre suave alrededor de ellos. La fibra se colocó dentro de pequeñas ranuras en el polímero que permite eliminar las pérdidas iniciales, sin embargo no incrementa significativamente el tiempo de respuesta del sensor. Se utilizó una goma blanca de *butyl* como polímero sensible en el sensor de hidrocarburo propuesto. Este material tiene buenas propiedades de envejecimiento a elevadas temperaturas, buena estabilidad química. Es también resistente al clima, a la luz del sol, ozono, ácidos minerales, solventes oxigenados (ketones y alcohol) y absorción al agua [Beller, 1998], [Spillman, 1997]. La goma absorbe y se expande en presencia de hidrocarburo sin disolución y cambio significativo en sus propiedades mecánicas. El comportamiento de la expansión del polímero produce un incremento en las dimensiones físicas del material, que se convierte fácilmente a una respuesta mecánica. Este estudio muestra que la goma de *butyl* puede incrementar su volumen por más de dos veces bajo la influencia de gasolina [Allen, 1972], [Morton, 1987]. Por otra parte, su comportamiento es reversible, es decir que se puede utilizarse en múltiples ciclos de húmedo - seco. En el experimento se probó el sensor bajo la influencia de gasolina, pero cualitativamente tiene el mismo comportamiento de la expansión de la goma de *butyl* se muestra en una gama de combustibles de hidrocarburo en [Spirin *et al.*, 1999B].

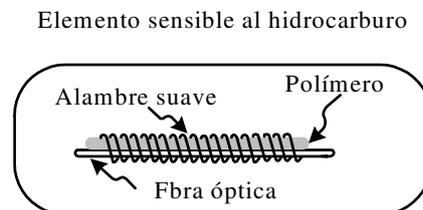


Figura 70. Construcción del elemento sensible de fibra óptica.

Para estudiar la respuesta del sensor, se colocó dentro de un recipiente lleno de gasolina 20 cm de longitud del elemento sensible localizado a 2780 m desde el inicio de la fibra. Bajo la influencia de gasolina la goma de *butyl* se expande produciendo curvaturas en la fibra, que inducen las pérdidas en la fibra de prueba. La figura 71 muestra el cambio de transmisión de la fibra de prueba durante el ciclo húmedo - seco. El decremento de transmisión indica presencia de hidrocarburo y permite estimar un valor integral de la perturbación. La localización de la perturbación con el método propuesto, se necesita encontrar la relación entre las potencias transmitida y retrodispersión de Rayleigh normalizadas. Estas dependencias durante el ciclo de húmedo - seco se presentan en la figura 72 (para  $T_{norm}$ ) y la figura 73 (para  $T_{norm}^2$ ). En las figura 72 y figura 73 se muestran las dependencias teóricas calculadas para pérdidas inducidas a 2780 m y al final de la fibra (2844 m), respectivamente. Como se puede ver, las dependencias para periodos de humedad y secado prácticamente coinciden con las predicciones teóricas. De ahí, con el método propuesto la localización de la perturbación se puede encontrar midiendo las potencias transmitidas y de retrodispersión de Rayleigh. Notese que, en general, utilizando este algoritmo, se puede localizar solamente una sola perturbación a lo largo de la fibra sensada.

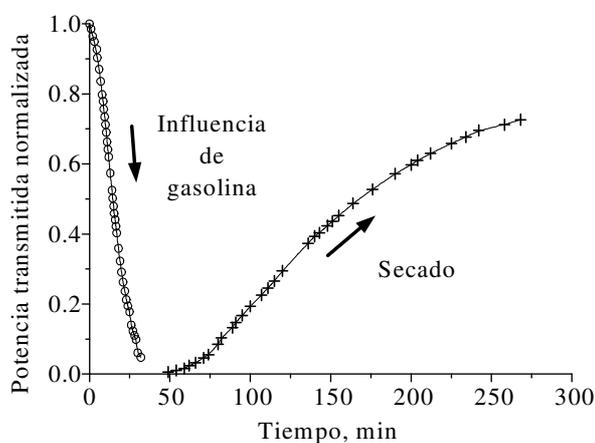


Figura 71. Potencia transmitida normalizada durante el ciclo húmedo – seco. (o influencia de gasolina, + secado).

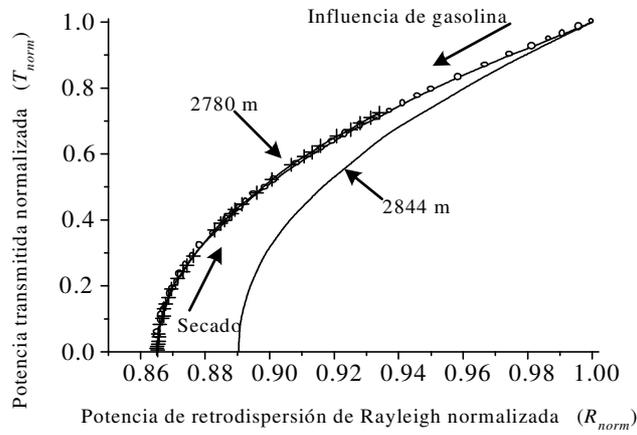


Figura 72. Relaciones entre las potencias transmitida normalizada y la de retrodispersión de Rayleigh normalizadas durante ciclos de húmedo – seco. (o bajo influencia de gasolina, + secado, – dependencias teóricas).

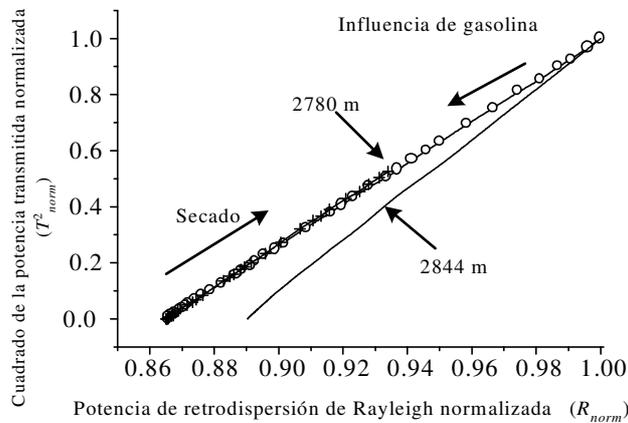


Figura 73. Relación entre el cuadrado de la potencia transmitida normalizada y la de retrodispersión de Rayleigh normalizada durante ciclos de húmedo – seco. (o bajo influencia de gasolina, + secado, – dependencias teóricas).

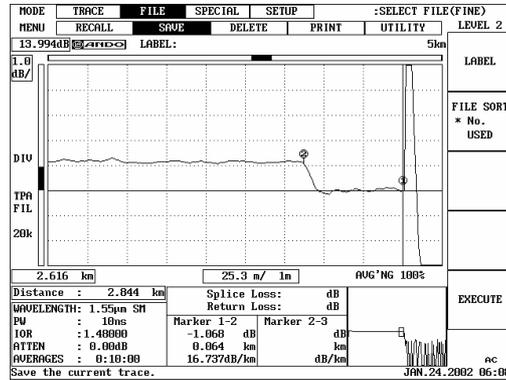


Figura 74. Trazo de la perturbación utilizando OTDR, con promediación de 10 min.

La localización precisa de las distribución (2780m) se encontró con un OTDR. En figura 74, se muestra el trazo para 1 dB de pérdidas después de 10 minutos de promediación.

### *Estimación en el error de localización de la perturbación*

La precisión de la localización de las pérdidas en exceso con el método ATR depende fuertemente del valor de las pérdidas inducidas. Con el método ATR es más fácil localizar perturbaciones fuertes, sin embargo para localizaciones de perturbaciones débiles se requiere una mas alta precisión de las mediciones de las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh. En contraste a esto, la precisión para localizar pérdidas en la técnica estándar OTDR depende principalmente de la duración del pulso óptico de prueba y es prácticamente independiente del valor de la pérdida. La figura 75 muestra el error relativo de la localización con el método ATR contra las pérdidas en exceso inducidas para el sensor de detección de hidrocarburo presentado a partir de los datos. El error relativo de localización se determinó como el error de localización dividido por su valor para fuertes pérdidas inducidas que decrecen la transmisión de la fibra por mas de 30 dB. Se puede apreciar también el error de localización para pérdidas débiles exceden significativamente el error de localización para una fuerte. Por ejemplo, si el error de localización para perturbación fuerte es igual a  $\pm 1m$  para el extremo cercano y lejano de la fuente en una fibra de 2.844km, el error de localización para 0.1 y 1 dB de pérdidas inducidas son igual a  $\pm 22m$  y  $\pm 3m$ , respectivamente.

El intervalo de medición y el máximo de pérdidas permisible para los métodos ATR y OTDR son comúnmente los mismos, ya que ambos métodos miden la potencia retrodispersada Rayleigh y el intervalo máximo para ambos métodos se restringidos por la atenuación de la fibra de prueba.

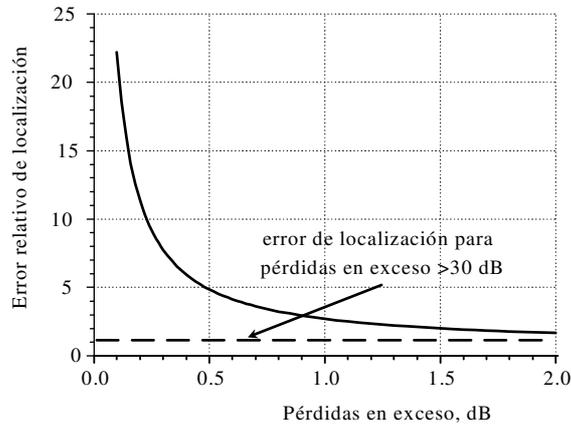


Figura 75. Error relativo de localización de la perturbación para el método ATR.

Para estimar la precisión de la localización de perturbación con este sensor presentado, se indujeron fuertes pérdidas por curvatura (como se muestra en la figura 76) que decrece la transmisión de la fibra por más de 30 dB en el extremo final de la fibra.

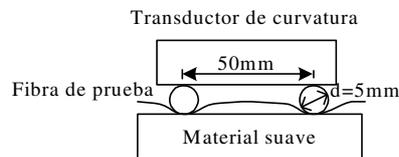


Figura 76. Mecanismo para inducir pérdidas.

La figura 77 y figura 78 muestran las variaciones medidas de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada, cuando se inducen fuertes pérdidas en el extremo lejano a la fuente y en el extremo opuesto, respectivamente. Estas variaciones aleatorias se encuentran dentro del intervalo  $(R_0 \pm \delta R_0)$ , donde  $R_0 = 0.8936$  es el valor principal y  $2\delta R_0 = 6 \times 10^{-4}$  es el ancho del este intervalo. La desviación estándar de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada fue estimada como  $1.5 \times 10^{-4}$ .

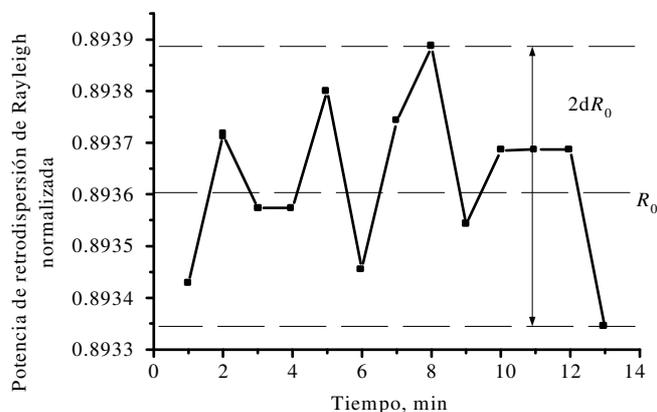


Figura 77. Variaciones de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada en el tiempo para fuertes pérdidas inducidas en el extremo de la fibra de prueba cercana del extremo final de la fibra.

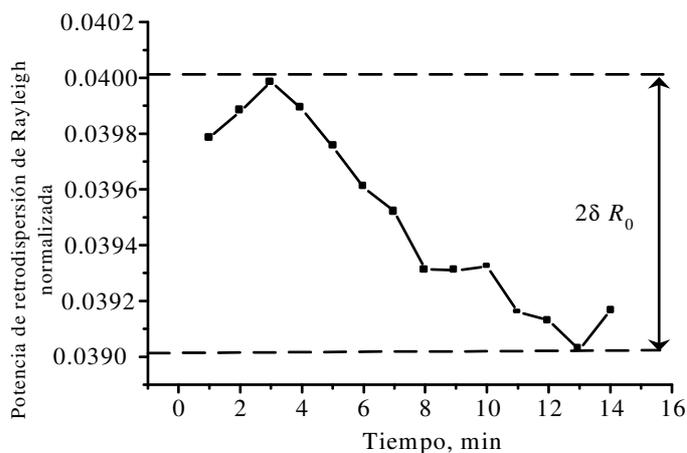


Figura 78. Variaciones de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada en el tiempo para fuertes pérdidas inducidas en el extremo de la fibra de prueba cercana a la fuente.

La diferencia entre las potencias de retrodispersión de Rayleigh normalizadas para las curvas paramétricas  $l_{1,10}$  y  $l_{1,9}$  para la transmisión igual a 0 (perturbación fuerte) es  $\Delta R_{10}^0 = 0.08$  (ver figura 67 y figura 68). Ya que las curvas paramétricas  $l_{1,10}$  y  $l_{1,9}$  corresponde a posiciones separadas por  $\Delta L = 284.4$  m el máximo error de localización de una fuerte perturbación cerca del extremo final de la fibra  $\delta_{10}^0$  se encontró ser igual a  $\pm 1$  m utilizando la siguiente ecuación:

$$\delta_{10}^0 = \frac{\Delta L \delta R_0}{\Delta R_{10}^0} \quad (74)$$

En la ecuación (74) el error máximo de localización  $\delta_{10}^0$  se determina utilizando la derivación máxima de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizada  $\delta R_0$ . Notese, que el error de localización, el cual se define desde la derivación estándar de la potencia de retrodispersión normalizada fue aproximadamente dos veces menos. Para la perturbación fuerte cerca del extremo inicial de la fibra de prueba, se obtuvo alrededor del mismo valor del error de localización. Se debe resaltar, sin embargo, que el análisis del error de localización presentado aquí toma solamente en cuenta errores aleatorios de la potencia normalizada medida de la dispersión de Rayleigh. En la práctica, el ruido con otro origen e imperfecciones del sistema puede también contribuir al decremento de precisión. Estos pueden ser cambios temporales de la fibra y parámetros del detector, pérdidas adicionales incontrolables, etc. Sin embargo, el análisis completo de error del sensor de fibra óptica propuesto se plantea como trabajo futuro.

A partir de los datos presentados en la figura 67 y figura 68, con el método propuesto es más fácil localizar perturbaciones fuertes, sin embargo la localización de perturbaciones débiles requiere una mas alta precisión de la medición de las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh. Para  $T_{norm}$  (figura 79) y  $T_{norm}^2$  (figura 80) muestra la relación de mediciones experimentales entre las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh normalizadas para las pérdidas inducidas por curvatura en 2844 y 2839 metros. Como se puede apreciar dos diferentes localizaciones de la perturbación cerca del extremo final de la fibra de prueba separada por 5 metros se pueden claramente reconocer para las pérdidas que decrecen la transmisión inicial por mas de 5 veces.

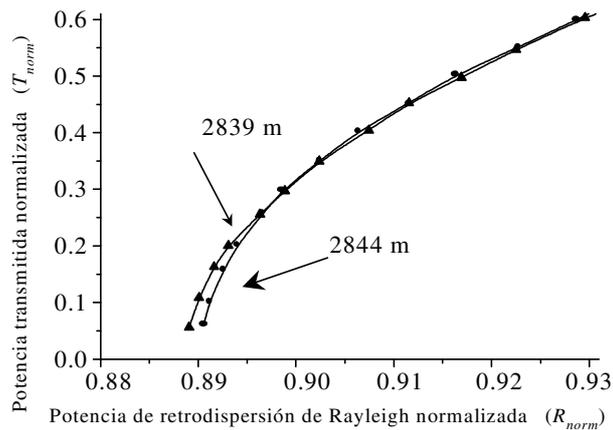


Figura 79. Relación entre la potencia normalizada transmitida y de retrodispersión de Rayleigh para pérdidas inducidas por curvatura en 2844 m (O) y en 2839 m ( $\Delta$ ).

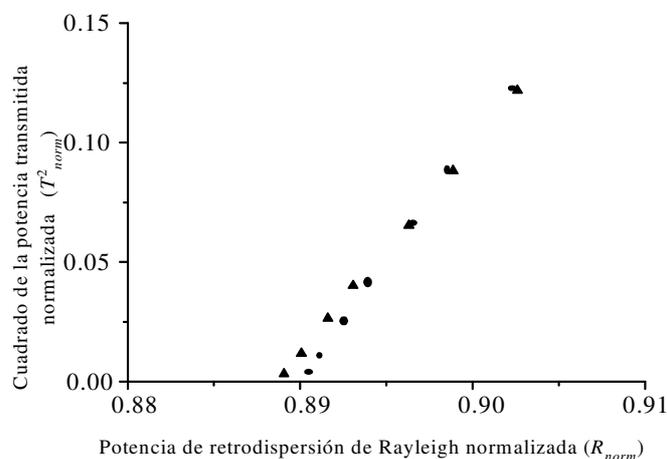


Figura 80. Relación entre el cuadrado de la potencia transmitida y de la potencia de retrodispersión de Rayleigh normalizadas para pérdidas inducidas por curvatura. en 2844 m (O) y en 2839 m ( $\Delta$ ).

## Conclusiones del capítulo V

Se presentaron varias formas de interrogar un sensor para detección de fugas de hidrocarburo. La interrogación de sensores basados en rejillas de Bragg y utilizando OTDR únicamente se presentaron su principio de operación.

Se presentó la operación de un sensor de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo basado en un polímero expandible bajo la influencia de éste. La técnica COFDR fue utilizada para la interrogación del sensor, se presentó su principio de operación y implementación experimental, teniendo una respuesta detectable en aproximadamente 8 minutos, conociendo entre que par de puntos está ocurriendo un evento. La expansión de 20 cm de longitud del elemento sensible induce pérdidas adicionales hasta de 25 dB bajo la influencia de gasolina. Experimentalmente se encontró que la máxima variación del corrimiento de la trayectoria del borde corresponde a una variación máxima de una distancia de  $\pm 0.3$  m cerca de la fuente y de  $\pm 0.5$  m para la rejilla localizada a 100 m desde la fuente.

Se analizó la influencia de múltiples reflexiones sobre la relación señal a ruido (SNR) de los sensores DDSL y se determinó la SNR para cualquier posible número de reflectores concentrados con reflectividad arbitraria.

Finalmente se desarrolló un sensor simple de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo que utiliza un polímero expandible y una fuente de luz no modulada de onda continua. Se ha demostrado que el sensor de hidrocarburo propuesto permite la localización de una perturbación por pérdidas inducidas a lo largo de la fibra sensada midiendo solamente las potencias transmitida y de retrodispersión de Rayleigh de una fuente de onda continua no modulada. Se demostró que con una fuerte perturbación el error máximo de localización es de  $\pm 1$  m en una fibra

monomodal de 2.844 km de largo. Se considera que la técnica propuesta debe ser muy atractiva para la eventual realización de un sensor de alarma de fibra óptica distribuido compacto y de bajo costo.

- [ Bao 1995] Bao X., J. Dhiwayo , N. Heron, D. J. Webb y D. A. Jackson, 1995, "Experimental and Theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering", J. Lightwave Technol., 13, 1340-1348 pp.
- [Allen 1972] Allen P. W., 1972, Natural Rubber and the Synthetics. New York, Wiley.
- [Askins 1995] Askins C. G., M.A. Putnam, E. J. Friebele, 1995, "Instrumentation for interrogating many-element fiber Bragg grating arrays", Proc SPIE vol. 2444, 257-266 pp.
- [Ayra 1998] Ayra V., K.A. Murphy, A. Wang, R. O. Claus, 1995, J. Lightwave Technol. LT-13, 1998 pp.
- [Bao 1994] Bao X., D. J. Webb y D. A. Jackson, 1994, "Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber", Optics Lett, 19 (2), 141-143 pp.
- [Barnoski 1976] M. K. Barnoski y S. M. Jensen, 1976, "Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics", Appl. Opt., 15 ( 9), 2112-2115 pp.
- [Beller 1998] Beller J. , 'OTDRs and Backscatter Measurements', 1998, *Fiber Optic Test and Measurement*, En: D. Derickson. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- [Beltran 2002 A] Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, A. Marquez, R. Lopez y Spirin V.V., 2002, "Pérdidas por macrocurvaturas en fibras ópticas producidas por materiales suaves y expandibles para la detección de fugas de hidrocarburos", *Revista Mexicana de Física* 47 (5), 421-424 pp.
- [Beltran 2002 B] Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, J. Leon-Baez, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez-Lucero, 2002, Fiber bend losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection, Optics communication, 204, 145-150 pp.
- [Berthold III 1995] Berthold III J. W., 1995, "Historical Review of microbend Fiber-Optic Sensor", Journal of Lightwave Technology, 13 (7), 1193 pp.
- [Brehnan 1988] Brehnan B. W., 1988, "Prototype polarimetric based fiber optic strain gauge", Reviews of progress in quantitative nondestructive evaluation, Plenum Press, New York, 547 pp.
- [Brinkmeyer 1980] Brinkmeyer E., 1980, *Electron. Lett.* 16 (1980), 329 pp.
- [Buck 1995] Buck J. A., 1995, Fundamentals of Optical fibers, Wiley Series in Pure and Applied Optics, New York: Wiley.
- [Clark 1995] Clark T. y H. Smith, 1995, "Microbend fiber optic sensors", in Fiber Optic Smart Structures, editado por E. Udd: John Wiley & Sons, New York.
- [Conduit 1981] Conduit, A. J., D.N. Payne, A. H. Hartog y M. P. Gold, 1981, Optical fibre diameter variations and their effect on backscatter loss measurement, Electron. Lett., 17, 308-310 pp.
- [Culshaw 1988] Culshaw B. 1988, "Optical fiber sensors: principles and components", Basic concepts of optical fiber sensors 1, Editado por Culshaw B. y Dakin J.
- [Dakin 1985 A] Dakin, J. P., D. J. Pratt, G. W. Bibby y J. N. Ross, 1985, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector, Electron. Lett. 21 (13), 569-570 pp.
- [Dakin 1985 B] Dakin J. P., D.J. Pratt., G.W. Bibby y J. N. Ross, 1985, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", Electron. Lett. 21 (13), 569-570, 1985 pp.
- [Dakin 1999] Dakin J., S. Mackenzie y Hodgkinson J., 1999, "Optical Fiber – Chemical Sensing using direct Spectroscopy", Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends, Vol. 4, editado por John Dakin and Brain Culshaw.

- [Dakin, 1992] Dakin J. P., 1992, "Distributed optical fiber sensors", Distributed and Multiplexed fiber optic sensors II SPIE 1797, 76-106 pp.
- [Dakin] Dakin J. y B. Culshaw, 1999, "Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends", Vol. 4, 1999.
- [Derickson 1998] Derickson Dennis, 1998, "Fiber optic Test and Measurement", editado por Derickson Dennis.
- [Di Vita 1980] Di Vita, P. y U. Rossi, 1980, "The backscattering technique: its field of applicability in fibre diagnostics and attenuation measurements", Optical Quantum Electron., 11, 17-22pp.
- [Eickhoff 1981] Eickhoff W. y R. Ulrich, 1981, "Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber", Appl. Phys. Lett. 39 (9), 693-695 pp.
- [Falco 1989] Falco L. y P. Debergh, 1989, "Bimorphous distributed transduce for temperature threshold sensor", Proc. SPIE vol. 1011, 166-172 pp.
- [Ferrel 1988] Ferrel T.L., 1988, "Fiber-Optic Surface-Enhanced Raman System for field Screening of hazardous Compounds", Proc. First International EPA Symposium on Field Screening Methods for Hazardous Waste Site Investigations, Las Vegas, Nev.
- [Fields 1980 A] Fields J. N., 1980, "Pressure sensor", J. Acoust. Soc. Am., 67, 816-818, pp.
- [Fields 1980 B] Fields J. N., 1980, "Attenuation of a parabolic-index fiber with periodic bends", Appl. Phys. Lett., 36, 799-801 pp.
- [Franklin] Franklin Hodge, "Buytl rubber sheeting", Franklin Hodge Industries Limited, U.K.
- [Froggatt 2000] Froggatt M., B. Childers, J. Moore, T Erdogan, 2002, "High density strain sensing using optical frequency domain reflectometry", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical fiber Sensors, Proc. SPIE Vol. 4185, 249-255 pp.
- [Gambling ] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale, 1979, "Curvature and microbending losses in single mode optical fibres", Optical and Quantum Electronics 11, 43-59 pp.
- [Gambling 1978] Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale y R. A. Sammut, 1978, "Measurement of radiation loss in curved singlemode fibers", Microwaves, Opt. Acoust., 2 (4), 134-140 pp.
- [Garcus ] Garcus Dieter, T. Gogolla, K. Krebber y F. Schliep, 1997, "Brillouin Optical-Fiber Frequency-Domain Analysis for distributed temperature and strain Measurements", Journal of Lightwave Technol. 15 (4), 654-662 pp.
- [Gareth ] Gareth, Pierce S., Alistar MacLean, Brian Culshaw, 1995, "Optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend based optical fibre sensors"
- [Gauthier 1997] Gauthier R. C. y C. Ross, 1997, "Theoretical and experimental consideration for single-mode fiber optic bend-type sensors", Appl. Opt., 36 (25), 6264-6273 pp.
- [Giles 1983] Giles I. P., D. Uttam, B. Culshaw y D. E. N. Davies, 1983, "Coherent Optical-fibre sensors with modulated laser sources", Electronics Letters, 19, 14-15 pp.
- [Grassino] [Grassino B. Susan
- [Grattan 2000] Grattan K.T.V. y T. Sun, 2002, "Fiber Optic sensor technology: an overview", Sensors and Actuators 82, 40-61 pp.
- [Gysel 1990] Gysel P. y R.H. Staubli, 1990, "Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fiber", J. Lightwave Technol. 8 (4), 561-567 pp.
- [Hartog 1995] Hartog H., 1995, "Distributed fiber optic sensors", en Optical fiber Sensor Technology, editado por K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 347-382 pp.
- [Healey 1986] Healey, 1986, "Instrumentation principles for optical time domain reflectometry", J. Phys. E: Sci Inst., 19, 334-341 pp.
- [Henderson 1997] Henderson PJ, N. E. Fisher y D.A. Jackson, "Current metering using fibre-grating based interrogation of a conventional current transformer", Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor, Williamsburg, USA, 186-9, 1997 pp.
- [Hewlett-Packard ] Hewlett-Packard company, 1992, "High-speed lightwave component analysis", Application Note 1550-6
- [Horiguchi 1989 A] Horiguchi T. y M. Tateda, 1989, "Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave", Opt. Lett., 14 (8), 408-410 pp.

- [Horiguchi 1989 B] Horiguchi T. y M. Tateda, 1989, "BOTDA Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory", *Journal Lightwave Technol.*, 7, 1170-1176 pp.
- [Horiguchi 1990] Horiguchi T., K. Shimizu, T. Kurashima, T., M. Tateda y Y. Koyamada, 1990, "Development of distributed sensing technique using Brillouin Scattering", *J. of Lightwave Technol.*, 15 (8), 1038-1040 pp.
- [Horiguchi 1995 A] Horiguchi T., Shimizu, K., T. Kurashima, M. Tateda y Y. Koyamda, 1995, "Development of a Distributed Sensing Technique using Brillouin Scattering", *J. Lightwave Technol.*, 13 (7), 1296-1302 pp.
- [Horiguchi 1995 B] Horiguchi Tsuneo, 1995, "Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering", *Journal of Lightwave Technology*, 13 (7).
- [Hymans 1960] Hymans A. J. y Lait J., 1960, "Analysis of a frequency modulated continuous wave ranging systems", *Proc. IEEE*, 107B, 365-372 pp.
- [IISRP ] IISRP company, "Butyl rubber", International Institute of Synthetic Rubber, inc.
- [Jones 1998 A] Jones J.D.C., R. McBride, 1998, "Multiplexing optical fiber sensor", *Optical Fiber sensor technology*, editado por Gratan K. y Meggot B.T., 12, London: Chapman & Hall.
- [Jones 1998 B] Jones S. L., G. Murtaza y J. M. Senior, 1998, "Single-Mode Optical Fiber Microbend Loss Modeling Using the Finite Difference Beam Propagation Method", *Optical Fiber Technol.* 4 pp. 471-479.
- [Kashyap] Kashyap Raman, 1999, "Fiber Bragg gratings", *Optics and Photonics*, Academic Press.
- [Kersey 1996] Kersey A. D., 1996, "A review of recent developments in fiber optic sensor technology", *Optical fiber technology*, 291-317 pp.
- [Kersey 1997] Kersey A. D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M, Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J., 1997, "Fiber grating sensors", *J. Lightwave Technol.* 15 (8), 1444-63 pp.
- [Kersey 1997B] Kersey Alan D., 1997, "Optical fiber sensors", *Optical measurement and applications*, editado por Pramod K. Rastogi, Artech House, Boston, 217-254 pp.
- [Kurashima 1990] Kurashima T., T. Horiguchi y M. Tateda, 1990, "Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers", *Opt. Lett.*, 15 (8), 1038-1040 pp.
- [Kuzin 2001] Kuzin E.A., G. Beltran-Perez, J. Camas, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez, 2001, "Fiber losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection", *Fiber Optic Sensor Technology and Applications*, Newton, USA.
- [Kvasnik 1989] Kvasnik y McGrath A. D., 1989, "Distributed chemical sensing utilizing evanescent wave interactions", *Chemical, Biomedical and Environmental Sensors*, SPIE 1172, 75-82 pp.
- [Lecoeuche, 1999] Lecoeuche V., D. J. Webb, C.N. Pannell y D. A. Jackson, 1999, "25 km Brillouin based single-ended distributed fibre sensor for threshold detection of temperature or strain", *Optics communications*, 168, 95-102 pp.
- [Liaw 2000] Liaw S.K., S.L. Tzeng, y J. Hung, 2001, "Rayleigh backscattering induced power penalty on bidirectional wavelength-reuse fiber systems", *Opt. Comm.* 188, 63-67 pp..
- [Lise] Lise Anderson Betty, 1995, "New approach to microbending fiber optic sensors: varying the spatial frequency", *Optical Engineering*, 34 (1), 208-213 pp.
- [López 2000] López R.M., V. Spirin, S. Miridonov, y M. Shlyagin, 2000, "Reflectometría óptica en el dominio de frecuencia para detección de fugas de hidrocarburos utilizando Sensores de fibra Óptica Basado en Microcurvaturas", XLIII Congreso Nacional de Física 2000.
- [López 2001] López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Márquez y A. Márquez, 2001, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend and macrobend-based fiber optic hydrocarbon sensors", *Proc. SPIE* vol. 4328, 114-121 pp.
- [López 2002A] López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A. Kuzin, 2002, "Fiber optic distributed sensor for hydrocarbon leak localization based on transmission / reflection measurement", *Optics & Laser Technology*, 34 (6), 465-469 pp.
- [López 2002B] López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A. Kuzin, 2002, "Sensor de Fibra óptica distribuido para localización de fugas de hidrocarburo basado en mediciones de transmisión / reflexión", *Revista Mexicana de Física*, 48 (5), 457-462 pp.

- [López 2002C] López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, G. Beltrán, E.A.Kuzin, A. Márquez, 2003, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of bend-based fiber optic hydrocarbon sensors", *Optical fiber technology*, aceptados bajo correcciones.
- [MacDonald 1981] MacDonald R. I., 1981, "Frequency domain optical reflectometer", *Applied Optics*. 20 (10), 1840-1844 pp.
- [MacDonald 1990] MacDonald R. I. y B. E. Swekla, 1990, "Frequency domain optical reflectometer using a GaAs optoelectronic mixer", *Applied Optics* 29 (31), 4578-4582 pp.
- [MacLean 2000A] MacLean, C. Moran, G. Thursby, S. G. Pierce, B. Culshaw, N.B. Graham, 2000, "Distributed Fibre Optic Sensors for Humidity and Hydrocarbon detection, Smart Structure and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation, SPIE vol. 3986, 342-351 pp.
- [MacLean 2000B] MacLean, C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw, D. Marsh, V. Watson y Geoff Andrews, 2000, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, SPIE Vol. 4185, 382-385 pp.
- [MacLean 2000C] MacLean A., C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw y D. Marsh, 2000, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", *Smart Structure and Materials*, SPIE vol. 4328, 47-53 pp.
- [Marcuse 1976 A] Marcuse D., 1976, "Curvature loss formula for optical fibers", *J. Opt. Soc. Am.*, 66 (3), 216-220 pp.
- [Marcuse, 1976B] Marcuse D., 1976, "Microbending losses of single mode, step-index and multimode, parabolic-index fibers", *Bell systems Techn. Journal* 55, 937-955 pp.
- [Michie 1995 A] Michie W. C., B. Culshaw, I. Mckenzie, M. Konstantakis, N. B. Graham, C. Moran, F. Santos, E. Bergqvist, B. Carlstrom, 1995, "Distributed sensor for water and pH measurements using fiber optics and swellable polymeric systems", *Optics Letters* 20 (1), 103 pp.
- [Michie 1995 B] Michie W. C., B. Culshaw, M. Konstantakis, I. Mckenzie, S. Kelly, N. B. Graham, C. Moran, 1995, Distributed pH and water detection using fiber-optic sensors and hydrogels, *J.Lightwave Technol.* 13 (7), 1415 pp.
- [Miridonov 2001] Miridonov S.V., M.G. Shlyagin, D. Tentori, 2001, "Twin-grating fiber optic sensor demodulation", *Optics Communications* 191, 253-262 pp.
- [Mitchell] Mitchell G.L.", 1991, "Intensity-based and Fabry-Perot interferometer sensors", *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, John Wiley & Sons, New York.
- [Morey 1991] Morey, W. W., J. R. Dunphy y G. Meltz, 1991, "Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensor", *Distributed and Multiplexing Fiber-optic Sensor Proc. SPIE* 1586, 216 pp.
- [Morton 1987] Morton M., 1987, *Rubber Technology*, New York: Von Nostrand Reinhold Co., edición 3era.
- [Murtaza 2001] Murtaza G., S.L. Jones, J.M. Senior y N. Haigh, 2001, "Loss Behavior of single-mode Optical Fiber Microbend Sensors", *Fiber and Integrated Optics*, 20, 53-58 pp.
- [Mussi, 1996] Mussi G. y P. Stamp, 1996, "Polarization effects in C-OFDR", *IEEE Photonics Tech. Letter*, 8 (11), 1513-151 pp.
- [Nasta 1994] Nasta M. N., V. Ayra, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1994, "Periodic microbending on single mode optical fibres for multiplexed sensing", *Proc. SPIE, Smart Structures and Materials*, 2191, 475-481 pp.
- [Nelson 1977] Nelson D. F., 1977, "Vibration-induced modulation of fiberoptic transmission", *Proc. Topical Meet. on Optical Fiber Transmission TU-E7-1 a TU-E7-4*.
- [Ning 1998] Ning Y. N. y K.T.V. Grattan, 1998, "Optical Fiber Sensor technology: Devices and Technology vol. 2", editado por K.T.V. Grattan y B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 1998
- [Nolan 1991] Nolan D.A., P.E. Blaszyk y E. Udd., 1991., "Optical fibers", *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, John Wiley & Sons, New York.
- [Ohno 2001] Ohno H., H. Naruse, M. Kihara y A. Shimada, 2001, "Industrial Applications of the BOTDR optical fiber Strain Sensor", *Optical fiber technology* 7, 45-64 pp.
- [Pacheco 1999] Pacheco M., F.M. Santoyo, L. A. Zenteno, 1999, "Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg gratin high-voltage sensor", *Measurement Science Technol.* 10 (9), 777 pp.

- [Passy 1994] Passy R., N. Gisin, J. P. von der Weid y H. H. Gilgen, 1994, "Experimental and theoretical investigation of coherent OFDR with semiconductor laser sources", *Journal of Lightwave Technology* 12, 1622-1630 pp.
- [Peng 1999] Peng Y.T., Y. Tang y J.S. Sirkis, 1999, "The characterization of hydrogen sensor based on palladium electroplated fiber Bragg gratings (FBG)", *Proc. SPIE* 3670, 42-53 pp.
- [Peterson 1980] Peterson J. I., S. R. Goldstein, Fitzgerald R. V. y D. K. Buckhold, 1980, "Fiber optic pH probe for physiological use", *Anal. Chem.*, 52, 864 pp.
- [Probst 1989] Probst C. B., A. Bjarklev y S.B. Andreassen, 1989, "Experimental verification of microbending theory using mode coupling to discrete cladding modes", *J. Lightwave Technol.* 7 (1), 55-61 pp.
- [Rabiner 1975] Rabiner L.R. y B. G. Gold, 1975, "Theory and application of digital signal processing", Prentice-Hall, INC.
- [Rao 1999] Rao Y., 1999, "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors". *Opt. Lasers Eng.*, 31, 297-324 pp.
- [Roger 1980] Roger, A.J., 1980, "Polarization optical time domain reflectometry", *Electron. Lett.* 16, 489 pp.
- [Roger 2002] Roger A.J., 2002 "Distributed fibre measurement using backscatter polarimetry"
- [Rogers 1994] Rogers A. J., 1994, "High resolution frequency-derived distributed optical fiber sensing", *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors IV*, *Proc. SPIE* 2294, 2 pp.
- [Ross 1982] Ross J.N., 1982, "Birefringence measurement in optical fibers by polarization optical time domain reflectometry", *Appl. Opti.* 21, 3489 pp.
- [Seitz] Seitz, W. Rudolf, 1988, "Chemical sensors based on immobilized indicators and fiber optics", *CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 19 (2), 135-173 pp.
- [Sharma 1984] Sharma A. B., A.H. Al-Ani y S. J. Halme, 1984, "Constant-curvature loss in monomode fibers: an experimental investigation", *Applied Optics*, 23 (19), 3297-3301 pp.
- [Shimizu 1994 A] Shimizu Kaoru, T. Horiguchi, Y. Koyamada, T. Kurashima, 1994, "Coherent Self-Heterodyne Brillouin OTDR for Measurement of Brillouin Frequency Shift Distribution in Optical Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, 12 (5), 730-736 pp.
- [Shimizu 1994 B] Shimizu, K., T. Horiguchi y Y. Koyamada., 1994, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network using Brillouin OTDR", *Optical Fiber Sensor* 10, 142-145 pp.
- [Shimizu 1995] Shimizu K., T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network by use of Brillouin optical time-domain reflectometry", *Opt. Lett.*, 20 (5), 507-509 pp.
- [Shlyagin 1997] Shlyagin M.G., S.V. Miridonov y D. Tentori, Castillo J., 1997, "Twin grating -based interferometric fiber sensor", 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor. In: OSA Technical Digest Series, Vol. 16, 472-474 pp.
- [Shlyagin 1999] Shlyagi, M. G., S. V. Miridonov, D. Tentori, F. J. Mendieta y V. V. Spirin, 1999, "Multiplexing of grating-based fiber sensors using broadband spectral coding," *Proceedings of SPIE* vol. 3541, 271-278 pp.
- [Spammer 1997] Spammer S.S., P. L. Swart y A.A. Chitchebakov, 1997, "Merged Sagnac-Michelson Interferometer for distributed disturbance detection", *Journal of Lightwave Technol.*, 15 (6), 1-4 pp.
- [Spillman 1997] Spillman W.B. Jr, 1997, "Fiber optics and smart structures", *Optical fiber Sensors: Applications, analysis, and future trends* vol. 4, editado por J. Dakin y B. Culshaw, Artech House, Boston, London.
- [Spirin 2000] Spirin V., S. Miridinov, M. Shlyagin, I. Márquez y R.M. López, 2000, "Diferential twin Bragg grating sensor for temperature and strain gradient measurement", *EOS/SPIE International Symposium on Applied Photonics*, Glasgow, Escocia, Reino Unido..
- [Spirin 2002 C] Spirin V. V., R.M. Lopez, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Marquez, E.A. Kuzin, G. Beltran-Perez y Pieter L. Swart, 2002, "Fiber Optic Sensor for Hydrocarbon Leak Detection and Localization", *Smart Structures and Materials 2002: Smart Sensor Technology and Measurement Systems*, *SPIE* 4694, 341-348pp.

- [Spirin 1999 A] Spirin V., I. Márquez, R. López, M. Shlyagin y S. Miridonov, 1999. "Investigación del nuevo sensor químico basado en rejillas de Bragg en fibra óptica", XLII Congreso Nacional de Física 1999.
- [Spirin 1999 B] Spirin V.V., M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, F. J. Mendieta Jiménez, R. M. López Gutiérrez, 1999, "Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection", *Optics and Láser in Engineering*, 32 (5),. 497 – 503 pp.
- [Spirin 2002 A] Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002, "Transmission / reflection analysis for distributed optical fibre loss sensor interrogation", *Electronics Letters*, 38 (3), 117 pp.
- [Spirin 2002 B] Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002, "Alarm-condition detection and localization using Rayleigh scattering for a fiber-optic bending sensor with an unmodulated light source", *Optics Communications*, 205 (1), 37-41 pp.
- [Tai 1987] Tai Hideo, H. Tanaka y Toshihiko Y., 1987, "Fiber optic evanescent-wave methane-gas sensor using optical absorption for the 3.392-  $\mu\text{m}$  line of a He=Ne laser", *Optics Letters*, 12 (6).
- [Tan 1996] Tan Y., T. C. Tan, 1996, "Modeling and sensing characteristics of an amperometric hydrocarbon sensor", *Chemical engineering science*, 51(16), 4001-4011 pp.
- [Tateda 1989] Tateda M. y T. Horiguchi, 1989, "Advances in optical time domain reflectometry", *Journal of Lightwave Technology*, 7 1217-1224 pp.
- [Tesis] Tesis
- [Thévenaz 1998] Thévenaz L., Nikles M., Fellay A., Facchini M. Robert P., 1998, "Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers", *Conference on sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for SSM*, San Diego, Ca., SPIE Vol. 330, 301-314 pp.
- [Tsuji 1995] Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Coherent optical frequency domain reflectometry for a long single-mode optical fiber using a coherent lightwave source and an external phase modulator", *IEEE Photonics Technology Letters* 7, 804-806 pp.
- [Tsuji 1997 A] Tsuji K., Shimizu K., Horiguchi T. y Koyamada Y., 1997, "Spatial-resolution improvement in long-range coherent optical frequency domain reflectometry by frequency-sweep linearisation", *Electronics Letters* 33, 408-410 pp.
- [Tsuji 1997 B] Tsuji, K., Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997, "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave", *Journal of Lightwave Technology* 15, 1102-1109 pp.
- [Tsuji 1997 C] Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997, "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave", *Journal of Lightwave Technology* 15, 1102-1109 pp.
- [Tsuji 1998] Tsuji K. y T. Horiguchi, 1998, "Fading noise reduction for coherent optical frequency domain reflectometer with 30 cm spatial resolution and 15 dB dynamic range", *Optical Fiber Sensor* 13, 584-587 pp.
- [Udd 1991] Udd Eric, 1991, *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, editado por Eric Udd, John Wiley & Sons, New York.
- [Uttam 1985] Uttam D. y B. Culshaw, 1985, "Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using frequency modulated continuous wave ranging technique", *J. Lightwave Technol.*, 3, 971-977 pp.
- [Vivek 1995] Vivek Arya, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1995, "Microbend Losses in Singlemode Optical Fibers: Theoretical and Experimental investigation", *Journal of Lightwave Technology* 13 (10).
- [Von der Weid 1997] Von der Weid J. P., R. Passy, G. Mussi y N. Gisin, "On characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometer", *J. Lightwave Technol.* 15 (7), 1131-1141 pp.
- [Won 2001] Won P.C., L.K Seah y A.K. Asundi, 2001, "FMCW reflectometric optical fiber strain sensor", *Smart Structure and Materials Proc. SPIE* 4328, 54-62 pp.
- [Yariv 1984] Yariv. A. y P. Yen, 1984, *Optical waves in crystals*, John Wiley&Sons.

## Conclusiones y trabajo futuro

Estudiamos teórica y experimentalmente los principios fundamentales para construcción de un sensor de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo basado en el hinchamiento de un polímero.

- ❖ Se estudiaron las propiedades mecánicas de una goma blanca de *butyl*, la cual se utilizó como polímero sensible en el sensor. El polímero en presencia de hidrocarburo se hincha eficientemente y es reversible. El material tiene buenas propiedades de envejecimiento a elevadas temperaturas, buena estabilidad química, resistente al clima, a la luz del sol, ozono, ácidos minerales, solventes oxigenados y a la absorción al agua.
- ❖ La finalidad de estudiar teórica y experimentalmente los mecanismos de sensores, curvaturas y rejillas de Bragg, fueron para probar que las propiedades mecánicas del polímero sirven para ejercer suficiente fuerza en la fibra y lograr un cambio en las propiedades de la luz cuando el polímero está bajo influencia de hidrocarburo. Por otro lado, al lograr el cambio en las propiedades de la luz, se puede utilizar para detección de fugas de hidrocarburo en puntos.
  - El mecanismo de sensor basado en una rejilla como sensor de puntos, se encontró que el corrimiento es significativo más grande que el posible corrimiento debido a variaciones en la temperatura ambiente, la cual es menor que 0.5nm para condiciones ordinarias.
  - De igual manera la estructura de doble rejilla de Bragg como sensor de punto, depende del coeficiente de expansión térmica del polímero, únicamente si este coeficiente es el mismo para el vidrio y el polímero, el sensor será libre de la influencia de temperatura y puede reducir significativamente el tiempo de respuesta para la detección sin falsa alarma.
  - El sensor basado en curvaturas, muestra experimentalmente que la más alta atenuación y rápida respuesta del sensor se tiene cuando se utilizan periodos aproximadamente de 10 mm.

- ❖ La interrogación distribuida del sensor se puede llevar a cabo mediante varias técnicas. Se estudió la técnica C-OFDR.
  - La técnica C-OFDR realiza la interrogación del sensor mediante una detección distribuida con localización de sección de perturbación. Utiliza un sensor propuesto que se compone de elementos sensibles distribuidos y rejillas de Bragg entre ellos, permitiendo detectar gasolina en 8 minutos para 20 cm de longitud de perturbación y con una precisión de localización de 0.5m.
  - Se realizó un cálculo numérico para el análisis de las propiedades en la relación de señal a ruido. Se diseñó para sistemas con reflectores en multipuntos, se encontró una dependencia entre el máximo número posible de elementos sensibles y reflectividad de los elementos concentrados.
- ❖ Una nueva técnica se propone para la interrogación del sensor para localización de la región de pérdidas llamándola Análisis de Transmisión/Reflexión (ATR), desde la única relación entre las potencias transmitida y retrodispersada normalizada para diferentes posiciones de perturbación a lo largo de la fibra.
  - Con la técnica ATR se demostró que se puede localizar una perturbación fuerte con una precisión estimada de  $\pm 1$  m a largo de 2.844km de longitud de fibra monomodo.
- ❖ La técnica C-OFDR es altamente sensible y tiene una resolución espacial alta pero su limitante es la máxima distancia que está fuertemente determinada por la longitud de coherencia de láser. Comparando esta técnica con la técnica presentada en este trabajo ATR, COFDR tiene más alta resolución espacial, sin embargo ATR tiene una ventaja sobre COFDR, su longitud es mayor, es decir se puede utilizar en grandes distancias de fibra,
- ❖ ATR es una propuesta muy atractiva para la eventual realización de un sensor de alarma de fibra óptica para detección de hidrocarburo distribuido de forma compacta y potencialmente a un bajo costo.

#### **Trabajo futuro**

- ❖ Una investigación teórica sobre el comportamiento de la configuración del sensor de pérdidas basado en curvaturas utilizando un polímero. Así como un estudio teórico y experimental sobre un período óptimo para las curvaturas.
- ❖ La técnica COFDR se pueden continuar estudiando y experimentando en los siguientes puntos:

- El análisis de la relación señal a ruido, en el cual se incluyan todas las fuentes de ruido y un modelo teórico mas preciso.
  - Análisis como la polarización afecta a esta técnica y la forma de reducir su influencia.
- ❖ La técnica ATR se pueden continuar estudiando y experimentando en los siguientes puntos:
- Para fibras de plástico tanto monomodo o multimodo, puesto que se puede aumentar la dispersión de Rayleigh y su costo es muy bajo.
  - Para reflectividad diferencial diferentes en distinta localización que propocionan precisión en la localización variable a lo largo de la fibra de prueba.
  - En la localización de perturbaciones multipuntos temporalmente sucesivas.
  - En la localización de perturbaciones que afectan a la fibra de prueba simultaneamente.

Los resultados de mayor relevancia en esta tesis también han sido reportados a lo largo de la investigación principalmente en:

**Revistas:**

R.M. López, V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, **Fiber optic distributed sensor for hydrocarbon leak localization based on transmission / reflection measurement**, Optics & Laser Technology, 34 (6) pp. 465-469 (2002)

R.M. López, V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, **Sensor de Fibra óptica distribuido para localización de fugas de hidrocarburo basado en mediciones de transmisión / reflexión**, Revista Mexicana de Física, 48 (5) pp. 457-462 (2002).

R.M. López, V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, G. Beltrán, E.A.Kuzin, A. Márquez, **Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of bend-based fiber optic hydrocarbon sensors**, *Optical fiber technology*, aceptados (2003).

V.V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, F. J. Mendieta Jiménez, R. M. López Gutiérrez, **Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection**, *Optics and Láser in Engineering*, vol. 32, No. 5, Nov. 1999, pp. 497 – 503.

G. Beltran-Perez, E.A. Kuzin, J. Leon-Baez, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez-Lucero, **Fiber bend losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection**, *Optics communication*, vol 204 (2002), pp. 145-150.

G. Beltran-Perez, E.A. Kuzin, A. Marquez, R. Lopez y Spirin V.V. **Pérdidas por macrocurvaturas en fibras ópticas producidas por materiales suaves y expandibles para la detección de fugas de hidrocarburos**, *Revista Mexicana de Física* 47 (5) Octubre, pp. 421-424.

**Congresos:**

V. V. Spirin, R.M. Lopez, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Marquez, **Fiber Optic Sensor for Hydrocarbon Leak Detection and Localization Based on Transmission/Reflection Analysis**, SPIE's 9<sup>th</sup> Annual International Symposium on Smart Structure and Materials, SPIE 4694 San Diego, Ca., 18-19 Marzo, 2002.

M. G. Shlyagin, I. Marquez Borbon, V. V. Spirin, R. Lopez., E. A. Kuzin, M. M. Alarcon, **Large-scale sensing arrays based on fiber Bragg gratings**, Environmental and Industrial SPIE 4578 Sensing, Newton, Massachusetts, 28 October - 2 Noviembre, 2001.

E.A. Kuzin, G. Beltran-Perez, J. Camas, R. Lopez, V.V. Spirin and A. Marquez, **Fiber losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection**, Fiber Optic Sensor Technology and Applications 2001, SPIE 4578 Newton, USA, 28 Octubre - 2 Noviembre, , 2001.

R.M. López, V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Márquez y A. Márquez, **Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend and macrobend-based fiber optic**

*hydrocarbon sensors*, SPIE's 8<sup>th</sup> Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, SPIE 4328, Newport Beach, Ca., del 4 al 8 de Marzo del 2001.

V. Spirin, S. Miridinov, M. Shlyagin, I. Márquez y R.M. López, *Differential twin Bragg grating sensors for temperature and strain gradient measurement*, EOS/SPIE International Symposium on Applied Photonics, Glasgow, Escocia, Reino Unido, 22-24 Mayo, 2000.

R. López, V. Spirin, S. Miridinov, y M. Shlyagin, *Reflectometría óptica en el dominio de frecuencia para detección de fugas de hidrocarburos utilizando Sensores de fibra Óptica Basado en Microcurvaturas*, XLIII Congreso Nacional de Física 2000, en Puebla, Puebla en Octubre 30 al 4 de Noviembre de 2000.

V. Spirin, I. Márquez, R. López, M. Shlyagin y S. Miridonov, *Investigación del nuevo sensor químico basado en rejillas de Bragg en fibra óptica*, XLII Congreso Nacional de Física 1999, en Villahermosa, Tabasco del 25 al 29 de Octubre de 1999.

VICONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....129

## Literatura citada

- Bao X., J. Dhliwayo, N. Heron, D. J. Webb y D. A. Jackson, 1995, "Experimental and Theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering", *J. Lightwave Technol.*, 13, 1340-1348 pp.
- Allen P. W., 1972, *Natural Rubber and the Synthetics*. New York, Wiley.
- Askins C. G., M.A. Putnam, E. J. Friebele, 1995, "Instrumentation for interrogating many-element fiber Bragg grating arrays", *Proc SPIE* vol. 2444, 257-266 pp.
- Ayra V., K.A. Murphy, A. Wang, R. O. Claus, 1995, *J. Lightwave Technol.* LT-13, 1998 pp.
- Bao X., D. J. Webb y D. A. Jackson, 1994, "Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber", *Optics Lett.*, 19 (2), 141-143 pp.
- M. K. Barnoski y S. M. Jensen, 1976, "Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics", *Appl. Opt.*, 15 (9), 2112-2115 pp.
- Beller J., "OTDRs and Backscatter Measurements", 1998, *Fiber Optic Test and Measurement*, Ed: D. Derickson. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, A. Marquez, R. Lopez y Spirin V.V., 2002, "Pérdidas por macrocurvaturas en fibras ópticas producidas por materiales suestes y expandibles para la detección de fugas de hidrocarburos", *Revista Mexicana de Física* 47 (5), 421-424 pp.
- Beltran-Perez G., E.A. Kuzin, J. Leon-Baez, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez-Lucero, 2002, "Fiber bend losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection", *Optics communication*, 204, 145-150 pp.
- Berthold III J. W., 1995, "Historical Review of microbend Fiber-Optic Sensor", *Journal of Lightwave Technology*, 13 (7), 1193 pp.
- Brehnan B. W., 1988, "Prototype polarimetric based fiber optic strain gauge", *Reviews of progress in quantitative nondestructive evaluation*, Plenum Press, New York, 547 pp.
- Brinkmeyer E., 1980, *Electron. Lett.* 16 (1980), 329 pp.
- Buck J. A., 1995, *Fundamentals of Optical fibers*, Wiley Series in Pure and Applied Optics, New York: Wiley.
- Clark T. y H. Smith, 1995, "Microbend fiber optic sensors", in *Fiber Optic Smart Structures*, editado por E. Udd: John Wiley & Sons, New York.
- Conduit, A. J., D.N. Payne, A. H. Hartog y M. P. Gold, 1981, "Optical fibre diameter variations and their effect on backscatter loss measurement", *Electron. Lett.*, 17, 308-310 pp.
- Culshaw B. 1988, "Optical fiber sensors: principles and components", *Basic concepts of optical fiber sensors 1*, Editado por Culshaw B. y Dakin J.
- Dakin, J. P., D. J. Pratt, G. W. Bibby y J. N. Ross, 1985, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", *Electron. Lett.* 21 (13), 569-570 pp.
- Dakin J. P., D.J. Pratt., G.W. Bibby y J. N. Ross, 1985, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", *Electron. Lett.* 21 (13), 569-570, 1985 pp.
- Dakin J., S. Mackenzie y Hodgkinson J., 1999, "Optical Fiber – Chemical Sensing using direct Espectroscopy", *Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future trends*, Vol. 4, editado por John Dakin and Brain Culshaw.
- Dakin J. P., 1992, "Distributed optical fiber sensors", *Distributed and Multiplexed fiber optic sensors II SPIE 1797*, 76-106 pp.
- Dakin J. y B. Culshaw, 1999, "Optical fiber sensors, Applications, Analysis and future Derickson Dennis, 1998, "Fiber optic Test and Measurement", editado por Derickson Dennis.
- Di Vita, P. y U. Rossi, 1980, "The backscattering technique: its field of applicability in fibre diagnostics and attenuation measurements", *Optical Quantum Electron.*, 11, 17-22pp.
- Eickhoff W. y R. Ulrich, 1981, "Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber", *Appl. Phys. Lett.* 39 (9), 693-695 pp.
- Falco L. y P. Debergh, 1989, "Bimorphous distributed transduce for temperature threshold sensor", *Proc. SPIE* vol. 1011, 166-172 pp.

Ferrel T.L., 1988, "Fiber-Optic Surface-Enhanced Raman System for field Screening of hazardous Compounds", Proc. First International EPA Symposium on Field Screening Methods for Hazardous Waste Site Investigations, Las Vegas, Nev.

Fields J. N., 1980 A, "Pressure sensor", J. Acoust. Soc. Am., 67, 816-818, pp.

Fields J. N., 1980 B, "Attenuation of a parabolic-index fiber with periodic bends", Appl. Phys. Lett., 36, 799-801 pp.

Franklin Hodge, 2002, "Butyl rubber sheeting", Franklin Hodge Industries Limited, U.K.

Froggatt M., B. Childers, J. Moore, T Erdogan, 2002, "High density strain sensing using optical frequency domain reflectometry", 14<sup>th</sup> International Conference on Optical fiber Sensors, Proc. SPIE Vol. 4185, 249-255 pp.

[Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale, 1979, "Curvature and microbending losses in single mode optical fibres", Optical and Quantum Electronics 11, 43-59 pp.

Gambling W. A., H. Matsumura, C. M. Ragdale y R. A. Sammut, 1978, "Measurement of radiation loss in curved singlemode fibers", Microwaves, Opt. Aoust., 2 (4), 134-140 pp.

Garcus Dieter, T. Gogolla, K. Krebber y F. Schliep, 1997, "Brillouin Optical-Fiber Frequency-Domain Analysis for distributed temperature and strain Measurements", Journal of Lightwave Technol. 15 (4), 654-662 pp.

Gareth, Pierce S., Alistar MacLean, Brian Culshaw, 1995, "Optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend based optocar fibre sensors"

Gauthier R. C. y C. Ross, 1997, "Theoretical and experimental consideration for single-mode fiber optic bend-type sensors", Appl. Opt., 36 (25), 6264-6273 pp.

Giles I. P., D. Uttam, B. Culshaw y D. E. N. Davies, 1983, "Coherent Optical-fibre sensors with modulated laser sources", Electronics Letters, 19, 14-15 pp.

**[Grassino B. Susan**

[Grattan 2000] Grattan K.T.V.y T. Sun, 2002, "Fiber Optic sensor technology: an overview", Sensors and Actuators 82, 40-61 pp.

Gysel P. y R.H.Staubli, 1990, "Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fiber", J. Lightwave Technol. 8 (4), 561-567 pp.

Hartog H., 1995, "Distributed fiber optic sensors", en Optical fiber Sensor Technology, editado por K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 347-382 pp.

Healey, 1986, "Instrumentation principles for optical time domain reflectometry", J. Phys. E: Sci Inst., 19, 334-341 pp.

Henderson PJ, N. E. Fisher y D.A. Jackson, "Current metering using fibre-grating based interrogation of a conventional current transformer", Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor, Williamsburg, USA, 186-9, 1997 pp.

Hewlett-Packard company, 1992, "High-speed lighthwave component analysis", Application Note 1550-6

Horiguchi T. y M. Tateda, 1989 A, "Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave", Opt. Lett., 14 (8), 408-410 pp.

Horiguchi T. y M. Tateda, 1989 B, "BOTDA Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory", Journal Lightwave Technol., 7, 1170-1176 pp.

Horiguchi T., K. Shimizu, T. Kurashima, T., M. Tateda y Y. Koyamada, 1990, "Development of distributed sensing technique using Brillouin Scattering", J. of Lightwave Technol., 15 (8), 1038-1040 pp.

Horiguchi T., Shimizu, K., T. Kurashima, M. Tateda y Y. Koyamda, 1995 A, "Development of a Distributed Sensing Technique using Brillouin Scattering", J. Lightwave Techn., 13 (7), 1296-1302 pp.

Horiguchi Tsuneo, 1995 B, "Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering", Journal of Lightwave Technology, 13 (7).

[Hymans A. J. y Lait J., 1960, "Analysis of a frequency modulated continuous wave ranging systems", Proc. IEEE, 107B, 365-372 pp.

IISRP company, 2002, "Butyl rubber", International Institute of Synthetic Rubber, inc.

Jones J.D.C., R. McBride, 1998 A, "Multiplexing optical fiber sensor", Optical Fiber sensor technology, editado por Grattan K. y Meggot B.T., 12, London: Champan & Hall.

Jones S. L., G. Murtaza y J. M. Senior, 1998B, "Single-Mode Optical Fiber Microbend Loss Modeling Using the Finite Difference Beam Propagation Method", *Optical Fiber Technol.* 4 pp. 471-479.

Kashyap Raman, 1999, "Fiber Bragg gratings", *Optics and Photonics*, Academic Press.

Kersey A. D., 1996, "A review of recent developments in fiber optic sensor technology", *Optical fiber technology*, 291-317 pp.

Kersey A. D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M, Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J., 1997, "Fiber grating sensors", *J. Lighthwave Technol.* 15 (8), 14442-63 pp.

Kersey Alan D., 1997 B, "Optical fiber sensors", *Optical measurement and applications*, editado por Pramod K. Rastogi, Artech House, Boston, 217-254 pp.

Kurashima T., T. Horiguchi y M. Tateda, 1990, "Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers", *Opt. Lett.*, 15 ( 8), 1038-1040 pp.

Kuzin E.A., G. Beltran-Perez, J. Camas, R. Lopez, V.V. Spirin y A. Marquez, 2001, "Fiber losses produced by soft and swellable materials for hydrocarbon detection", *Fiber Optic Sensor Technology and Applications*, Newton, USA.

Kvasnik y McGrath A. D., 1989, "Distributed chemical sensing utilising evanescent wave interactions", *Chemical, Biomedical and Enviromental Sensors*, SPIE 1172, 75-82 pp.

Lecoche V., D. J. Webb, C.N. Pannell y D. A. Jackson, 1999, "25 km Brillouin based single-ended distributed fibre sensor for threshold detection of temperature or strain", *Optics communications*, 168, 95-102 pp.

Liaw S.K., S.L. Tzeng, y J. Hung, 2001, "Rayleigh backscattering induced power penalty on bidirectional wavelength-reuse fiber systems", *Opt. Comm.* 188, 63-67 pp..

Lise Anderson Betty, 1995, "New approach to microbending fiber optic sensors: varying the spatial frequency", *Optical Engineering*, 34 (1), 208-213 pp.

López R.M., V. Spirin, S. Miridinov, y M. Shlyagin, 2000, "Reflectometria optica en el dominio de frecuencia para deteccion de fugas de hidrocarburos utilizando Sensores de fibra Óptica Basado en Microcurvaturas", *XLIII Congreso Nacional de Física 2000*.

López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Márquez y A. Márquez, 2001, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of microbend and macrobend-based fiber optic hydrocarbon sensors", *Proc. SPIE* vol. 4328, 114-121 pp.

López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, 2002 A, "Fiber optic distributed sensor for hydrocarbon leak localization based on transmission / reflection measurement", *Optics & Laser Technology*, 34 (6), 465-469 pp.

López R.M., V. V. Spirin, S.V. Miridonov, M.G. Shlyagin, G. Beltrán, E.A.Kuzin, 2002 B, "Sensor de Fibra óptica distribuido para localización de fugas de hidrocarburo basado en mediciones de transmisión / reflexión", *Revista Mexicana de Física*, 48 (5), 457-462 pp.

López R.M., V. V. Spirin, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, G. Beltrán, E.A.Kuzin, A. Márquez, 2003, "Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of bend-based fiber optic hydrocarbon sensors", *Optical fiber technology*, aceptados.

MacDonald R. I., 1981, "Frequency domain optical reflectometer", *Applied Optics*. 20 (10), 1840-1844 pp.

MacDonald R. I. y B. E. Swekla, 1990, "Frequency domain optical reflectometer using a GaAs optoelectronic mixer", *Applied Optics* 29 (31), 4578-4582 pp.

MacLean, C. Moran, G. Thursby, S. G. Pierce, B. Culshaw, N.B. Graham, 2000 A, "Distributed Fibre Optic Sensors for Humidity and Hydrocarbon detection, *Smart Structure and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation*, SPIE vol. 3986, 342-351 pp.

MacLean, C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw, D. Marsh, V. Watson y Geoff Andrews, 2000 B, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", *14<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors*, SPIE Vol. 4185, 382-385 pp.

MacLean A., C. Moran, W. Johnstone, B. Culshaw y D. Marsh, 2000 C, "A Distributed Fibre Optic Sensors for Hydrocarbon detection", *Smart Structure and Materials*, SPIE vol. 4328, 47-53 pp.

Marcuse D., 1976 A, "Curvature loss formula for optical fibers", *J. Opt. Soc. Am.*, 66 (3), 216-220 pp.

Marcuse D., 1976 B, "Microbending losses of single mode, step-index and multimode, parabolic-index fibers", *Bell systems Techn. Journal* 55, 937-955 pp.

Michie W. C., B. Culshaw, I. Mckenzie, M. Konstantakis, N. B. Graham, C. Moran, F. Santos, E. Bergqvist, B. Carlstrom, 1995 A, "Distributed sensor for water and pH measurements using fiber optics and swellable polymeric systems", *Optics Letters* 20 (1), 103 pp.

Michie W. C., B. Culshaw, M. Konstantakis, I. Mckenzie, S. Kelly, N. B. Graham, C. Moran, 1995 B, "Distributed pH and water detection using fiber-optic sensors and hydrogels", *J. Lightwave Technol.* 13 (7), 1415 pp.

Miridonov S.V., M.G. Shlyagin, D. Tentori, 2001, "Twin-grating fiber optic sensor demodulation", *Optics Communications* 191, 253-262 pp.

Mitchell G.L.", 1991, "Intensity-based and Fabry-Perot interferometer sensors", *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, John Wiley & Sons, New York.

Morey, W. W., J. R. Dunphy y G. Meltz, 1991, "Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensor", *Distributed and Multiplexing Fiber-optic Sensor Proc. SPIE* 1586, 216 pp.

Morton M., 1987, *Rubber Technology*, New York: Von Nostrand Reinhold Co., edición 3era.

Murtaza G., S.L. Jones, J.M. Senior y N. Haigh, 2001, "Loss Behavior of single-mode Optical Fiber Microbend Sensors", *Fiber and Integrated Optics*, 20, 53-58 pp.

Mussi G. y P. Stamp, 1996, "Polarization effects in C-OFDR", *IEEE Photonics Tech. Letter*, 8 (11), 1513-1515 pp.

Nasta M. N., V. Ayra, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1994, "Periodic microbending on single mode optical fibres for multiplexed sensing", *Proc. SPIE, Smart Structures and Materials*, 2191, 475-481 pp.

Nelson D. F., 1977, "Vibration-induced modulation of fiberoptic transmission", *Proc. Topical Meet. on Optical Fiber Transmission TU-E7-1 a TU-E7-4*.

Ning Y. N. y K.T.V. Grattan, 1998, "Optical Fiber Sensor technology: Devices and Technology vol. 2", editado por K.T.V. Grattan y B.T. Meggitt, Chapman & Hall, London, 1998

Nolan D.A., P.E. Blaszyk y E. Udd., 1991., "Optical fibers", *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, John Wiley & Sons, New York.

Ohno H., H. Naruse, M. Kihara y A. Shimada, 2001, "Industrial Applications of the BOTDR optical fiber Strain Sensor", *Optical fiber technology* 7, 45-64 pp.

Pacheco M., F.M. Santoyo, L. A. Zenteno, 1999, "Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg gratin high-voltage sensor", *Measurement Science Technol.* 10 (9), 777 pp.

Passy R., N. Gisin, J. P. von der Weid y H. H. Gilgen, 1994, "Experimental and theoretical investigation of coherent OFDR with semiconductor laser sources", *Journal of Lightwave Technology* 12, 1622-1630 pp.

Peng Y.T., Y. Tang y J.S. Sirkis, 1999, "The characterization of hydrogen sensor based on palladium electroplated fiber Bragg gratings (FBG)", *Proc. SPIE* 3670, 42-53 pp.

Peterson J. I., S. R. Goldstein, Fitzgerald R. V. y D. K. Buckhold, 1980, "Fiber optic pH probe for physiological use", *Anal. Chem.*, 52, 864 pp.

Probst C. B., A. Bjarklev y S.B. Andreassen, 1989, "Experimental verification of microbending theory using mode coupling to discrete cladding modes", *J. Lightwave Technol.* 7 (1), 55-61 pp.

Rabiner L.R. y B. G. Gold, 1975, "Theory and application of digital signal processing", Prentice-Hall, INC.

Rao Y., 1999, "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors". *Opt. Lasers Eng.*, 31, 297-324 pp.

Roger, A.J., 1980, "Polarization optical time domain reflectometry", *Electron. Lett.* 16, 489 pp.

Roger A.J., 2002 "Distributed fibre measurement using backscatter polarimetry"

Rogers A. J., 1994, "High resolution frequency-derived distributed optical fiber sensing", *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors IV, Proc. SPIE* 2294, 2 pp.

Ross J.N., 1982, "Birefringence measurement in optical fibers by polarization optical time domain reflectometry", *Appl. Opti.* 21, 3489 pp.

Seitz, W. Rudolf, 1988, "Chemical sensors based on immobilized indicators and fiber optics", *CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 19 (2), 135-173 pp.

Sharma A. B., A.H. Al-Ani y S. J. Halme, 1984, "Constant-curvature loss in monomode fibers: an experimental investigation", *Applied Optics*, 23 (19), 3297-3301 pp.

Shimizu Kaoru, T. Horiguchi, Y. Koyamada, T. Kurashima, 1994 A, "Coherent Self-Heterodyne Brillouin OTDR for Measurement of Brillouin Frequency Shift Distribution in Optical Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, 12 (5), 730-736 pp.

Shimizu, K., T. Horiguchi y Y. Koyamada., 1994 B, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network using Brillouin OTDR", *Optical Fiber Sensor* 10, 142-145 pp.

Shimizu K., T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network by use of Brillouin optical time-domain reflectometry", *Opt. Lett.*, 20 (5), 507-509 pp.

Shlyagin M.G., S.V. Miridonov y D. Tentori, Castillo J., 1997, "Twin grating –based interferometric fiber sensor", 12<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor. In: OSA Technical Digest Series, Vol. 16, 472-474 pp.

Shlyagi, M. G., S. V. Miridonov, D. Tentori, F. J. Mendieta y V. V. Spirin, 1999, "Multiplexing of grating-based fiber sensors using broadband spectral coding," *Proceedings of SPIE* vol. 3541, 271-278 pp.

Spammer S.S., P. L. Swart y A.A. Chitchebakov, 1997, "Merged Sagnac-Michelson Interferometer for distributed disturbance detection", *Journal of Lightwave Technol.*, 15 (6), 1-4 pp.

Spillman W.B. Jr, 1997, "Fiber optics and smart structures". *Optical fiber Sensors: Applications, analysis, and future trends* vol. 4, editado por J. Dakin y B. Culshaw, Artech House, Boston, London.

Spirin V., S. Miridonov, M. Shlyagin, I. Márquez y R.M. López, 2000, "Diferencial twin Bragg grating sensor for temperature and strain gradient measurement", *EOS/SPIE International Symposium on Applied Photonics*, Glasgow, Escocia, Reino Unido.

Spirin V. V., R.M. Lopez, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, I. Marquez, E.A. Kuzin, G. Beltran-Perez y Pieter L. Swart, 2002 C, "Fiber Optic Sensor for Hydrocarbon Leak Detection and Localization", *Smart Structures and Materials 2002: Smart Sensor Technology and Measurement Systems*, SPIE 4694, 341-348pp.

Spirin V., I. Márquez, R. López, M. Shlyagin y S. Miridonov, 1999 A, "Investigación del nuevo sensor químico basado en rejillas de Bragg en fibra óptica", *XLII Congreso Nacional de Física 1999*.

Spirin V.V., M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, F. J. Mendieta Jiménez, R. M. López Gutiérrez, 1999 B, "Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection", *Optics and Láser in Engineering*, 32 (5), 497 – 503 pp.

Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002 A, "Transmission / reflection analysis for distributed optical fibre loss sensor interrogation", *Electronics Letters*, 38 (3), 117 pp.

Spirin V.V., M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov y P. L. Swart, 2002 B, "Alarm-condition detection and localization using Rayleigh scattering for a fiber-optic bending sensor with an unmodulated light source", *Optics Communications*, 205 (1), 37-41 pp.

Tai Hideo, H. Tanaka y Toshihiko Y., 1997, "Fiber optic evanescent-wave methane-gas sensor using optical absorption for the 3.392-  $\mu\text{m}$  line of a He=Ne laser", *Optics Letters*, 12 (6).

Tan Y., T. C. Tan, 1996, "Modeling and sensing characteristics of an amperometric hydrocarbon sensor", *Chemical engineering science*, 51(16), 4001-4011 pp.

Tateda M. y T. Horiguchi, 1989, "Advances in optical time domain reflectometry", *Journal of Lightwave Technology*, 7 1217-1224 pp.

Tesis

Thévenaz L., Nikles M., Fellay A., Facchini M. Robert P., 1998, "Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers", *Conference on sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for SSM*, San Diego, Ca., SPIE Vol. 330, 301-314 pp.

Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1995, "Coherent optical frequency domain reflectometry for a long single-mode optical fiber using a coherent lightwave source and an external phase modulator", *IEEE Photonics Technology Letters* 7, 804-806 pp.

Tsuji K., Shimizu K., Horiguchi T. y Koyamada Y., 1997 A, "Spatial-resolution improvement in long-range coherent optical frequency domain reflectometry by frequency-sweep linearisation", *Electronics Letters* 33, 408-410 pp.

Tsuji, K., Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997 B, "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave", *Journal of Lightwave Technology* 15, 1102-1109 pp.

Tsuji K., K. Shimizu, T. Horiguchi y Y. Koyamada, 1997 C, "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwave", *Journal of Lightwave Technology* 15, 1102-1109 pp.

Tsuji K. y T. Horiguchi, 1998, "Fading noise reduction for coherent optical frequency domain reflectometer with 30 cm spatial resolution and 15 dB dynamic range", *Optical Fiber Sensor* 13, 584-587 pp.

Udd Eric, 1991, *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers & Scientists*, editado por Eric Udd, John Wiley & Sons, New York.

Uttam D. y B. Culshaw, 1985, "Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using frequency modulated continuous wave ranging technique", *J. Lightwave Technol.*, 3, 971-977 pp.

Vivek Arya, K. A. Murphy, A. Wang y R. O. Claus, 1995, "Microbend Losses in Singlemode Optical Fibers: Theoretical and Experimental investigation", *Journal of Lightwave Technology* 13 (10).

Von der Weid J. P., R. Passy, G. Mussi y N. Gisin, "On characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometer", *J. Lightwave Technol.* 15 (7), 1131-1141 pp.

Won P.C., L.K Seah y A.K. Asundi, 2001, "FMCW reflectometric optical fiber strain sensor", *Smart Structure and Materials Proc. SPIE* 4328, 54-62 pp.

Yariv. A. y P. Yen, 1984, *Optical waves in crystals*, John Wiley&Sons.

Los esquemas multicanalizados para sensores de fibra óptica son una de las características prometedoras con un mayor beneficio sobre los dispositivos convencionales. La multicanalización de sensores ofrece la posibilidad del uso de una fuente y sistema de detección común y una de las ventajas de los sistemas de fibra óptica es el hecho que algunos sensores multicanalizados se pueden alcanzar en una manera relativamente directa. Los tres arreglos importantes más utilizados para la multicanalización son por división de longitud de onda (WDM *wavelength division multiplexing*), división de tiempo (TDM, *time division multiplexing*) y división de frecuencia (FDM, *frequency division multiplexing*).

Para extender el número de sensores de una red simple es posible realizar varias combinaciones de estas técnicas. Estas técnicas se aplican generalmente a una variedad de diferentes sensores de punto, más recientemente se han asociados cercanamente con rejillas de Bragg o a sistemas interferométricos donde los esquemas de multicanalización son tales que un gran número de sensores se pueden utilizar. La multicanalización es muy importante en los sistemas de sensores de fibra óptica para reducir el costo y maximizar el impacto del proceso de medición. En cuanto al procesamiento de señal, viene a ser más complejo, sin embargo, hay ventajas significativas en crear estos sistemas para una variedad de aplicaciones de sensores.

Las mediciones distribuidas sobre estructuras extendidas son utilizadas, por ejemplo, en mediciones de tensión distribuida en operaciones de aviones cerca de los límites de diseño, fugas de algún solvente, la distribución de temperatura en calentadores o presión en una nave y en transformadores de alto voltaje. Las mediciones distribuidas operan mediante reflectometría óptica. Las fibras ópticas, toman ventaja de su susceptibilidad a efectos lineales y no lineales que sostienen, ofreciendo ventajas únicas para sensado distribuido.

En este capítulo se presentan dos de las más imperantes formas de interrogar un sensor, ellas son mediante reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR, *optical time domain reflectometer*) y reflectometría óptica coherente en el dominio de la frecuencia (COFDR, *coherent optical frequency domain reflectometer*) y una nueva técnica basada en el análisis de transmisión / reflexión de la potencia (TRA, *Transmission / Reflection Analysis*). Las aportaciones obtenidas utilizando COFDR fueron publicadas<sup>1</sup>, de igual manera las aportaciones obtenidas con la nueva técnica presentada fueron igualmente publicadas<sup>2</sup>.

---