



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

ARREGLO DE SENSORES BASADOS EN FIBRA ÓPTICA PARA EL
MONITOREO DE DAÑO ESTRUCTURAL

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
SANTA JUNNUEN MIRÓN CARRASCO

TUTOR PRINCIPAL
DR. SERGIY KHOTYAINTEV

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. AGOSTO 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Qureshi Naser
Secretario: Dr. Martynyuk Oleksandr
Vocal: Dr. Khotyaintsev Sergiy
1^{er}. Suplente: Dra. Mejía Uriarte Elsi Violeta
2^do. Suplente: Dr. Kolokoltsev Flatov Oleg V.

Lugar donde se realizó la tesis:

Ciudad de México, Facultad de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. KHOTYAINTEV SERGIY

FIRMA

RESUMEN

En el presente trabajo se investiga las vías de implementación práctica eficiente de los arreglos de sensores binarios de tipo intensidad basados en fibra óptica y respectivos sistemas óptico-electrónicos de monitoreo de las señales de dichos arreglos (los “Interrogadores”). Se desarrollaron algunas variantes del interrogador que opera en Multiplexación por División de Tiempo, con 16 transmisores y 1 receptor, y es capaz de realizar la interrogación de los arreglos de hasta 16 sensores. Las fuentes ópticas del sistema son LEDs infrarrojo. El interrogador tiene un bajo consumo de potencia lo que hace posible el funcionamiento autónomo de todo el sistema.

Dicho interrogador fue utilizado en una aplicación novedosa práctica: El monitoreo de la integridad estructural de una pila de tabique en un ensayo de carga por compresión. A la superficie de dicha pila de tabique fueron adheridas varias fibras ópticas, fungiendo como sus “nervios”. La intensidad de una forma de onda pulsátil transmitida por las fibras ópticas fue monitoreada con el interrogador y los datos obtenidos se almacenaron en una computadora mediante un DAQ. Se obtuvo una relación entre la variación de la intensidad de la señal óptica en las fibras y la aparición y ensanchamiento de grietas en la pila de tabique bajo carga.

Además, se consideró la utilización del mismo interrogador en el caso de arreglos de los sensores refractométricos de tipo intensidad, para la medición de niveles de líquidos en tanques y recipientes. El enfoque fue sobre la medición de nivel de helio líquido, que actualmente tiene aplicaciones importantes. Sin embargo distinguir ópticamente entre el helio líquido y el aire es difícil en virtud de su bajo índice de refracción cercano al del aire. Se realizó el diseño y la optimización de dicho sensor empleando un software de simulación basado en el método de trazado de rayos. Se logró una variación en la señal de salida de 4.25 dB suficiente para distinguir entre el helio líquido y el medio gaseoso sobre él, y suficiente para que el interrogador pueda trabajar con el arreglo de sensores.

Los resultados del presente trabajo abren el camino para nuevas y eficaces aplicaciones de las fibras ópticas en el monitoreo de salud de estructuras, mediciones de nivel de líquidos (en particular, líquidos criogénicos como helio líquido) y potencialmente en otros escenarios reales.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Martha Carrasco y Ronaldo Mirón, por su esfuerzo, trabajo y dedicación hacia conmigo. Porque siempre me han brindado su apoyo incondicional, su inmenso amor y su plena confianza; me han dado el mejor ejemplo e inculcado valores que me han ayudado a lo largo de mi vida; me han alentado a perseguir mis sueños y brindado la inspiración para lograrlos, creyendo siempre en mí; pero lo más grande que me han dado es el honor de ser su hija. Gracias, sin ustedes no sería hoy la persona que soy. No habría logrado terminar la maestría, que es la mejor herencia que pudieron darme.

Dios no pudo darme unos mejores padres, una mujer que sabe guiar y un hombre que siempre demuestra y contagia su alegría de vivir. Espero que estén tan orgullosos de mí como yo lo estoy de ustedes. Les dedico este logro como una más de mis metas. Los amo.

A mi hermano, Sai Mirón, porque a pesar de que somos polos opuestas en ciertas cuestiones siempre estás ahí para apoyarme y brindarme tu cariño.

A mi familia, por siempre estar al pendiente de mí, de mi avance en los estudios y por animarme a siempre superarme. En especial a mi abuelita Guadalupe Alcántara por sus oraciones, consejos y todas sus anécdotas.

A mi novio y amigo, Luis Enrique Hernández, por siempre creer en mí y apoyarme incondicionalmente durante todo este tiempo, en el cual has sabido comprenderme y ayudarme. Por motivarme día a día a alcanzar mis sueños, dándome un ejemplo claro de superación. Gracias por el amor y la felicidad brindada, tú has sido partícipe de este gran logro.

Al Dr. Sergiy Khotyaintsev por depositar su confianza en mí, por su completo apoyo, por su tiempo, paciencia y dedicación constante en la dirección de éste trabajo, compartiendo en todo momento sus conocimientos.

A mis amigos, Diego Silva y Luis Hernández, quienes hicieron más amena la maestría con sus pláticas y múltiples ocurrencias durante la comida. Gracias también por brindarme su ayuda cuando la requería y compartir sus conocimientos conmigo.

A mi amiga Dulce Camargo, por su cariño y esas pláticas interminables en donde planeábamos nuestras vidas y nos visualizábamos cumpliendo nuestras metas.

A mis compañeros de laboratorio Carmen, Ricardo y Juan por sus asesorías.

A mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, y a la Facultad de Ingeniería, por acogerme, instruirme y formarme íntegramente como profesional de las telecomunicaciones. Permitiéndome cumplir el sueño de estudiar y egresar de la máxima casa de estudios de América Latina.

A la DGAPA –PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma de proyecto de innovación tecnológica “Implementación de un nuevo método de monitoreo del comportamiento de estructuras hasta su falla de elementos de concreto y materiales compuestos, con arreglos de fibras ópticas” con número de referencia IT102515.

A la DGAPA-PAPIME de la UNAM por el apoyo en forma de proyecto “Nuevas prácticas de laboratorio con actividades y experimentos virtuales y reales para el mejoramiento de la enseñanza y aprendizaje” en dos asignaturas de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, con número de referencia PE101616.

Al Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el apoyo en forma de proyecto conjunto "Sistemas de Detección Temprano de Riesgos en Edificios Históricos"

A el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Coordinación de Estudios de Posgrado (CEP), por las becas proporcionadas respectivamente.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes	1
Objetivo general.....	2
Objetivos particulares	2
Metodología.....	3
1 CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica ..	4
1.1 Introducción	4
1.2 Conservación de edificios históricos: estado actual	4
1.2.1 El problema de conservación de edificios históricos	4
1.2.2 Las singularidades geológicas y sísmicas del Valle de México	5
1.3 Sensores de fibra óptica: conceptos principales.....	6
1.4 Sensores de fibra óptica en el monitoreo de daño estructural	10
1.5 Las fibras ópticas como detectores de daño estructural en los elementos de concreto .	11
1.6 Conclusiones.....	13
Referencias.....	13
2 CAPITULO 2. Propuesta conceptual de un sistema de monitoreo de elementos de mampostería de tabique en edificios históricos, basado en “nervios” de fibra óptica	17
2.1 Introducción	17
2.2 Configuración general del sistema y justificación de sus parámetros	17
2.2.1 Justificación de los parámetros del sistema de monitoreo.....	17
2.2.2 Configuración del sistema de monitoreo	18
2.3 Conclusiones.....	19
3 CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.....	21
3.1 Introducción	21
3.2 Implementación del sistema de monitoreo	21
3.3 Descripción del sistema desarrollado y sus elementos.....	23
3.4 Funcionamiento del sistema	24

3.5	Diseño del transmisor óptico	25
3.5.1	Generador de pulsos	25
3.5.2	Circuito inversor	28
3.5.3	Diseño del sistema TDM.....	30
3.5.4	Pre-amplificador: Acoplamiento de impedancias del multiplexor analógico con el amplificador de corriente.....	35
3.5.5	Amplificador de corriente de LED	38
3.5.6	Diagrama eléctrico del transmisor óptico	44
3.5.7	Medición del consumo de corriente	47
3.6	Diseño del receptor óptico.....	48
3.6.1	Detector óptico	48
3.6.2	Amplificador	54
3.7	Conclusiones.....	55
	Referencias.....	56
4	CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique.....	58
4.1	Técnica de detección de daño.....	58
4.2	Espécimen bajo prueba.....	58
4.3	Arreglo de fibra óptica	60
	MM-S105/125	60
4.4	Fibras ópticas.....	61
4.5	Interrogador opto-electrónico	62
4.6	Experimento	65
4.6.1	Ensayo de carga de compresión.....	65
4.6.2	Comportamiento observado en las fibras ópticas durante el ensayo	67
4.7	Discusión	74
4.8	Conclusiones.....	75
	Referencias.....	76

5	CAPITULO 5. Perspectiva de monitoreo de nivel de helio líquido en tanques y recipientes con sensores refractométricos de fibras ópticas	77
5.1	Introducción	77
5.2	El helio líquido, sus singularidades y aplicaciones	78
5.3	La refractometría.....	79
5.4	Sensores refractométricos de fibra óptica	82
5.5	Conclusiones.....	85
	Referencias.....	85
6	CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido	87
6.1	Configuración y funcionamiento del sensor	87
6.2	Metodología de análisis teórico	90
6.3	Parámetros óptimos encontrados y comparación de los resultados.....	98
6.4	Conclusiones.....	100
	Referencias.....	101
	CONCLUSIONES GENERALES	102
	ANEXO A.....	104
	ANEXO B.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema general de un sensor de fibra óptica	7
Figura 1.2 Sensor de fibra óptica extrínseco	8
Figura 1.3 Sensor de fibra óptica intrínseco.....	8
Figura 1.4 Sensor de desplazamiento basado en el efecto de doblado de la fibra óptica.....	9
Figura 1.5 Ejemplo del funcionamiento del sensor de daño estructural	9
Figura 2.1 Diagrama a bloques del primer diseño del sistema óptico (TDM 16X1).....	19
Figura 3.1 Diagrama a bloques del sistema opto-electrónico (TDM 16X1).....	24
Figura 3.2 Circuito para colocar el NE555 en su configuración astable	26
Figura 3.3 Implementación del generador de pulsos con valores nominales.....	27
Figura 3.4 Forma de onda experimental del generador de pulsos	28
Figura 3.5 Circuito amplificador inversor basado en transistor TBJ (BC548B).....	29
Figura 3.6 Formas de onda en el inversor basado en un transistor TBJ.....	30
Figura 3.7 Descripción gráfica del divisor de frecuencias con JK Flip-Flop. Distribución de terminales del 74LS73	32
Figura 3.8 Formas de onda del divisor de frecuencias obtenidas experimentalmente	32
Figura 3.9 Especificaciones del contador binario de 4 bits (74LS163)	33
Figura 3.10 Distribución de terminales del CD4067BE, demultiplexor analógico.....	34
Figura 3.11 Formas de onda a la entrada y salida del multiplexor analógico	34
Figura 3.12 Cuatro canales del sistema TDM	35
Figura 3.13 Circuito seguidor emisor empleado para el pre-amplificador	36
Figura 3.14 Formas de onda en el demultiplexor y pre-amplificador.....	37
Figura 3.15 Diagrama de conexiones del transistor Darlington NPN (TIP102)	39
Figura 3.16 Circuito amplificador de corriente basado en transistor Darlington NPN (TIP102)	39
Figura 3.17 (a)Nuevo trazo del lado de entrada de la red de la figura 3.16 (b)Determinación de R_{TH} (c)Determinación de E_{TH} (d)Inserción del circuito equivalente de Thévenin	41
Figura 3.18 Diagrama eléctrico de la conexión del demultiplexor, el pre-amplificador y el amplificador de corriente.....	43
Figura 3.19 Formas de onda presentes en un canal del transmisor	43
Figura 3.20 Diagrama eléctrico del Transmisor óptico, implementando un canal TDM.....	46
Figura 3.21 Diagrama de estados del trasmisor óptico.....	47
Figura 3.22 Funcionamiento de un fotodiodo p-n: (a) fotogeneración de un par electrón-hueco en un semiconductor intrínseco; (b) estructura de la unión p-n con polarización inversa ilustrando el desplazamiento de un portador en la región de agotamiento; (c) diagrama de la banda de energía	

de la unión p-n polarizada en inversa mostrando la fotogeneración y la separación subsecuente de un par electrón-hueco.....	51
Figura 3.23 Simbología de un Fotodiodo	52
Figura 3.24 Grafica del comportamiento de un fototransistor	53
Figura 3.25 Simbología del fototransistor	53
Figura 3.26 Circuito amplificador en el receptor	55
Figura 4.1 Pila de tabique instrumentada con las fibras ópticas: (a) Esquemático; (b) Fotografía	59
Figura 4.2 Transportación de la pila de tabique a la máquina de carga	59
Figura 4.3 Pila de tabique instalada en el marco de prueba de la máquina de carga.....	60
Figura 4.4 Estructura general de las fibras ópticas empleadas en el experimento	61
Figura 4.5 Esquema del sistema de monitoreo opto-electrónico: (1) Fibra óptica; (2) Muestra de ensayo; (3) Grupo de 12 cables de fibra óptica; Tx - transmisor óptico, 12 canales; Rx - receptor óptico; DAQ - Módulo de adquisición de datos (convertidor analógico/digital, 16 canales); CPU- unidad de procesamiento central para almacenar la transmisión óptica medida en forma digital	63
Figura 4.6 Diagrama de bloques del interrogador de 16 canales para la monitorización continua de la transmisión óptica de las fibras ópticas del arreglo: (1) generador de forma de onda sinusoidal; (2) amplificador de potencia; (3) LED; (4) acoplador; (5) fibra óptica; (6) elemento estructural bajo prueba; (7) fototransistor; (8) amplificador de transimpedancia; (9) comparador de voltaje; (10) display; (11) DAQ de 16 canales; (12) CPU.....	64
Figura 4.7 (a) Interrogadores opto-electrónicos para el monitoreo continuo de la transmisión óptica de las fibras ópticas del arreglo montado sobre el espécimen de prueba; (b) Conexión de las fibras ópticas al sistema de monitoreo opto-electrónico	65
Figura 4.8 Sensores de desplazamiento eléctrico montados en la cara posterior (a) de la muestra de prueba y en la cara frontal (b).....	66
Figura 4.9 Máquina de carga universal con el espécimen de prueba y el interrogador opto-electrónico para la detección de daños estructurales	66
Figura 4.10 Variación de la carga de compresión Vs el tiempo durante la prueba	67
Figura 4.11 Deformación vertical de la muestra de ensayo en función del tiempo	68
Figura 4.12 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A, montada en el espécimen en el nivel 1 en función del tiempo, t	69
Figura 4.13 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A, montada en el espécimen en el nivel 2 en función del tiempo, t	69
Figura 4.14 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A, montada en el espécimen en el nivel 3 en función del tiempo, t	70
Figura 4.15 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A, montada en el espécimen en el nivel 4 en función del tiempo, t	70

Figura 4.16 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A, montada en el espécimen en el nivel 5 en función del tiempo, t	71
Figura 4.17 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A, montada en el espécimen en el nivel 6 en función del tiempo, t	71
Figura 4.18 Fibras ópticas rotas en las proximidades de grietas estructurales: a) Fibras ópticas completamente rotas; (b) Fibras ópticas con núcleos de sílice rotos dentro de revestimientos elásticos tensos pero intactos.	72
Figura 4.19 Distribución de las fibras ópticas fracturadas Vs. el ancho de fisura en la muestra de pila de ladrillos después de completar la prueba de carga de compresión.....	73
Figura 5.1 Propuesta conceptual del arreglo de sensores para la medición de nivel de helio líquido. (1) Interrogador opto-electrónico, (2) Fibra óptica, (3) Sensor refractométrico, (4) Contenedor (dewar)	78
Figura 5.2 Descripción gráfica del ángulo de Brewster	81
Figura 6.1 Configuración del sensor refractométrico	87
Figura 6.2 Dimensiones del sensor refractométrico	89
Figura 6.3 Interfaz del software SRFO, empleado para simular el trazado de rayos	91
Figura 6.4 Ejemplo de simulación de trazado de rayos con parámetros específicos.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Especificaciones de las fibras ópticas empleadas en el experimento	60
Tabla 6.1 Sensibilidad en los puntos de interés para la variación del diámetro adimensional, d_{94}	
Tabla 6.2 Sensibilidad en los puntos de interés para la variación de la apertura numérica, NA	95
Tabla 6.3 Sensibilidad en los puntos de interés para la variación de Λ	96
Tabla 6.4 Sensibilidad en los puntos de interés para la variación de Λ	97
Tabla 6.5 Sensibilidad presentada en la combinación de los parámetros con mejor respuesta	99
Tabla 6.6 Comparación de sensibilidad para los conjuntos de parámetros óptimos	100

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 6.1 Resultados gráficos de la variación del diámetro adimensional, d	94
Gráfica 6.2 Resultados gráficos de la variación de la apertura numérica, NA	95
Gráfica 6.3 Resultados gráficos de la variación de la distancia adimensional, Λ	96
Gráfica 6.4 Resultados gráficos de la variación fina de la distancia adimensional, Λ	97
Gráfica 6.5 Transmitancia relativa, resultado de la combinación de los parámetros con mejor respuesta.....	98
Gráfica 6.6 Comparación de la transmitancia entre el conjunto de parámetros óptimos	99

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La fibra óptica revolucionó la industria de las telecomunicaciones, proporcionando un mayor rendimiento y enlaces de telecomunicaciones más fiables con una disminución del costo de ancho de banda.

Paralelamente a estos desarrollos, la tecnología de sensores de fibra óptica ha aprovechado de la tecnología asociada a la industria de la optoelectrónica y comunicaciones de fibra óptica. Y dado que los precios de los componentes se han reducido y las mejoras de calidad se han hecho, los sensores de fibra óptica han ido desplazando a los sensores tradicionales para medir diversos parámetros físicos tales como la temperatura, presión, vibración, viscosidad, índice de refracción de líquidos y otros.

Los sensores de fibra óptica presentan múltiples ventajas frente a los sensores eléctricos, algunas de ellas son:

- Inmunidad intrínseca a la interferencia electromagnética.
- Baja conductividad térmica.
- Capacidad de operar a bajas y altas temperaturas.
- Ausencia de conductividad eléctrica.
- Alta resistencia a la corrosión química.
- Seguridad contra riesgos de fuego o explosión.
- Alta sensibilidad.
- Tamaño pequeño.

Los sensores de fibra óptica de tipo intensidad son relativamente sencillos y económicos en comparación con los sensores de otros tipos y por esto tienen mayores y mejores perspectivas de su uso práctico de forma masiva.

Hay una variedad de aplicaciones en donde es atractivo utilizar los conjuntos grandes de los sensores de tipo intensidad en forma de arreglos o redes con la finalidad de conocer la cantidad física de interés en múltiples puntos de un objeto o un área.

Sin embargo, los sensores basados en fibra óptica y los arreglos o redes de dichos sensores es un área que aún se encuentra en la etapa de investigación. El desarrollo de varios sensores particulares presenta muchos retos y requiere de investigaciones teóricas igual que de trabajo aplicado para lograr la implementación de los sistemas, arreglos y redes de dichos sensores.

En la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) existen grupos que trabajan sobre fibras ópticas y sensores basados en fibras ópticas. Son grupos encabezados por el Doctor Juan Hernández Cordero en el Instituto de Investigación de Materiales, Doctor Eduardo Sandoval en el

INTRODUCCIÓN

CCADET y Doctor Ramón Gutiérrez Castrejón en el Instituto de Ingeniería, por mencionar algunos. En la Facultad de Ingeniería el grupo encabezado por el Doctor Sergiy Khotyaintsev desarrolla la investigación científica y aplicada sobre sensores de fibra óptica. Los grupos mencionados desarrollaron investigaciones científicas y aplicadas exitosas sobre distintos tipos de sensores ópticos y de fibra óptica. En particular, el grupo del Dr. Khotyaintsev desarrolló una serie de trabajos sobre los sensores para el monitoreo de salud de estructuras, sensores refractométricos y otros.

A pesar de obtener nuevos conocimientos importantes sobre diferentes propiedades y características de algunos sensores de fibra óptica, esta clase de sensores merece de estudios más puntuales y profundos.

El presente proyecto de tesis de Maestría tiene su enfoque en dos tipos de sensores binarios de fibra óptica de tipo Intensidad: A. Los sensores de daño estructural con una aplicación potencial en forma de arreglos de decenas de sensores en la detección e indicación automática de daño de edificaciones, en particular los edificios históricos de México; B. Los sensores de índice de refracción de líquidos con una aplicación potencial en forma de arreglos de decenas de sensores en la medición de nivel de líquidos, en particular los líquidos criogénicos.

Ambas aplicaciones requieren de un tipo de sistema de monitoreo de la intensidad de la radiación óptica en múltiples canales de los arreglos o redes de dichos sensores; estos sistemas no existen en el mercado y en la literatura científica y tecnológica no hay instructivos ni recomendaciones sobre las características óptimas y la forma de implementación de respectivos sistemas (los “Interrogadores” de canales de fibra óptica).

Objetivo general

Investigar las vías de implementación práctica y eficiente de los arreglos de algunos sensores binarios de tipo intensidad basados en fibra óptica y respectivos sistemas opto-electrónicos de monitoreo de las señales de dichos arreglos (los “Interrogadores”) y verificar las características de dichos arreglos e interrogadores por medio del desarrollo de una aplicación.

Objetivos particulares

1. Analizar el estado de arte de sensores basados en fibra óptica, utilizados para el monitoreo de la salud estructural de edificaciones y la medición de nivel de líquidos criogénicos.
2. Desarrollar una propuesta conceptual de un sistema opto-electrónico de tipo TDM, cuyo objetivo es la interrogación de un arreglo de sensores binarios de tipo intensidad basados en fibra óptica.

INTRODUCCIÓN

3. Investigar las características de funcionamiento de un arreglo de sensores binarios de tipo intensidad en conjunto con su sistema opto-electrónico de monitoreo de la respuesta de dichos sensores.
4. Obtener e interpretar datos experimentales sobre el nuevo sistema.
5. Evaluar la sensibilidad de un sensor refractométrico de tipo intensidad basado en fibra óptica para considerar la medición de nivel de líquidos criogénicos (helio líquido) con el mismo interrogador.

Metodología

En el desarrollo de la tesis, en primer término, se ubicarán las fuentes de información donde se presenten los avances técnicos y científicos de los sensores de fibra óptica aplicados en el área de monitoreo de la salud estructural y medición de niveles criogénicos, así como el estado actual de redes de sensores de fibra óptica.

En segundo término, se analizarán los aspectos fundamentales de las tecnologías objeto del estudio: los sistemas de interrogación, sus características y requerimientos, las fibras ópticas, sus características y funcionamiento, y los métodos aplicables de diseño de elementos y sistemas de fibra óptica. Como resultado de dicho análisis, se identificarán los problemas particulares a desarrollar, las variables de estudio y se hará el planteamiento detallado de la parte teórica y experimental de la tesis.

Como tercera fase, con base en los resultados de las actividades anteriores, se desarrollará la parte teórica de la tesis, la cual consistirá en el desarrollo de una propuesta conceptual de arreglo de sensores y su respectivo sistema opto-electrónico de interrogación para la presente aplicación, y evaluación de sus características.

La cuarta fase consistirá en la implementación del arreglo funcional de los sensores, el planeamiento y desarrollo de ensayos experimentales, cuyo objetivo consistirá en la comprobación práctica de la eficacia de dicho arreglo en la obtención de los objetivos del presente trabajo.

La quinta fase consistirá en el análisis de los resultados y desarrollo de las conclusiones generales de este trabajo.

1 CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

1.1 Introducción

El monitoreo de la salud estructural de construcciones está tomando importancia hoy en día como un tema de prevención de riesgos y ligado a las casas inteligentes.

En esta área se tienen oportunidades atractivas de emplear los sensores binarios de tipo intensidad de fibra óptica. Aunque existen sensores en el mercado capaces de monitorear la salud estructural de construcciones basados en las rejillas de Bragg y los interferómetros de Fabry-Perot, estos sensores son costosos y su uso requiere de personal capacitado, es decir, no puede ser empleado por cualquier persona además de no ser intuitivos. En cuanto a los sensores de intensidad son sencillos y accesibles, pero los datos sobre su implementación práctica son escasos.

Puesto que hay poca información en la literatura científica acerca de los sensores de fibra óptica de tipo intensidad con aplicación en el monitoreo de salud estructural, no hay recomendaciones sobre la configuración óptima del sistema, que respuestas se pueden esperar, ni las adaptaciones que se deben hacer puesto que los sensores deben convivir con elementos de ingeniería civil.

1.2 Conservación de edificios históricos: estado actual

1.2.1 El problema de conservación de edificios históricos

La conservación de edificios históricos ha tomado importancia en los últimos años. Esto ha pasado porque tanto la sociedad como el gobierno son cada vez más conscientes del valor social y cultural del patrimonio arquitectónico y de la importancia de conservarlo para las generaciones presentes y futuras. Hay muchos factores que amenazan los edificios históricos, en particular su salud estructural. Por tanto, la conservación de los edificios históricos y la disminución de los daños pasados y presentes en sus estructuras es un procedimiento complejo que cae dentro de un amplio rango de áreas específicas de conocimientos y habilidades. Típicamente, los proyectos de conservación requieren la participación de ingenieros civiles, geotécnicos, en materiales e instrumentación, así como arquitectos, historiadores, arqueólogos y expertos en restauración de arte [1].

En resumen lo que sucede con las estructuras es que al poseer cierta rigidez, en consecuencia ocurren deformaciones tales que les permiten absorber una serie de esfuerzos hasta alcanzar su límite de resistencia. Cuando se producen asientos diferenciales, aparecen esfuerzos adicionales sobre la estructura de tal manera que pueden llegar a provocar fisuras o grietas cuando se ha superado el límite tensional. La observación y estudio de esas grietas es de gran importancia para reconocer los movimientos que ha experimentado la estructura [2].

CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

El primer paso obligatorio en la preservación de los edificios históricos y cualquier intervención estructural es el diagnóstico del estado de la estructura. Dicho diagnóstico ayuda a los expertos a identificar el factor o los factores que amenazan el edificio histórico y que pueden causar o han causado un daño. El diagnóstico también permite a los expertos decidir acerca de las medidas correctivas que se deben tomar para reparar los daños existentes y prevenir una mayor degradación de la estructura [3] [4].

Otro paso altamente deseable es la implementación de algún tipo de monitoreo de los elementos estructurales críticos del edificio histórico. Si un comportamiento anormal o no deseado es identificado (tales como los causados por la degradación de los materiales, efectos ambientales, hundimiento de la tierra o sobrecarga), se pueden tomar medidas correctivas adecuadas a fin de prevenir un daño mayor [5] [6].

La detección temprana de los daños estructurales en los edificios históricos y sus elementos estructurales esenciales es de suma importancia, porque le da la oportunidad a los expertos de tomar medidas preventivas a tiempo, evitando así o al menos minimizando las consecuencias no deseadas (como colapso parcial o total las estructuras e incluso la pérdida de vidas humanas).

El daño estructural en muchos casos es causado por concentraciones de tensión o de deformación que a su vez se deben a la acumulación de deformaciones no deseadas. De acuerdo a algunos especialistas “los orígenes y la causa general de los daños son en general de naturaleza geotécnica” [7]. Los ingenieros geotécnicos colaboran con los expertos estructurales para determinar si la situación involucra un riesgo estructural en el presente o en el futuro.

La aparición y ensanchamiento de grietas en los elementos estructurales de los edificios es un indicador importante del daño estructural. Mediante la detección de las grietas y el análisis del patrón de estas, el experto encuentra las causas del daño estructural y evalúa la estabilidad de la estructura y su capacidad para resistir otros factores perjudiciales [8] - [12]. Sin embargo las herramientas existentes para la detección de grietas en edificios tienen muchas deficiencias que limitan la capacidad de detección temprana de daño estructural en los edificios históricos que presentan riesgos potenciales estructurales. Por esta razón, el desarrollo de herramienta nueva y eficiente para la detección temprana de grietas en edificios y otras estructuras civiles es de gran importancia práctica.

1.2.2 Las singularidades geológicas y sísmicas del Valle de México

Los aztecas fundaron la ciudad de México-Tenochtitlan en 1325 en una isleta en medio del Lago de Texcoco y ahí construyeron sus viviendas. Después de la conquista, los españoles demolieron el viejo México-Tenochtitlan y construyeron una nueva ciudad literalmente sobre la anterior.

CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

Los españoles emplearon técnicas de construcción ideadas por los aztecas, pero también introdujeron técnicas de construcción europeas que trataron de adaptar a las difíciles condiciones geotécnicas, no siempre con éxito. Con el fin de combatir los problemas causados por los asentamientos diferenciales inducidos por el mismo peso de las estructuras y en lugar de implementar otros recursos tecnológicos, la altura de la mayoría de las edificaciones fue generalmente limitada a dos pisos. Las cosas se agravaron porque, tras la destrucción del sistema prehispánico de diques con que se regulaba el agua en el lago, la ciudad se inundaba periódicamente.

Los problemas en los edificios causados por los asentamientos diferenciales se han agravado debido a la explotación del acuífero que está debajo de las arcillas de la antigua zona lacustre. El bombeo de agua del acuífero indujo un proceso de consolidación en los estratos de arcilla, que a su vez produjo subsidencia regional. Este proceso continúa hasta nuestros días. Los asentamientos resultantes están lejos de ser uniformes y como las estructuras construidas sobre estos terrenos acumulan asentamientos diferenciales, el daño estructural irreversible se acumula gradualmente. Esto, a su vez, aumenta su vulnerabilidad a otros agentes perjudiciales, como los terremotos recurrentes, que afectan a la ciudad.

En la actualidad, el núcleo de la antigua ciudad azteca y colonial está disminuyendo entre 8 y 12 cm/año, pero hay zonas en las afueras, hacia los bordes del antiguo lecho del lago donde el suelo se asienta entre 40 y 60 cm/año [13].

Los asentamientos diferenciales seguirán ocurriendo en un futuro previsible y la mayor parte del patrimonio arquitectónico de la ciudad será cada vez más amenazada. En la actualidad, se ha identificado que más de 57 edificios importantes en la Ciudad de México se encuentran en una condición extremadamente precaria [13].

1.3 Sensores de fibra óptica: conceptos principales

Un sensor de fibra óptica es un dispositivo capaz de convertir una cantidad física variable en una señal óptica modulada. El propósito de un sensor es responder a un cierto tipo de propiedades físicas de entrada (estímulos) y convertirlos en una señal que es compatible con los dispositivos con los cuales trabaja, por ejemplo, señales eléctricas las cuales pueden ser canalizadas, amplificadas, y modificadas por medio de dispositivos eléctricos. La señal de salida del sensor puede estar en términos de la amplitud, frecuencia, fase, o un código digital. Para propósitos de medición, la señal de salida es generalmente calibrada contra una cantidad física conocida.

La figura 1.1 muestra el esquema general de un sensor de fibras ópticas. La fuente de luz, el fotorreceptor y la fibra óptica dependen del tipo de aplicación en la cual serán empleadas. El

CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

elemento transductor S mostrado puede ser una fibra óptica o bien cualquier otro elemento óptico externo.

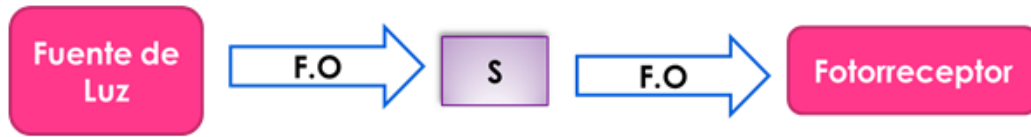


Figura 1.1 Esquema general de un sensor de fibra óptica

El elemento transductor S de la figura 1.1 puede ser descrito formalmente por una matriz de propagación $M(F, \lambda)$, que depende del ambiente físico F (parámetros físicos externos a considerar) y de las características espectrales del medio de transmisión de acuerdo a la longitud de onda en la que emite la fuente, λ . La matriz de propagación puede describirse como:

$$M(F, \lambda) = T e^{\phi B}$$

Donde T es la transmisión óptica escalar, ϕ representa el retardo en fase y B representa la birrefringencia del elemento sensor. Así las características de la onda de luz que pueden ser modificadas son la intensidad, la fase y la polarización.

Los sensores de fibra óptica son a menudo agrupados en dos clases básicas: extrínseco o sensores de fibra óptica híbridos, e intrínseco.

La figura 1.2 ilustra el caso de un sensor de fibra óptica extrínseco o híbrido. En este caso, la fibra es usada estrictamente como portadora de información que conduce la luz generada por la fuente óptica a una “caja negra” (elemento transductor) que introduce la información en el haz de luz en respuesta a un efecto ambiental. La información puede ser introducida en términos de intensidad, fase, polarización, contenido espectral u otros métodos. Enseguida una fibra óptica lleva la luz con la información ambiental de nuevo a un detector óptico. En este caso el sensor trabaja en modo de transmisión, pero también se puede trabajar en el modo de reflexión y para éste caso la fibra óptica de entrada actúa también como fibra óptica de salida.

CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

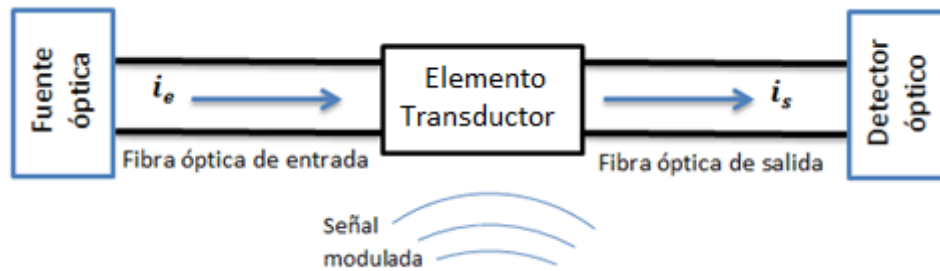


Figura 1.2 Sensor de fibra óptica extrínseco

Un ejemplo de sensor de fibra óptica intrínseco es mostrado en la figura 1.3. En este tipo de sensor la fibra óptica se emplea para llevar el haz de luz y el efecto del medio ambiente introduce la información en el haz de luz mientras la luz viaja en la fibra. Este tipo de sensor se basa en las propiedades de la fibra óptica para convertir un efecto ambiental en una modulación del haz de luz que pasa a través de ella.

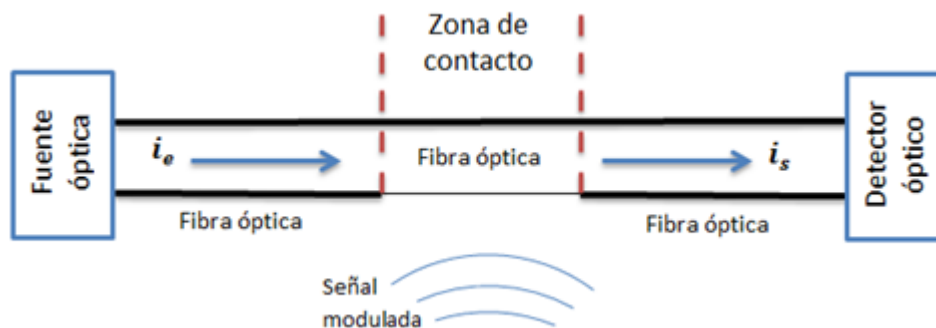


Figura 1.3 Sensor de fibra óptica intrínseco

Los sensores de fibra óptica de tipo intensidad son inherentemente simples y requieren una interfaz electrónica modesta, lo cual ofrece la posibilidad de desarrollar dispositivos de menor costo. En este tipo de sensores, la interacción con el medio ambiente induce pérdidas a la señal óptica que se manifiesta como una atenuación de la misma. Pueden emplear cualquier tipo de fibra óptica y el uso de fuentes no coherentes resulta adecuado.

Una de las técnicas de modulación más populares que emplean los sensores de tipo intensidad, implica doblar la fibra óptica para inducir pérdida en la radiación. Estos sensores de micro-dobles han sido usados para aplicaciones donde el parámetro detectado (tensión, presión, fuerza, posición) puede ser mecánicamente acoplado al desplazamiento de un dispositivo que deforma la fibra. Tal sensor de micro-dobles se ilustra en la figura 1.4. La intensidad de la luz

CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

que viaja a través de la fibra óptica es función de los cambios producidos en la estructura al aplicarle una fuerza [14].

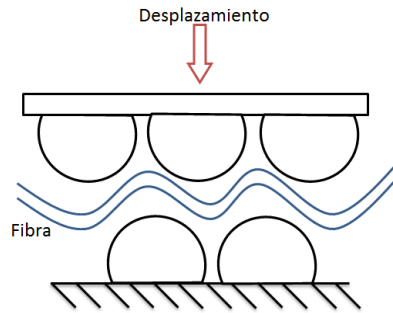


Figura 1.4 Sensor de desplazamiento basado en el efecto de doblado de la fibra óptica

En cuanto a los sensores binarios son sensores que convierten una magnitud física en una señal lógica o binaria, principalmente en una señal de salida eléctrica con los estados de “prendido” y “apagado”.

Por ejemplo en la figura 1.5 se observa una estructura instrumentada con los sensores binarios de fibra óptica, el funcionamiento de los sensores se basa en la variación de la intensidad de la luz que se transmite a través de la fibra óptica, la cual puede estar embebida o pegada a la estructura.

La estructura al ser sometida a una fuerza genera dos escenarios diferentes con la fibra: A) La fibra 1 solo sufre doblado, que solo provoca disminución de la intensidad de la luz. B) La fibra 2 se rompe, que provoca pérdida total de la intensidad de luz. Cada uno de los escenarios corresponde a un cambio diferente de la estructura, el escenario A corresponde a una grieta y el escenario B corresponde a una falla.

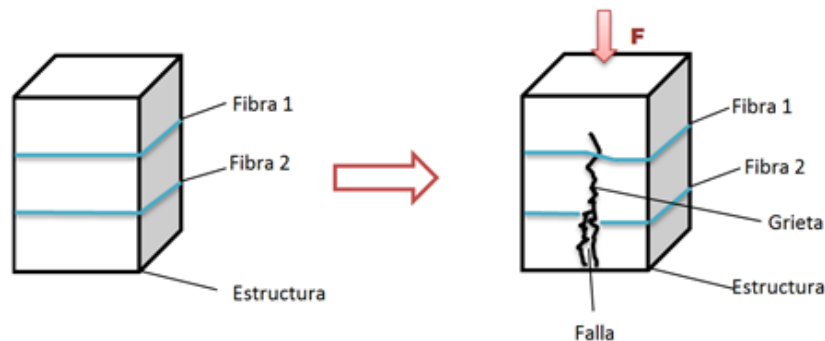


Figura 1.5 Ejemplo del funcionamiento del sensor de daño estructural

1.4 Sensores de fibra óptica en el monitoreo de daño estructural

Existe una variedad de métodos visuales, mecánicos acústicos, eléctricos y otros que se utilizan para la detección de daños en estructuras de ingeniería civil [15] - [17]. En los últimos años, el uso de los sensores de fibra óptica para la vigilancia de la salud estructural se ha vuelto muy popular [18] - [23].

Las principales ventajas de los sensores de fibra óptica con respecto a la monitorización de la infraestructura civil, en comparación con otros sensores son: A) inmunidad de las fibras ópticas a las interferencias electromagnéticas; B) naturaleza dieléctrica no conductora de las fibras ópticas; C) alta resistencia de las fibras ópticas a la corrosión química; D) pequeña sección transversal y peso de las fibras ópticas. Además, el gran ancho de banda de las fibras ópticas permite un alto grado de multicanalización de las señales ópticas.

Los tipos más populares de sensores de fibra óptica que son utilizados actualmente en el monitoreo de estructuras de ingeniería civil son las rejillas de Bragg de fibra óptica (FBG), el resonador de fibra óptica Fabry-Perot (FPR) y los sistemas de análisis óptico en el dominio de tiempo Brillouin (BOTDA) [22] - [26].

Los sensores FBG y FPR son dispositivos ópticos interferométricos con los que se puede obtener una medición de tensión y de deformación por compresión con alta precisión y resolución. Estos sensores también son sensibles a la temperatura, por lo que se requiere algún tipo de referencia o compensación para descartar el efecto de la temperatura en el resultado de la medición. La multiplexación de los sensores FPR presenta muchas dificultades, y por eso el número máximo de sensores FPR en un arreglo se limita generalmente a pocas unidades. Por el contrario, los sensores FBG pueden implementarse en forma de grandes arreglos con conexión en serie y en paralelo de muchas docenas de sensores individuales. En vista de esta propiedad, los sistemas de sensores FBG dominan el campo de los sensores de fibra óptica para la supervisión de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés).

La información sobre la deformación y la temperatura proporcionada por los sistemas de sensores FBG, FPR y BOTDA es una forma útil de corroborar y verificar que la estructura que se está monitoreando se está comportando correctamente. Los sensores mencionados proporcionan información indirecta sobre daños estructurales, tales como concentraciones de deformaciones anómalas en la vecindad de grietas, lo que permite identificar el elemento estructural que falló. Además, si la grieta atraviesa el sensor de fibra óptica, este se daña y se pierde, y se interrumpe la transmisión óptica, lo que es una indicación directa del daño estructural. Sin embargo, en el caso

CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

de la conexión en serie de muchos sensores FBG o FPR, el daño de un sensor interrumpe el acceso a otros sensores del arreglo. Lo mismo ocurre con los sensores BOTDA distribuidos.

Los sistemas de sensores FPR, FBG y BOTDA tienen otras deficiencias. En cuanto al monitoreo de la salud estructural, algunas de estas deficiencias son: un alto costo de los instrumentos de procesamiento de señal (los llamados interrogadores) y la necesidad de emplear personal altamente capacitado para el funcionamiento del sistema y la interpretación de los resultados de las mediciones. En vista de ello, los sistemas de sensores mencionados anteriormente se utilizan principalmente en infraestructuras nuevas para asegurar su operación correcta y segura en condiciones reales [27].

En vista de la complejidad y el alto costo de los sistemas de sensores basados en FBG, FPR y BOTDA, sería muy útil desarrollar una técnica de fibra óptica más sencilla y barata para detectar daños estructurales en edificios históricos. El requisito de un bajo costo del sistema es esencial en vista de la escasez de recursos financieros para el SHM y dado el gran número de edificios históricos que lo merecen.

1.5 Las fibras ópticas como detectores de daño estructural en los elementos de concreto

En el área de detectores de daño en elementos de concreto se han realizado diversos trabajos, algunos de ellos han sido realizados por integrantes de nuestro equipo de trabajo.

En [28] se embebieron arreglos de fibras ópticas en elementos de concreto con el fin de detectar la aparición de grietas en los mismos. Se ocupan fibras convencionales empleadas en las telecomunicaciones, por lo que la fuente óptica se trata de un diodo laser (Coherent VLM2, 4 mW @ 670 nm) y en el receptor óptico se empleó un fotodiodo pin (FD-263) y un amplificador de transimpedancia.

En el trabajo se describen dos técnicas diferentes de incrustación de las fibras ópticas en la mezcla de hormigón fresco: sin elementos de protección y con protección temporal en forma de tubos de plástico. Las fibras ópticas se colocan en tubos de plástico de pequeño diámetro al llenar el molde con mezcla de hormigón, estos tubos se retiran después de llenar el molde con mezcla de hormigón cuando la mezcla todavía está fresca. La desventaja de realizar eso es que se reduce la habilidad de las fibras de detectar la aparición de las grietas.

CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

Como continuación del trabajo en [29] se emplean arreglos de fibras ópticas convencionales embebidas en elementos de concreto, sin ningún elemento de protección, como sensores de grietas. Se probaron 12 tipos diferentes de fibra óptica así como múltiples técnicas de embebido.

Durante el proceso de fabricación de los elementos de concreto muchas de las fibras embebidas se rompieron, debido a la presencia de grava, quedando inservibles. La mayor tasa de sobrevivencia de las fibras se presentó con una fibra de 400 μ m y fue del 80%, sin embargo presentan la desventaja de que son menos sensibles a la detección grietas que las fibras con diámetro menor (que presentan una tasa de sobrevivencia de 10-20%). Aunque también se observó que la tasa de sobrevivencia depende del material de la fibra.

La técnica de monitoreo empleada en el trabajo es de naturaleza discreta, por lo que solo indica si la fibra está rota o intacta. La transmisión óptica de los sensores de fibra óptica se monitoreo con un sistema TDM (a una tasa en el rango de KHz), cuya fuente óptica fue un LED operando en 633nm. El sistema fue capaz de detectar no solo la aparición de las grietas sino también su propagación a través del elemento estructural bajo la carga de flexión. Las ventajas del sistema son su bajo costo y su simplicidad en operación.

También es posible utilizar la técnica de embebido de los arreglos de las fibras para monitorear el desplazamiento transversal de las vigas de concreto bajo carga de flexión [30]. Para ello se realizó un estudio más profundo para observar el comportamiento de las fibras con un diámetro de núcleo grande. Empleando fibras ópticas multimodo de índice escalonado de núcleo – sílice / revestimiento – polímero / recubrimiento - polímero con diámetros de 400/430/730 μ m, respectivamente, con una apertura numérica de 0.48 (marca Thorlabs, modelo FT-400-URT).

Se colocaron doce fibras ópticas en cada viga de concreto, en la dirección paralela a su eje longitudinal. Se encontró que la precisión y habilidad del sistema para detectar el daño basado en la propagación de la grieta depende del arreglo y la localización física de las fibras dentro del elemento de concreto.

De igual manera se encontró que la transmisión óptica de fibras ópticas núcleo – sílice / revestimiento – polímero / recubrimiento - polímero embebidas directamente (sin elementos de protección temporales o permanentes) en las vigas de concreto muestra una disminución frente a la carga transversal aplicada y el desplazamiento de flexión respectivo. La disminución observada en la transmisión óptica de las fibras ópticas es proporcional a la carga aplicada y al desplazamiento de flexión respectivo, aunque la relación entre estas magnitudes no es bastante lineal.

1.6 Conclusiones

Existen antecedentes de la detección exitosa de grietas en vigas de hormigón armado por medio de matrices de fibras ópticas embebidas. Las fibras ópticas se doblan, se tuerzan y se fracturan bajo el desarrollo y apertura de grietas en la estructura. Esto a su vez produce una disminución en la transmisión óptica de las fibras ópticas que atestiguan el inicio y la apertura de grietas. Anteriormente se pensaba que la fractura de las fibras ópticas presentaba resultados relativamente pobres al presenciar las grietas, al menos en las hojas de metal y materiales compuestos [31]. Quizás por esta razón esta técnica nunca se había aplicado al monitoreo de daños en mampostería. Sin embargo, el bajo coste de las fibras ópticas comunes (sin FBG u otros elementos sensores especiales), la posibilidad de desplegarlos sobre grandes superficies de edificios y la simplicidad de medición de la amplitud hacen que la técnica actual sea bastante prometedora para el monitoreo generalizado de daños en edificios. En particular en los edificios históricos.

Los problemas aún por resolver se encuentra en el diseño del sistema interrogador óptico para la interrogación del arreglo de sensores, así como el conocimiento de todas las adaptaciones necesarias para la implementación del sistema en el monitoreo de un edificio histórico, como que pegamento ocupar, cuantos sensores ocupar, entre otros.

Referencias

- [1] Coisson, E., and Blasi, C. 2014. Monitoring the french pantheon: from Rondelet's historical surveys to the modern automatic system. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(1): 48-57.
- [2] Patologías por problemas en cimientos. *Construmática*. Recuperado el 11 de marzo de 2017 de la página:
http://www.construmatica.com/construpedia/Patolog%C3%ADas_por_problemas_en_Cimientos
- [3] Fanelli, M. 2013. Importance of monitoring, behaviour analysis, and diagnostic techniques for preservation of great historical structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(1): 2-6.
- [4] Senaldi, I., Magenes, G., and Ingham, J. M. 2014. Damage assessment of unreinforced stone masonry buildings after the 2010–2011 Canterbury earthquakes. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(5): 605-627.
- [5] Rossi, P. P., and Rossi, C. 2014. Monitoring of two great venetian cathedrals: San Marco and Santa Maria Gloriosa dei Frari. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(1): 58-81.

CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

- [6] Squeglia, N., and Bentivoglio, G. 2014. Role of monitoring in historical building restoration: the case of leaning tower of Pisa. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(1): 38-47.
- [7] Calabresi, G., and D'Agostino, S. 1997. Monuments and historic sites: intervention techniques. *Proc. Of the Arrigo Croce Memorial Symposium – Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites*, Napoli, 1996, A. A. Balkema, Rotterdam.
- [8] Lignola, G. P., and Manfredi, G. 2011. Damage assessment and design of structural interventions for monte di Pieta in Naples, Italy. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(6): 647-676.
- [9] Bertaccini, B. 2013. Santa Maria del Fiore dome behaviour: statistical models for monitoring stability. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(1): 25-37.
- [10] Ottoni, F., and Blasi, C. 2013. Results of a 60-year monitoring system for Santa Maria del Fiore dome in Florence. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(1): 7-24.
- [11] Alessandri, C., Garutti, M., Mallardo, V., and Milani, G. 2014. Crack Patterns induced by foundation settlements: integrated analysis on a renaissance masonry palace in Italy. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(2):111-129.
- [12] Palmisano, F. 2014. Rapid diagnosis of crack patterns of masonry buildings subjected to landslide-induced settlements by using the load path method. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(4): 438-456.
- [13] Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., and León, E. 2005. *Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México*. México D.F., TGC geotecnia S.A. de C.V., 171p.
- [14] *Fiber optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, Edited by Eric Udd. ISBN 0-471-83007-0, a Wiley-Interscience Publications, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [15] Brownjohn, J. M. 2007. Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851): 589-622.
- [16] Glisic B., Inaudi D., and Casanova N. 2010. SHM process as perceived through 350 projects. *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, 48–76. San Diego, CA, USA. 8 April 2010.
- [17] Cigada, A., Corradi Dell'Acqua, L., Mörlin Visconti Castiglione, B., Scaccabarozzi, M., Vanali, M., and Zappa, E. 2016. Structural health monitoring of an historical building: the main spire of the duomo di Milano. *International Journal of Architectural Heritage*, (just-accepted).
- [18] Barrias, A., Casas, J. R., and Villalba, S. 2016, May 23. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors*, 16(5):748.

CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

- [19] Ferdinand, P. 2014. The evolution of optical fiber sensors technologies during the 35 last years and their applications in structure health monitoring. *In Proceedings of the 7th European Workshop Structure Health Monitoring (EWSHM)*, Nantes, France, 8–11 July 2014.
- [20] Leung, C. K. Y., Wan, K. T., Inaudi, D., Bao, X., Habel, W., Zhou, Z., Ou, J., Ghandehari, M., Wu, H.C., and Imai, M. 2013. Review: optical fiber sensors for civil engineering applications. *Mater. Struct.*, 48: 871–906.
- [21] Ye, X. W., Su, Y. H., and Han, J. P. 2014. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: a comprehensive review. *The Scientific World Journal*. 2014: 652329.
- [22] Habel, W., Krebber, K., Dantan, N., Schallert, M., and Hofmann, D. 2007. Recent example of applied fiber optic sensors in geotechnical area to evaluate and monitor structural integrity. *In Proceedings of 2nd International Workshop on Opto-electronic Sensor-based Monitoring in Geo-engineering*, 27-35. Nanjing, China.
- [23] Habel, W. R., and Krebber, K. 2011. Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering. *Photonic Sensors*, 1(3):268–80.
- [24] Habel, W. R., and Krebber, K. 2012. Application of fiber-optic sensors for health monitoring purposes in geo-engineering. *In Proceedings of the 4th international forum on opto-electronic sensor-based monitoring in geo-engineering*
- [25] Glisic, B., Inaudi, D., Posenato, D., Figini, A., and Casanova, N. 2007. Monitoring of heritage structures and historical monuments using long-gage fiber optic interferometric sensors—an overview. *In Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure-SHMII-3*, 13-16. Vancouver, BC, Canada.
- [26] Bao, X., and Chen, L. 2012. Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors*, 12: 8601-39.
- [27] Chan, T. H., Yu, L., Tam, H. Y., Ni, Y. Q., Liu, S. Y., Chung, W. H., and Cheng, L. K. 2006. Fiber bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: background and experimental observation. *Engineering Structures*, 28: 648–59.
- [28] Khotiaintsev, S., Beltran-Hernandez, A., Esparza-Villa, J. U., & Hernandez-Villeda, R. Monitoring of integrity of concrete elements with arrays of optical fibers.
- [29] Khotiaintsev, S., Beltrán-Hernández, A., González-Tinoco, J. E., Guzmán-Olguín, H., and Aguilar-Ramos, G. 2013. Structural health monitoring of concrete elements with embedded arrays of optical fibers. *Published in Proceedings Volume 8695 (paper 39): Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2013*, May 2013. San Diego, CA, USA, March 2013.
- [30] Gonzalez-Tinoco, J. E., Gomez-Rosas, E. R., Guzman-Olguin, H. J., Khotiaintsev, S., and Zuñiga-Bravo, M. A. 2015. Monitoring of transverse displacement of reinforced

CAPITULO 1. El problema de conservación de edificios históricos y sensores de fibra óptica

concrete beams under flexural loading with embedded arrays of optical fibers. *In Proceedings of SPIE Vol. 9437 (Paper 24): Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace and Civil Infrastructure 2015*, May 2015. San Diego, CA, USA, March 2015. (SPIE Smart Structures / Non-destructive Evaluation Symposium 2015).

- [31] Balageas, D. 2006. *Introduction to Structural Health Monitoring, in Structural Health Monitoring* (Eds D. Balageas, C.-P. Fritzen and A. Güemes), ISTE, London, UK.

2 CAPITULO 2. Propuesta conceptual de un sistema de monitoreo de elementos de mampostería de tabique en edificios históricos, basado en “nervios” de fibra óptica

2.1 Introducción

El sistema óptico electrónico que realiza un monitoreo de la señal óptica en todos los canales de un arreglo o red de sensores es el componente fundamental de un sistema (arreglo o red) de los sensores binarios de tipo intensidad basados en fibra óptica. Esta clase de los sistemas opto-electrónicos son conocidos como *interrogadores*.

En este capítulo se presentan las exigencias técnicas para el equipo transmisor óptico y el receptor óptico, y se muestra la configuración general de un primer diseño del sistema.

Dado que se trata de un arreglo de sensores hay que lograr la integración de varios canales de monitoreo estructural e implementar un control de ganancia para asegurar que el sistema pueda trabajar con fibras de diferentes diámetros de núcleo. Se debe pensar en la conexión del arreglo de fibras ya que no hay en el mercado dichos conectores, y el ocupar conectores individuales sería costoso y estorboso. De igual manera se debe de pensar en los elementos a ocupar.

Por no estar descritos los sistemas de interrogación en la literatura científica representa un reto el diseño del mismo.

2.2 Configuración general del sistema y justificación de sus parámetros

2.2.1 Justificación de los parámetros del sistema de monitoreo

El sistema deberá tener las siguientes características:

- Trabajar en el modo de división de tiempo (*Time Division Multiplexing, TDM*), contando con 16 canales ópticos, con 16 transmisores ópticos y un solo receptor óptico.
- En el transmisor se emplearan diodos LED que operen en la banda infrarroja, dado que es más eficiente que un LED visible.
- Trabajar con una señal pulsátil y de una frecuencia de 10 KHz.
- El sistema TDM funcionará a una frecuencia de 2.5KHz.

CAPITULO 2. Propuesta conceptual de un sistema de monitoreo de elementos de mampostería de tabique en edificios históricos, basado en “nervios” de fibra óptica

- El diodo LED en el transmisor y el fototransistor en el receptor deben poder ser sustituidos fácilmente, logrando que el equipo electrónico se encuentre separado del equipo óptico.
- Deberá trabajar con fibras de diferente diámetro del núcleo, por lo que se debe facilitar el acoplamiento de fibras de diferentes diámetros.
- En la recepción se debe ser capaz de observar la señal de los 16 canales ópticos.

2.2.2 Configuración del sistema de monitoreo

El diagrama a bloques general del diseño del cual se partió se muestra en la figura 2.1, en donde se tiene:

- Transmisor óptico:
 - Señal de información, pulso de 10 KHz y ciclo de trabajo $\tau=90\%$.
 - Señal de reloj para controlar el ciclo del TDM, pulso de 2KHz ciclo de trabajo 90%.
 - Contador de 4 bits ascendente, para controlar las 16 salidas de TDM e ir activando una a una secuencialmente.
 - Demultiplexor analógico, el cual realiza el modo TDM, teniendo 4 entradas (de control) y 16 salidas que van a los 16 amplificadores.
 - Amplificador, utilizando un transistor de unión bipolar en configuración de emisor común con polarización fija. Para la salida óptica se emplea un diodo LED infrarrojo ($\lambda=940\text{nm}$).
- Fibra óptica, para comunicar los 16 transmisores con el receptor.
- Receptor óptico:
 - Amplificador de voltaje, utilizando el fototransistor y dos transistores en unión bipolar en cascada.

Este primer diseño del sistema cuenta con 16 amplificadores cuya señal de salida es un tren de pulsos de 10 KHz con un ciclo de trabajo de 10%, dichos amplificadores se encuentran en multiplexación por división de tiempo (TDM). Y un solo receptor óptico, el cual se encuentra recibiendo todo el tiempo.

Funcionamiento: Con el fin de mantener la sincronía entre la señal de entrada de los amplificadores y la señal de control del TDM, ambas señales provienen de un mismo generador de tren de pulsos que se encuentra a 10 KHz y 90% de ciclo de trabajo. Dicha señal pasa por un divisor de frecuencia para lograr el tren de pulsos de 2 KHz que controla el contador de 4 bits. El contador a su vez controla el demultiplexor analógico que tiene cómo entrada el tren de pulsos de 10 KHz, que viene directamente del generador de pulsos. El demultiplexor va conmutando su entrada entre sus 16 salidas, que posteriormente se conectan a la entrada de cada uno de los 16 amplificadores. Dichas señales sirven como corriente de disparo que polarizan a los transistores

CAPITULO 2. Propuesta conceptual de un sistema de monitoreo de elementos de mampostería de tabique en edificios históricos, basado en “nervios” de fibra óptica

para lograr la conmutación entre el corte y la saturación del mismo, para liberar una corriente capaz de encender al LED con la luminancia suficiente para nuestro fin. El fin es transmitir la señal a través de fibra óptica, la cual provocará atenuaciones, y posteriormente ser detectada con un nivel adecuado. La señal de salida es un tren de pulsos de 10 KHz con un ciclo de trabajo de 10%.

Dicha señal es captada por un fotodetector en el receptor y posteriormente amplificada, para ser observada posteriormente en un osciloscopio o analizada en un sistema adquirente de datos.

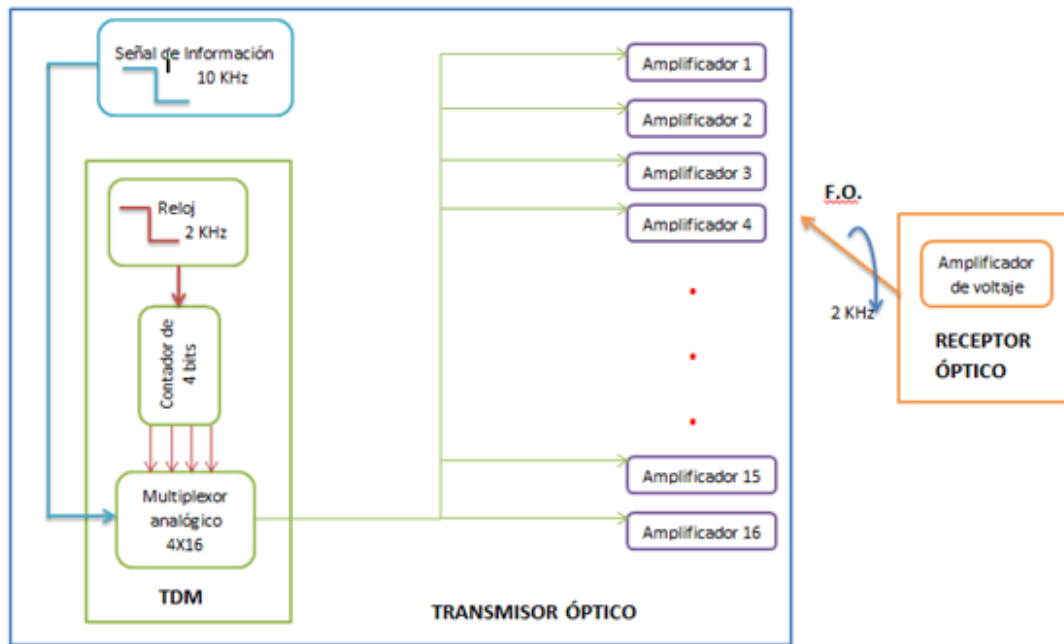


Figura 2.1 Diagrama a bloques del primer diseño del sistema óptico (TDM 16X1)

2.3 Conclusiones

Se propone la implementación de un sistema de interrogación que funciona en el modo TDM. En este modo, se puede interrogar un gran número de canales empleando la menor cantidad de dispositivos electrónicos y con ello se logra hacer compacto y económico el interrogador.

Se propone emplear fibras ópticas multimodo, por la facilidad de acoplamiento de estas fibras ópticas entre sí y con las fuentes de radiación óptica.

Se propone emplear como fuentes ópticas los LEDs dado que son dispositivos económicos y robustos.

CAPITULO 2. Propuesta conceptual de un sistema de monitoreo de elementos de mampostería de tabique en edificios históricos, basado en “nervios” de fibra óptica

Se propone el modo pulsátil de funcionamiento del sistema, con la finalidad de tener una alta eficiencia energética del sistema. Al emplear una señal pulsátil el transistor del amplificador de potencia se encuentra cerrado (corte) o en saturación y por tanto casi no se calienta, evitando así que la energía se pierda en forma de calor.

3 CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica

3.1 Introducción

El diseño del sistema opto-electrónico se llevó a cabo en diversas etapas. Se partió de un diseño sencillo, descrito en la sección anterior, que se construyó en base a el conocimiento con el que se contaba y tratando de cubrir todas las especificaciones. Conforme se fue experimentando se fueron observando las deficiencias del sistema, por lo que en el camino se fueron haciendo los cambios necesarios en el diseño para lograr la mejor respuesta del sistema.

En este capítulo se analizan diferentes opciones de circuitos eléctricos del equipo transmisor opto-electrónico y cada uno de sus bloques funcionales y se selecciona las variantes óptimas para la presente aplicación: sistema de monitoreo de elementos de mampostería de tabique en edificios históricos, basado en “nervios” de fibra óptica. Luego se presenta resultados de implementación y pruebas experimentales.

3.2 Implementación del sistema de monitoreo

Primera variante del diseño del sistema opto-electrónico

En esta variante para el amplificador de corriente del LED se empleó un circuito basado en un transistor de unión bipolar (TBJ tipo NPN) en configuración de colector común, el cual funge como conmutador de corriente. Al tratarse de una configuración en colector común, la salida del circuito se encuentra desfasada 180° respecto a la entrada, con lo cual se logra obtener un pulso con un ciclo de trabajo de 10% (recordando que la señal de entrada es un pulso de 10KHz y un ciclo de trabajo de 90%). Este amplificador proporciona al LED una corriente de $I_{LED} = 75 \text{ mA}$, la cual representa una corriente grande para el circuito demultiplexor analógico y por tanto se infiltra en el multiplexor y provoca que la corriente de todo el sistema se caiga.

Para el receptor óptico se empleó un circuito basado en dos transistores de unión bipolar (TBJ tipo PNP) en configuración de base común y en conexión tipo Darlington. Se probó el circuito con diferentes fibras de diferente diámetro de núcleo ($100\mu\text{m}$, $105\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $400\mu\text{m}$) y diferentes longitudes, presentando una ganancia alta, pero una respuesta en tiempo baja, es decir, una constante de tiempo grande, por lo cual se presenta una distorsión en la señal recibida [1].

Segunda variante del diseño del sistema opto-electrónico

Dado el fenómeno presentado en la variante anterior, en donde la corriente generada en el amplificador de corriente se infiltra en el circuito demultiplexor, en este diseño se implementó una etapa pre-amplificadora.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

El pre-amplificado se hace necesario debido a que el demultiplexor no es capaz de alimentar a los 16 circuitos amplificadores. El pre-amplificador realiza dos acciones importantes: acoplar la impedancia de salida del demultiplexor con la impedancia de entrada del circuito amplificador, logrando así una máxima transferencia de potencia, y crear un “buffer” entre las dos etapas antes mencionadas. El circuito acoplador de impedancias implementado, también conocido como seguidor de voltaje, consta de un amplificador operacional con realimentación negativa.

Sin embargo este circuito provoca la distorsión del pulso, no se alcanza a construir el pulso cuadrado, debido a la respuesta en frecuencia baja del amplificador operacional.

Para el amplificador de corriente de LED se empleó un circuito basado en un transistor de unión bipolar (TBJ tipo NPN) en configuración de emisor seguidor con polarización por división de voltaje. Proporcionando una corriente de LED de $I_{LED} = 87 \text{ mA}$.

Para el receptor óptico se empleó un amplificador de voltaje de transimpedancia, los cuales son los que generalmente se ocupan en los sistemas de comunicaciones ópticos, utilizando un fototransistor y un amplificador operacional. Dicho circuito se probó con una fibra de $d_{nucleo} = 105 \mu\text{m}$ y con una fibra de $d_{nucleo} = 200 \mu\text{m}$. Para el primer caso la señal recibida presentó un voltaje alto (6.4 V) pero muy distorsionada, lo cual se debe a la respuesta en frecuencia baja del amplificador operacional. En el segundo caso la intensidad óptica fue tal que saturó al fototransistor y no se pudo obtener ninguna señal [2].

Tercera variante del diseño del sistema opto-electrónico

En la variante anterior la señal presentada a la salida del transmisor óptico es un pulso de frecuencia 10 KHz y un ciclo de trabajo de 90%, pero esto no es muy deseable puesto que en esta situación el LED presenta corriente la mayoría del tiempo y eso puede llegar a ocasionar que el LED se queme. Por tanto en respuesta a esta situación, en el tercer diseño se implementó un circuito inversor.

El circuito inversor se implementó a la salida del generador de pulsos y a la entrada del divisor de frecuencia, empleando para ello el circuito integrado 74LS04 el cual es un negador. Con lo que se logró cambiar el pulso de 10 KHz de un ciclo de trabajo del 90% a un ciclo de trabajo de 10%. Sin embargo dicho circuito integrado también causó distorsión en el pulso, mostrando un recorte en el pico del pulso.

Para el preamplificador, debido a que en la variante anterior se presentaba distorsión en el pulso, en este diseño se sustituye el amplificador operacional por un circuito basado en un TBJ (tipo NPN) en configuración de seguidor de emisor, por lo que la salida del circuito se encuentra en fase con la entrada del mismo y se sigue conservando el ciclo de trabajo del 10%.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

En el amplificador se mantiene el mismo circuito que el empleado en la variante anterior, sin embargo en este caso dada las modificaciones realizadas se obtiene una corriente de LED mayor $I_{LED} = 147 \text{ mA}$ [3].

Cuarta variante del diseño del sistema opto-electrónico

En la variante anterior el circuito integrado que realiza la función de inversor mete distorsión al pulso, es por esto que se sustituyó por un circuito basado en TBJ (tipo NPN) en configuración de emisor común y con polarización fija. El cual presentó resultados favorables que se detallan más adelante.

El pre-amplificador de corriente se mantuvo, pero el amplificador de corriente de LED se cambió para poder lograr una mayor corriente del LED. Se empleó un circuito en configuración de seguidor de emisor y con polarización fija, pero en este caso se empleó un transistor tipo Darlington NPN de potencia. Se logró una corriente en el LED de $I_{LED} = 232 \text{ mA}$.

Esta variante presentó resultados favorables y a continuación se realiza una descripción detallada de la misma.

3.3 Descripción del sistema desarrollado y sus elementos

En la figura 3.1 se puede observar el diagrama a bloques general del sistema óptico a desarrollar, en donde se tiene:

- Transmisor óptico:
 1. Tren de pulsos de 10 KHz y ciclo de trabajo 90%.
 2. Circuito inversor, necesario para obtener el tren de pulsos con ciclo de trabajo de 10%.
 3. Un divisor de frecuencia 4:1, para lograr obtener del tren de pulsos de 10 KHz el tren de pulsos de 2.5 KHz que sirve como reloj del TDM.
 4. Señal de reloj para controlar el ciclo del TDM, tren de pulsos de 2.5 KHz y ciclo de trabajo 90%
 5. Contador de 4 bits ascendente, para controlar las 16 salidas de TDM e ir activando una a una secuencialmente.
 6. Demultiplexor analógico, el cual realiza el modo TDM, teniendo 4 entradas (de control) y 16 salidas que van a los 16 amplificadores.
 7. Pre-amplificador, que también funge como acoplador de impedancias entre la salida del multiplexor analógico y la entrada del amplificador de corriente, se hace necesario debido a que el multiplexor no es capaz de alimentar a los 16 circuitos amplificadores.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

8. Amplificador, el cual es un amplificador de señal débil empleado para amplificar la corriente suministrada al LED, utilizando un transistor de unión bipolar (TBJ, tipo NPN) en configuración de emisor seguidor con polarización por división de voltaje. Para la salida óptica se emplea un diodo LED infrarrojo ($\lambda = 940\text{nm}$).
- Fibra óptica, para comunicar los 16 transmisores con el receptor.
- Receptor óptico de transimpedancia:
 9. Amplificador de transimpedancia, que amplifica la señal débil proveniente de la fibra óptica, utilizando el fototransistor y un amplificador operacional.

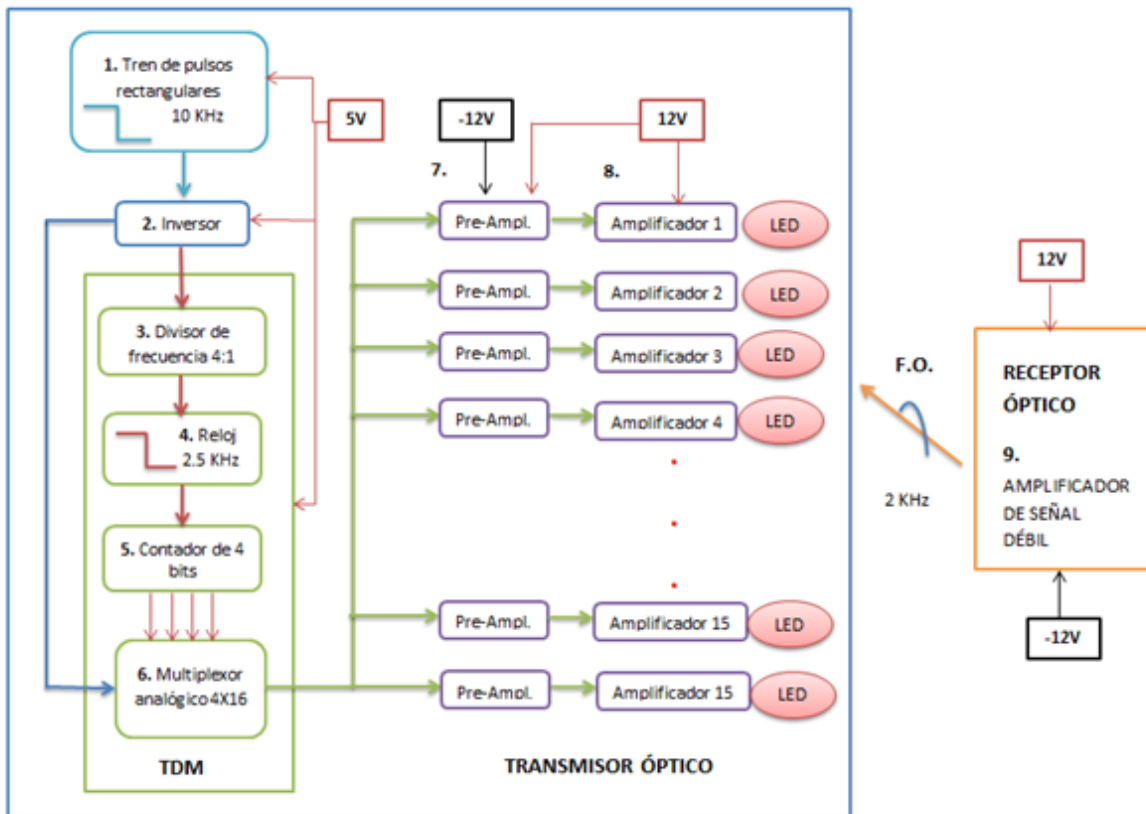


Figura 3.1 Diagrama a bloques del sistema opto-electrónico (TDM 16X1)

3.4 Funcionamiento del sistema

El sistema cuenta con 16 amplificadores cuya señal de salida es un tren de pulsos de frecuencia de $f = 10\text{KHz}$ con un ciclo de trabajo de $\tau = 10\%$, dichos amplificadores se encuentran en multiplexación por división de tiempo (TDM). Y un solo receptor óptico, el cual se encuentra recibiendo todo el tiempo.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

Con el fin de mantener la sincronía entre la señal de entrada de los amplificadores y la señal de control del TDM, ambas señales provienen de un mismo generador de tren de pulsos que se encuentra a una frecuencia de $f = 10$ KHz y un ciclo de trabajo $\tau = 90\%$. El tren de pulsos de 10 KHz pasa primero por el circuito inversor, obteniendo así el tren de pulsos con $\tau = 10\%$. Posteriormente dicho tren de pulsos pasa por un divisor de frecuencia de razón 4:1 para lograr el tren de pulsos de $f = 2.5$ KHz que controla el contador de 4 bits. El contador a su vez controla el demultiplexor analógico que tiene como entrada el tren de pulsos de $f = 10$ KHz y $\tau = 10\%$, que proviene del circuito inversor. El demultiplexor va conmutando su entrada entre sus 16 salidas, que posteriormente se conectan a cada uno de los 16 acopladores de impedancia cuya salida se conecta finalmente a la entrada de cada uno de los 16 amplificadores de corriente. Dichas señales son amplificadas en los transistores para lograr una corriente capaz de encender al LED con la luminancia suficiente para nuestro fin. El fin es transmitir la señal a través de fibra óptica, la cual provocará atenuaciones, y posteriormente ser detectada con un nivel adecuado.

Los 16 LEDs infrarrojo se acoplan de manera individual a cada uno de los 16 canales de fibra óptica, pero aún falta mejorar el acoplamiento en la parte del receptor ya que se tienen 16 fibras que se deben acoplar a un solo fotorreceptor.

3.5 Diseño del transmisor óptico

3.5.1 Generador de pulsos

Uno de los primeros elementos que se diseñó fue el generador de pulsos, para el cual se empleó el circuito integrado NE555, cuya hoja de datos se puede consultar en [4], un circuito simple de implementar y de bajo costo, aunque poco estable. El NE555 es un oscilador de voltaje capaz de generar un tren de pulsos cuadrados cuando se emplea en la configuración astable.

En la hoja de especificaciones del circuito integrado, se nos proporciona tanto el circuito (figura 3.2) como las formulas necesarias para poner el NE555 en su configuración astable. Para esto es necesario conocer la frecuencia (f), el periodo (t) y el ciclo de trabajo (τ) de la señal que queremos generar, que en nuestro caso se trata de un pulso de $f = 10$ KHz, $t = 100$ μ s y $\tau = 10\%$.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

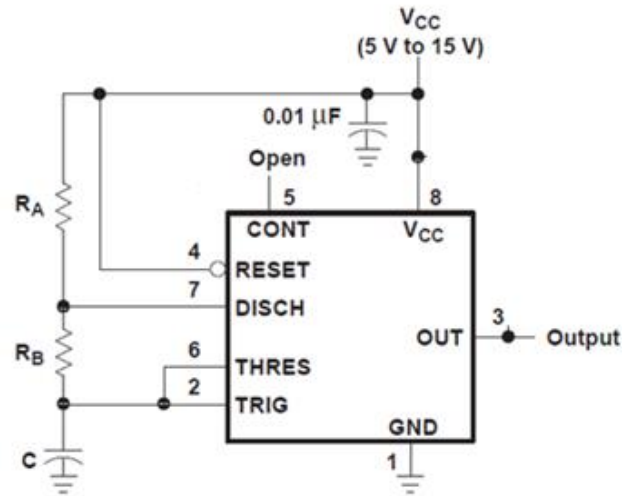


Figura 3.2 Circuito para colocar el NE555 en su configuración astable

También se proporcionan las siguientes fórmulas para el periodo, frecuencia y ciclo de trabajo:

$$t = t_H + t_L = 0.693(R_A + 2R_B)C \quad (3.3)$$

$$f \approx \frac{1}{t} = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C} \quad (3.4)$$

$$\tau = \frac{t_H}{t_H + t_L} = 1 - \frac{R_B}{R_A + 2R_B} \quad (3.5)$$

Al realizar pruebas con el circuito y revisar a detalle la hoja de especificaciones del mismo, nos percatamos de que el circuito no es capaz de proporcionar formas de onda con ciclos de trabajo menores al 50%, por lo que es imposible obtener el pulso con $\tau = 10\%$. Es por esto que se decidió generar un pulso con un $\tau = 90\%$ y posteriormente negarlo (invertirlo) con el uso de otro circuito.

Por tanto se realizaron los siguientes cálculos considerando $t=100\mu s$, $\tau = 90\%$, y $C=10nF$, empleando las formulas 3.1,-2 y -3:

$$t = 100\mu s = t_H + t_L = 90\mu s + 10\mu s$$

$$t_L = 10\mu s = 0.693(R_B)(10nF) \rightarrow R_B = \frac{10\mu s}{0.693 * 10nF} = 1.44 K\Omega$$

$$t_H = 90\mu s = 0.693(R_A + 1.44K\Omega)(10nF) \rightarrow R_A = \frac{90\mu s}{0.693 * 10nF} - 1.44K\Omega = 11.54 K\Omega$$

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

Obteniendo así valores para las resistencias, que debido a los valores nominales existentes de las resistencias en la implementación del generador de pulsos, mostrada en la figura 3.3, se emplearon los siguientes elementos:

$$R_A = 10 \text{ K}\Omega$$

$$R_B = 1.3 \text{ K}\Omega$$

$$C = 10 \text{ nF}$$

Y al utilizar una fuente de $V_{CC} = 5 \text{ V}$, se obtuvo de manera experimental la forma de onda mostrada en la figura 3.4, que presenta un voltaje pico-pico de 5 V aproximadamente ($V_{PP} = 4.64 \text{ V}$), una frecuencia de 9.8 KHz y un ciclo de trabajo de 90%. Logrando el objetivo de ésta sección pudiendo así pasar a la sección del amplificador óptico.

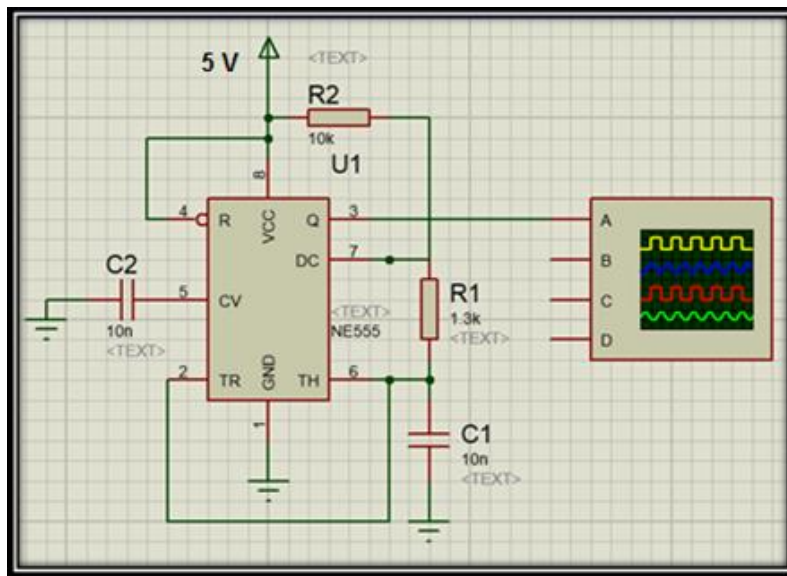


Figura 3.3 Implementación del generador de pulsos con valores nominales

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

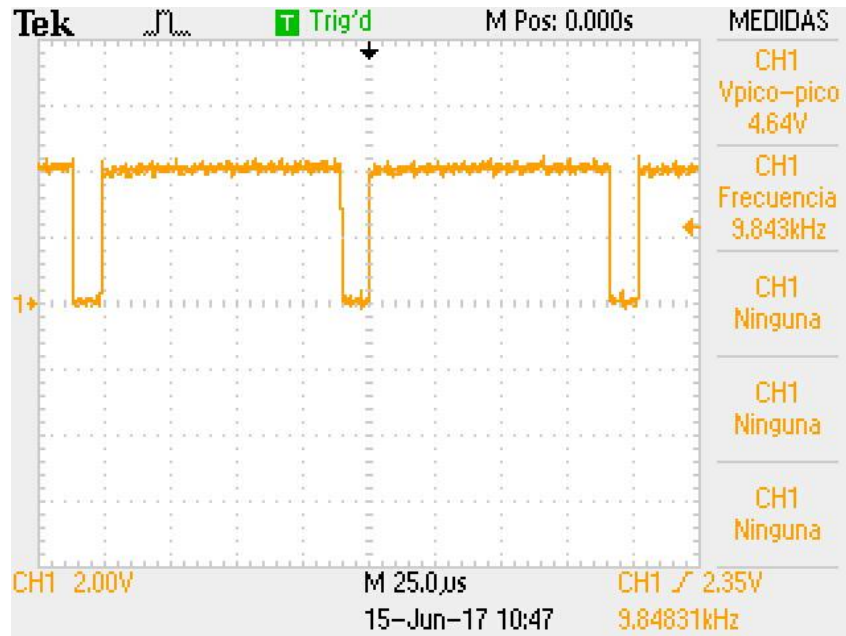


Figura 3.4 Forma de onda experimental del generador de pulsos.

3.5.2 Circuito inversor

El circuito inversor se implementa con la finalidad de obtener un tren de pulsos a un frecuencia de $f = 10$ KHz y un ciclo de trabajo de $\tau = 10\%$, lo cual es deseable para tener un bajo consumo de potencia.

Al tener el tren de pulsos con un ciclo de trabajo de 10% se puede transferir una gran cantidad de corriente eléctrica a los diodos de emisión infrarroja pero durante periodos muy pequeños de tiempo, con lo cual se evita dañar los componentes.

El inversor se encuentra a la salida del generador del tren de pulsos y a la entrada del divisor de frecuencia, tal y como se muestra en el diagrama a bloques del sistema en la figura 3.1 (siendo el bloque 2). De esa manera el tren de pulsos de $f = 10$ KHz y $\tau = 90\%$ que se obtiene del generador de pulsos se introduce al negador, en donde se invierte la forma de onda logrando obtener un tren de pulsos a un frecuencia de $f = 10$ KHz y un ciclo de trabajo de $\tau = 10\%$.

Se emplea un circuito amplificador basado en un transistor TBJ (tipo NPN, BC548B, cuya hoja de datos puede verse en [5]), el cual se muestra en la figura 3.5. En el circuito amplificador el transistor se encuentra en emisor común y en configuración de polarización fija, alimentado con una fuente de 5 V.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

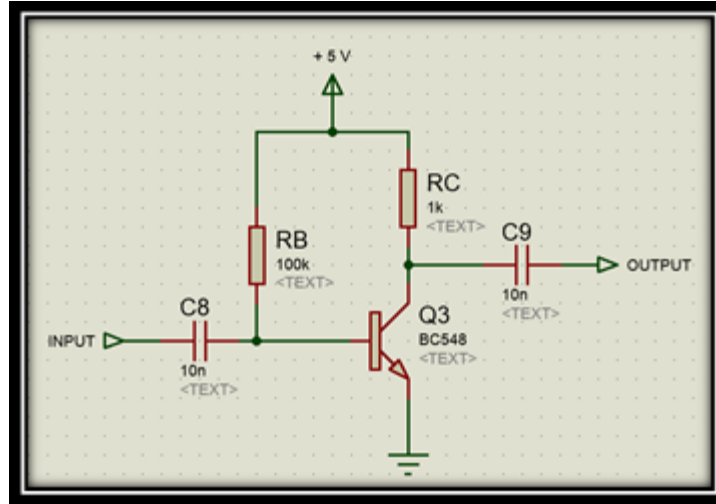


Figura 3.5 Circuito amplificador inversor basado en transistor TBJ (BC548B)

A continuación se presenta el análisis del circuito inversor, basado en transistor, donde se obtienen parámetros de interés del circuito, para lo cual se considerara una beta del transistor de $\beta=120$.

Primero se calcula la corriente de base, para posteriormente obtener la corriente de emisor:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5V - 0.7V}{100K\Omega} = 43 \mu A \quad (3.6)$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (120 + 1)(43 \mu A) = 5.16 mA \quad (3.7)$$

Después realiza el cálculo de la impedancia de entrada (Z_i) y el cálculo de la impedancia de salida (Z_o):

$$r_e = \frac{26 mV}{I_E} = \frac{26 mV}{5.16 mA} = 5.03 \Omega \quad (3.8)$$

$$Z_i = R_B || \beta r_e = 100k\Omega || (120 * 5.03\Omega) = 601.01 \Omega \quad (3.9)$$

$$Z_o = R_C || r_o \cong R_C = 1 K\Omega \quad (3.10)$$

Finalmente se calcula la ganancia del circuito, A_v :

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_C}{r_e} = \frac{1 K\Omega}{5.03\Omega} = -198 \quad (3.11)$$

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

Como se observa en la figura 3.5 la salida se obtiene en el terminal colector, debido a lo cual la forma de onda a la salida se encuentra desfasada 180° respecto a la forma de onda de entrada, cumpliendo con el objetivo de invertir el tren de pulsos obtenido del generador de tren de pulsos. En el oscilograma de la figura 3.6 se observa:

- Canal 1 (forma de onda amarilla): la señal obtenida del generador de pulsos, es decir, la entrada al circuito inversor, que es un tren de pulsos con un voltaje pico a pico de $V_{pp} = 4.64 V$, una frecuencia de $f \approx 10 KHz$ y un ciclo de trabajo de $\tau = 90\%$.
- Canal 2 (forma de onda azul): la señal a la salida del circuito inversor, que es un tren de pulsos con un voltaje pico a pico de $V_{pp} = 4.88V$, una frecuencia de $f \approx 10 KHz$ y un ciclo de trabajo de $\tau = 10\%$.

Las cuales no presentan distorsión significativa para nuestra aplicación, por lo que es la señal que ocuparemos para la transmisión.

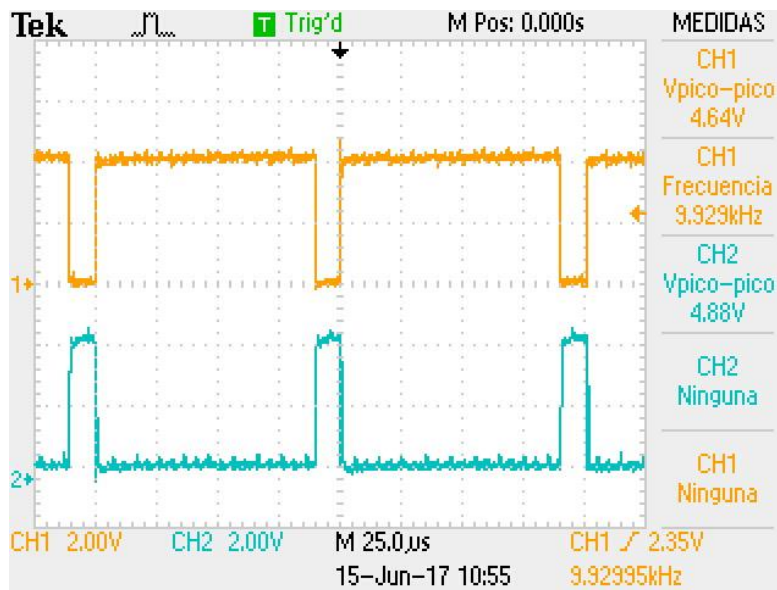


Figura 3.6 Formas de onda en el inversor basado en un transistor TBJ

3.5.3 Diseño del sistema TDM

Para la implementación del TDM fue necesario emplear un divisor de frecuencia, un contador de 4 bits y un multiplexor/demultiplexor analógico.

Cómo se mencionó anteriormente se necesita que el reloj del TDM esté sincronizado con el pulso de entrada a los amplificadores ópticos, para lo cual el tren de pulsos de 10 KHz, obtenido en la

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

sección anterior con el circuito inversor, se hace pasar a través de un divisor de frecuencia para obtener un tren de pulsos de 2.5 KHz.

Por tanto se realizó un divisor de frecuencias de razón $\frac{1}{4}$ con la ayuda del circuito integrado 74LS73, cuya hoja de datos puede verse en [6], mejor conocido como JK-Flip-Flop, el cual se alimenta con una fuente de 5 volts. El divisor de frecuencias puede ser construido fácilmente a partir de J -K flip-flops mandando la salida de un chip a la entrada de reloj del siguiente; las entradas J y K de cada flip-flop se ponen en alto (Vcc) para producir un conmutador en cada ciclo de la entrada de reloj. Así para cada dos ciclos del primer chip, una conmutación se produce en el segundo chip y así sucesivamente, cómo se observa en la figura 3.7.

En la figura 3.8 puede observarse la división de frecuencia obtenida experimentalmente, en el canal 2 (forma de onda azul) se tiene el tren de pulsos de 10 KHz con $\tau=10\%$ y en el canal 3 (forma de onda morada) se tiene el pulso de 2.5 KHz, claramente se observa como por cada 4 ciclos de la señal mostrada en el canal 2 se tiene un ciclo en la señal del canal 3. Presentando casi el mismo voltaje pico-pico.

La salida del divisor de frecuencia se ingresa al contador, para el cual se emplea el circuito 74LS163, cuya hoja de datos puede verse en [7], alimentado con una fuente de 5 volts. El circuito integrado 74LS163 es un contador binario de 4 bits que por medio de sus entradas se puede controlar su funcionamiento configurándolo en cualquiera de los siguientes modos:

1. **Contador:** El valor de sus salidas se incrementa en 1. El rango de conteo es del 0 al 15.
2. **Carga paralela:** Las salidas toman el valor de las entradas de carga.
3. **Reset:** El valor de las salidas se vuelve cero.
4. **Mantener:** No se modifica el valor de la salida.

Todas las funciones del 74LS163 son síncronas, es decir, se requiere que se presente la señal de reloj para que se ejecuten, por esto se ingresa el pulso de 2.5 KHz que determina la velocidad del sistema TDM.

En la figura 3.9 puede observarse la distribución de las terminales del circuito integrado, así como su tabla de verdad.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

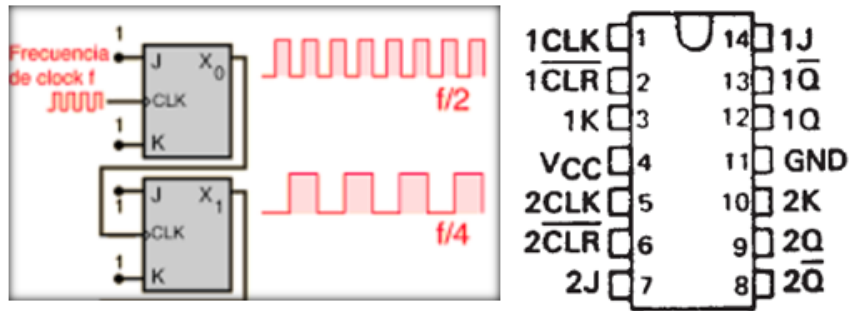


Figura 3.7 Descripción gráfica del divisor de frecuencias con JK Flip-Flop. Distribución de terminales del 74LS73

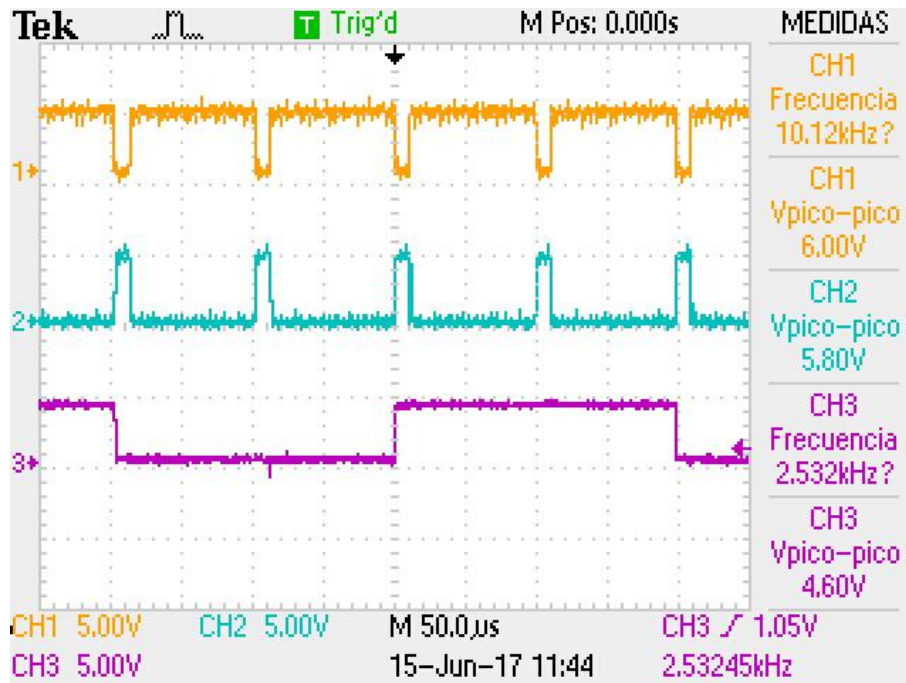


Figura 3.8 Formas de onda del divisor de frecuencias obtenidas experimentalmente

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

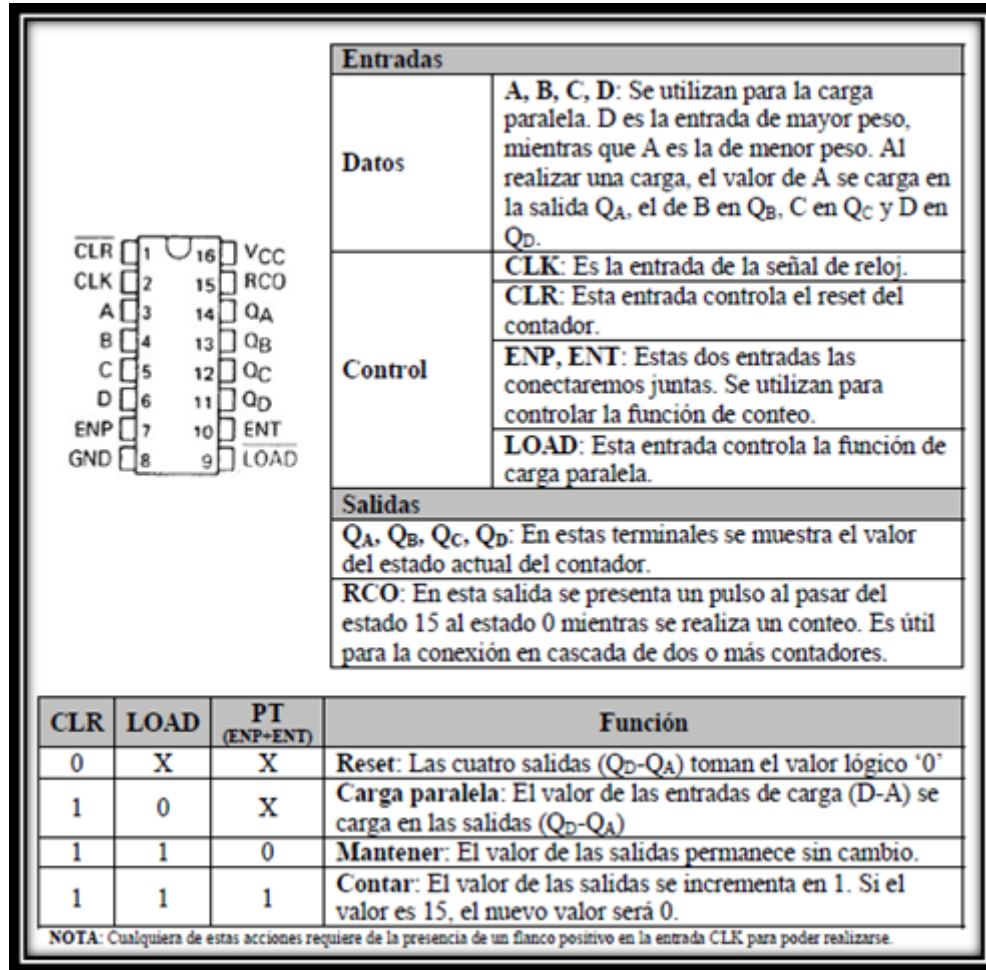


Figura 3.9 Especificaciones del contador binario de 4 bits (74LS163)

Las 4 salidas que nos proporciona el contador, Q_A, Q_B, Q_C y Q_D, se utilizan para controlar el circuito integrado CD4067BE, cuya hoja de datos puede verse en [8], que es un demultiplexor analógico de 16 canales con 4 entradas binarias de control y una inhibidora. El demultiplexor analógico se configura de manera tal que cualquier combinación de las entradas realiza un cambio en la salida, es decir, conmuta la forma de onda de entrada entre las 16 salidas. El circuito integrado CD4067BE requiere una alimentación de 5 volts. La distribución de las terminales del CD4067BE puede observarse en la figura 3.10.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

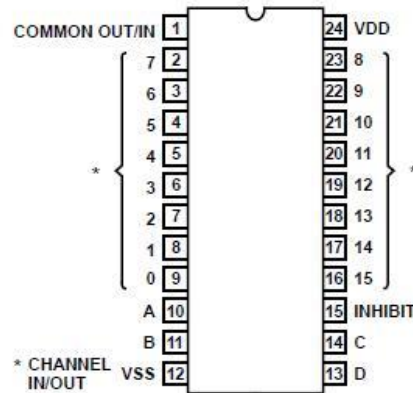


Figura 3.10 Distribución de terminales del CD4067BE, demultiplexor analógico

En la figura 3.11 puede observarse la forma de onda que se tiene a la entrada del demultiplexor analógico en el canal 2 (forma de onda azul) y la forma de onda a la salida del demultiplexor analógico en el canal 4 (forma de onda verde). Como puede observarse a la entrada se tiene el tren de pulsos de 10 KHz que viene del circuito inversor y en la salida solo se observa uno de los canales del demultiplexor analógico, el cual contiene 4 periodos del tren de pulsos, esto debido a la frecuencia del reloj del TDM que es de 2.5 KHz.

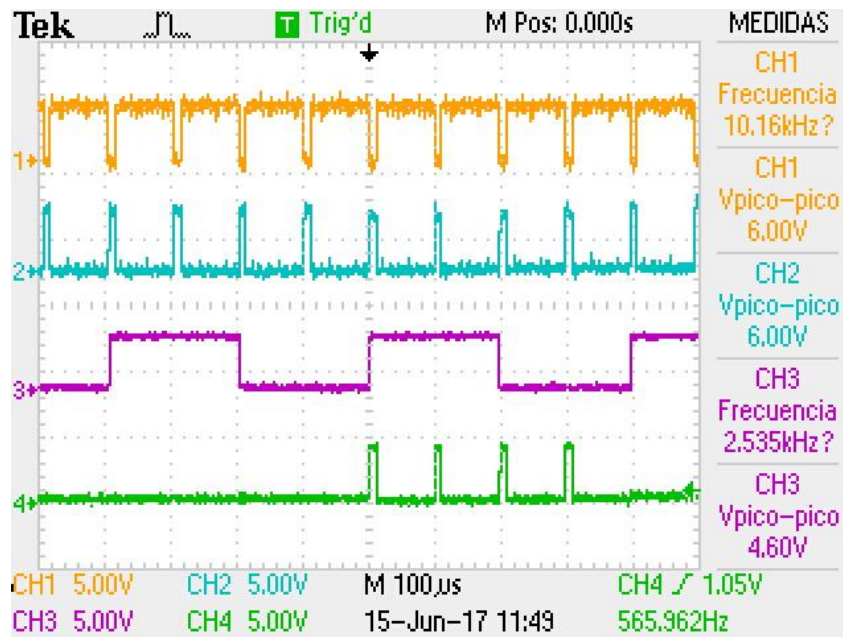


Figura 3.11 Formas de onda a la entrada y salida del multiplexor analógico

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

Así termina la etapa de TDM, en dónde se obtienen las 16 salidas que van a los 16 amplificadores ópticos, en la figura 3.12 pueden observarse 4 de los 16 canales del TDM dónde puede comprobarse que el demultiplexor analógico hace su trabajo de manera correcta.

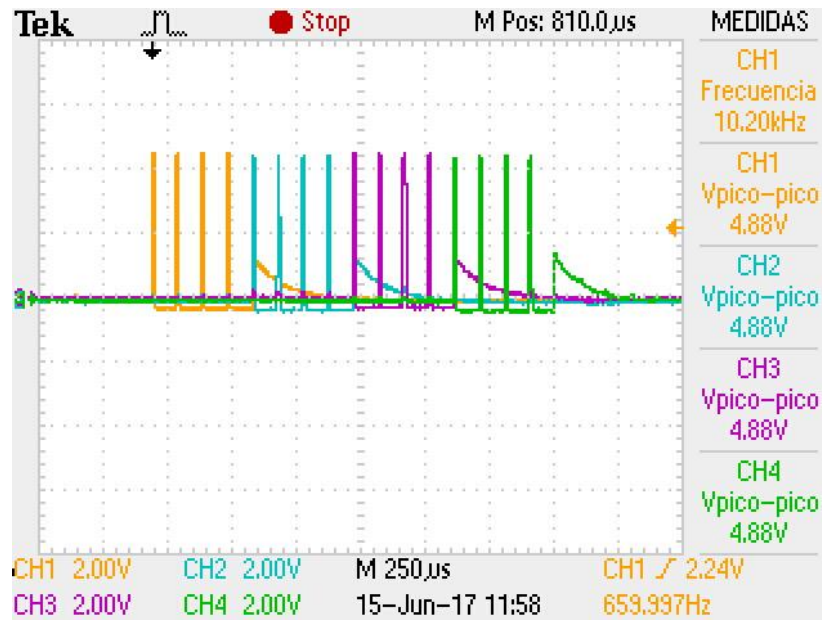


Figura 3.12 Cuatro canales del sistema TDM

3.5.4 Pre-amplificador: Acoplamiento de impedancias del multiplexor analógico con el amplificador de corriente

La etapa de acoplamiento de impedancias entre el demultiplexor analógico y el circuito amplificador de corriente, se hace necesaria dado que la baja corriente entregada por el circuito demultiplexor analógico (CD4067BE), 5 μ A a $T=25^{\circ}\text{C}$, no es capaz de alimentar los 16 circuitos amplificadores presentes. Además de que el circuito amplificador de corriente de LED en configuración de seguidor emisor genera una corriente grande, la cual al realizar la conexión entre el amplificador y el demultiplexor se infiltra en dicho circuito y genera que toda la corriente del sistema se caiga.

Por tanto la función principal de ésta etapa es acoplar la impedancia de salida del demultiplexor con la impedancia de entrada del circuito amplificador de corriente, logrando así una máxima transferencia de potencia.

Para lograr el objetivo se emplea un circuito basado en un transistor de unión bipolar (BC548) en configuración de seguidor de emisor mostrada en la figura 3.13. Al ser un seguidor emisor tiene una ganancia en voltaje menor a uno y la salida se encuentra en fase con la entrada, pero lo más

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

importante es que su impedancia de entrada es grande, por lo que demanda una corriente baja, y su impedancia de salida es pequeña con lo cual ayuda al acoplamiento de impedancias entre la salida del demultiplexor analógico y la entrada del amplificador de corriente.

Esta aplicación es importante en la amplificación de señales que presentando un nivel de tensión suficientemente alto (~1V) son de muy baja potencia y por tanto se atenuarían en el caso de conectarlas a amplificadores de mediana o baja impedancia de entrada.

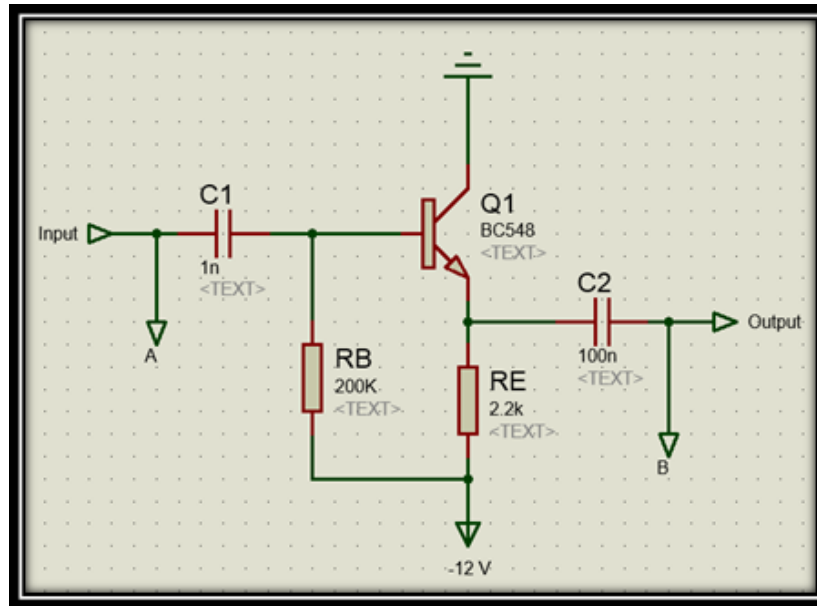


Figura 3.13 Circuito seguidor emisor empleado para el pre-amplificador

A continuación se presenta el análisis del circuito preamplificador en donde se obtienen parámetros de interés del circuito, para lo cual se considerara una beta del transistor de $\beta=120$.

Primero se calcula la corriente de base, para posteriormente obtener la corriente de emisor:

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{12V - 0.7V}{200K\Omega + (120 + 1)2.2K\Omega} = 24.23 \mu A \quad (3.12)$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (120 + 1)(24.23 \mu A) = 2.93 mA \quad (3.13)$$

Después realiza el cálculo de la impedancia de entrada (Z_i) y el cálculo de la impedancia de salida (Z_o):

$$r_e = \frac{26 mV}{I_E} = \frac{26 mV}{2.93 mA} = 8.86 [\Omega] \quad (3.14)$$

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

$$Z_b = \beta r_e + (\beta + 1)R_E = (120 \times 8.86\Omega) + (120 + 1)2.2K\Omega = 267.26 [K\Omega] \quad (3.15)$$

$$Z_i = R_B || Z_b = 200k\Omega || 267.26K\Omega = 114.39 [K\Omega] \quad (3.16)$$

$$Z_o = R_E || r_e = 2.2K\Omega || 8.86\Omega = 8.82 [\Omega] \quad (3.17)$$

Finalmente se calcula la ganancia del circuito, A_v :

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_E}{R_E + r_e} = \frac{2.2K\Omega}{2.2K\Omega + 8.86\Omega} = 0.99 \quad (3.18)$$

Se realizaron mediciones en los puntos (A y B) descritos en la figura 3.13 y a continuación se muestran los resultados. En la figura 3.14 se muestran las formas de onda:

- Canal 1 (forma de onda amarilla): el tren de pulsos de frecuencia $f \approx 10 \text{ KHz}$ y ciclo de trabajo $\tau = 10\%$ obtenido a la salida del circuito inversor, presentando una amplitud de $V = 5.6 \text{ V}_{PP}$.
- Canal 2 (forma de onda azul): señal obtenida en el punto de medición A de la figura 3.13, que corresponde a una salida del demultiplexor, presentando una amplitud de $V = 5 \text{ V}_{PP}$.
- Canal 3 (forma de onda morada): señal obtenida en el punto de medición B de la figura 6, que corresponde a la salida del pre-amplificador, presentando una amplitud de $V = 4 \text{ V}_{PP}$.

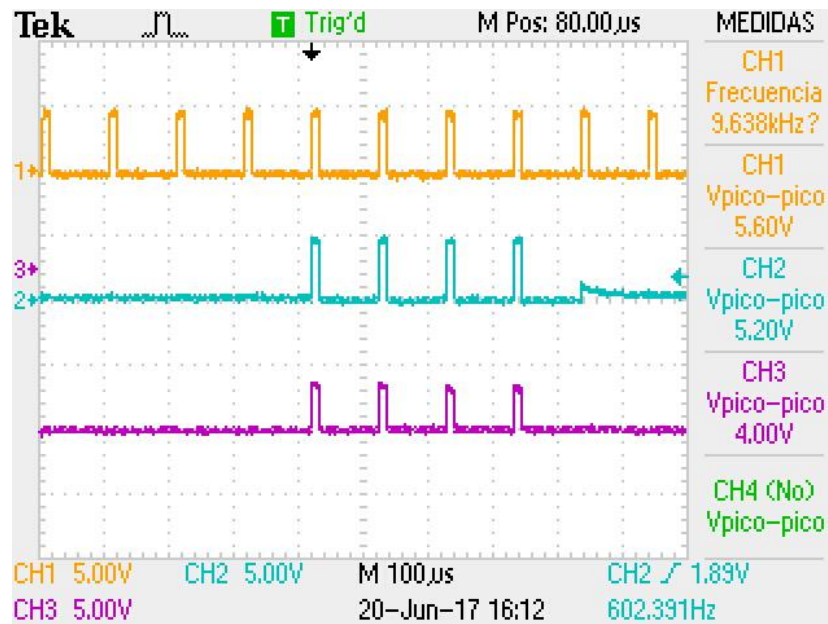


Figura 3.14 Formas de onda en el demultiplexor y pre-amplificador

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

Aunque aún se observa un poco de distorsión en el pulso, la señal es aceptable para nuestros fines.

3.5.5 Amplificador de corriente de LED

El amplificador se hace necesario debido a que la corriente a la salida del demultiplexor analógico es insuficiente para encender el diodo LED y que posteriormente sea correctamente detectada en el receptor. Por tanto el objetivo del amplificador es suministrar una corriente eléctrica a cada LED lo suficientemente grande como para tener una potencia óptica radiada capaz de ser transmitida por la fibra óptica y ser detectada por el receptor, dicha corriente fue propuesta por el tutor de 100 mA.

Cabe mencionar que se empleó un diodo LED modelo IR383 de la marca Everlight, cuya hoja de datos puede verse en [9], el cual consume aproximadamente 1.4 V y que, en condiciones máximas, el dispositivo puede soportar una corriente pico de 1 ampere cuando la señal de alimentación es un pulso con periodo igual a 100 μ s y con un ciclo de trabajo de 1%. También es importante mencionar que al trabajar con la corriente de 100 mA, lo cual equivale al 10% de la corriente máxima soportada por el LED, es posible tener un ciclo de trabajo 10 veces más grande.

Se diseñaron y probaron diversos circuitos amplificadores en configuración de emisor común, seguidor emisor y con polarizaciones de tipo fija y estabilizada por divisor de voltaje, pero no presentaron resultados óptimos. En algunos casos la corriente de DC presentada por el circuito era lo suficientemente grande como para mantener el LED encendido en todo momento y no respetaba la función del TDM.

Al final se decidió emplear un circuito emisor seguidor estabilizado por divisor de voltaje; cabe mencionar que como su nombre lo indica la señal de salida sigue a la señal de entrada, por lo que éstas se encuentran en fase.

Una de las razones por las que se optó por emplear una polarización por medio del divisor del voltaje es debido a que es un circuito de polarización que es independiente de la beta del transistor, lo cual implica que tanto la corriente de polarización I_{CQ} como el voltaje V_{CEQ} pueden ser independientes de la ganancia de corriente del transistor, β , a diferencia de otros circuitos de polarización. Esto es muy conveniente, puesto que el parámetro β es muy sensible a los cambios de temperatura, además de que no se tiene un valor completamente definido para éste. Así el nivel de I_{BQ} cambiará con el cambio en beta, pero el punto de operación en las características definidas por I_{CQ} y V_{CEQ} puede permanecer fijo si se emplean los parámetros de circuito correcto [10].

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

El circuito está basado en un transistor tipo Darlington NPN de potencia (TIP102, cuya hoja de datos puede verse en [11]), del cual se muestra su diagrama de conexiones y su circuito equivalente en la figura 3.15. Este transistor tiene un voltaje base-emisor de $V_{BE} = 1.4 \text{ V}$, dado que como se observa en su circuito equivalente cuenta con dos transistores en cascada.

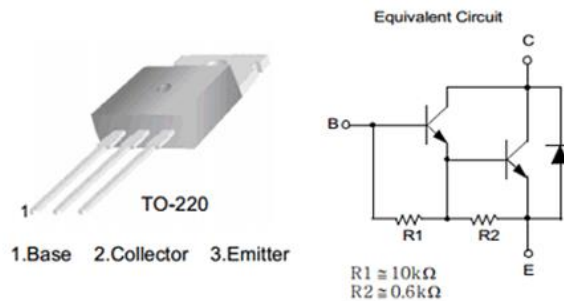


Figura 3.15 Diagrama de conexiones del transistor Darlington NPN (TIP102)

Diseño del circuito amplificador de corriente del LED

En esta sección se presenta el análisis *por el método exacto* del circuito amplificador de corriente de LED empleado, el cual se muestra en la figura 3.16.

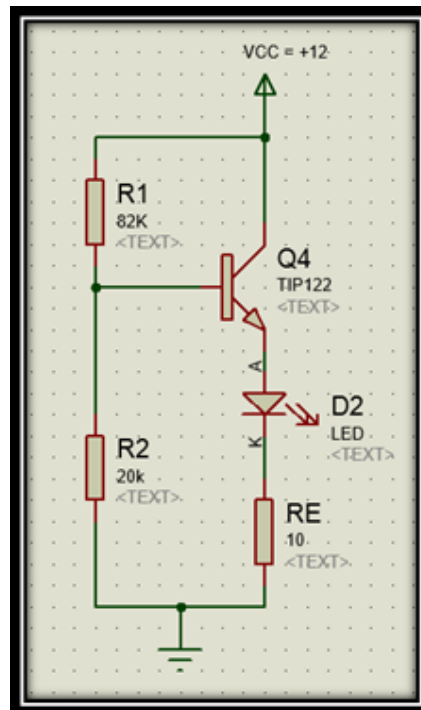


Figura 3.16 Circuito amplificador de corriente basado en transistor Darlington NPN (TIP102)

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

Para el análisis de cd de la red de la figura 3.16, la entrada de ésta se vuelve a dibujar entonces como se muestra en la figura 3.17a. La red equivalente de Thévenin de la red la izquierda de la terminal base del transistor se determina de la siguiente manera:

- Para la resistencia de Thévenin, R_{TH} , la fuente de voltaje se reemplaza con un equivalente de cortocircuito como se muestra en la figura 3.17b quedando:

$$R_{TH} = R_1 || R_2 \quad (3.19)$$

- Para la fuente, E_{TH} , fuente de voltaje V_{CC} se regresa a la red y el voltaje de Thévenin de circuito abierto de la figura 3.17c se determina con un divisor de voltajes de la siguiente manera:

$$E_{TH} = V_{R2} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (3.20)$$

Por tanto la red de Thévenin equivalente de cd de la figura 3.16 es la que se muestra en la figura 3.17d. Al aplicar la Ley de Voltajes de Kirchhoff al circuito de entrada obtenemos:

$$E_{TH} - I_B R_{TH} - V_{BE} - I_E R_E = 0 \quad (3.21)$$

La corriente de emisor está relacionada con la corriente de base de la siguiente manera:

$$I_E = (\beta + 1) I_B \quad (3.22)$$

Sustituyendo I_E en la ecuación 3.21 y resolviendo para I_B :

$$I_B = \frac{E_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) R_E} \quad (3.23)$$

Finalmente para la malla de salida se tiene que:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E R_E \quad (3.24)$$

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

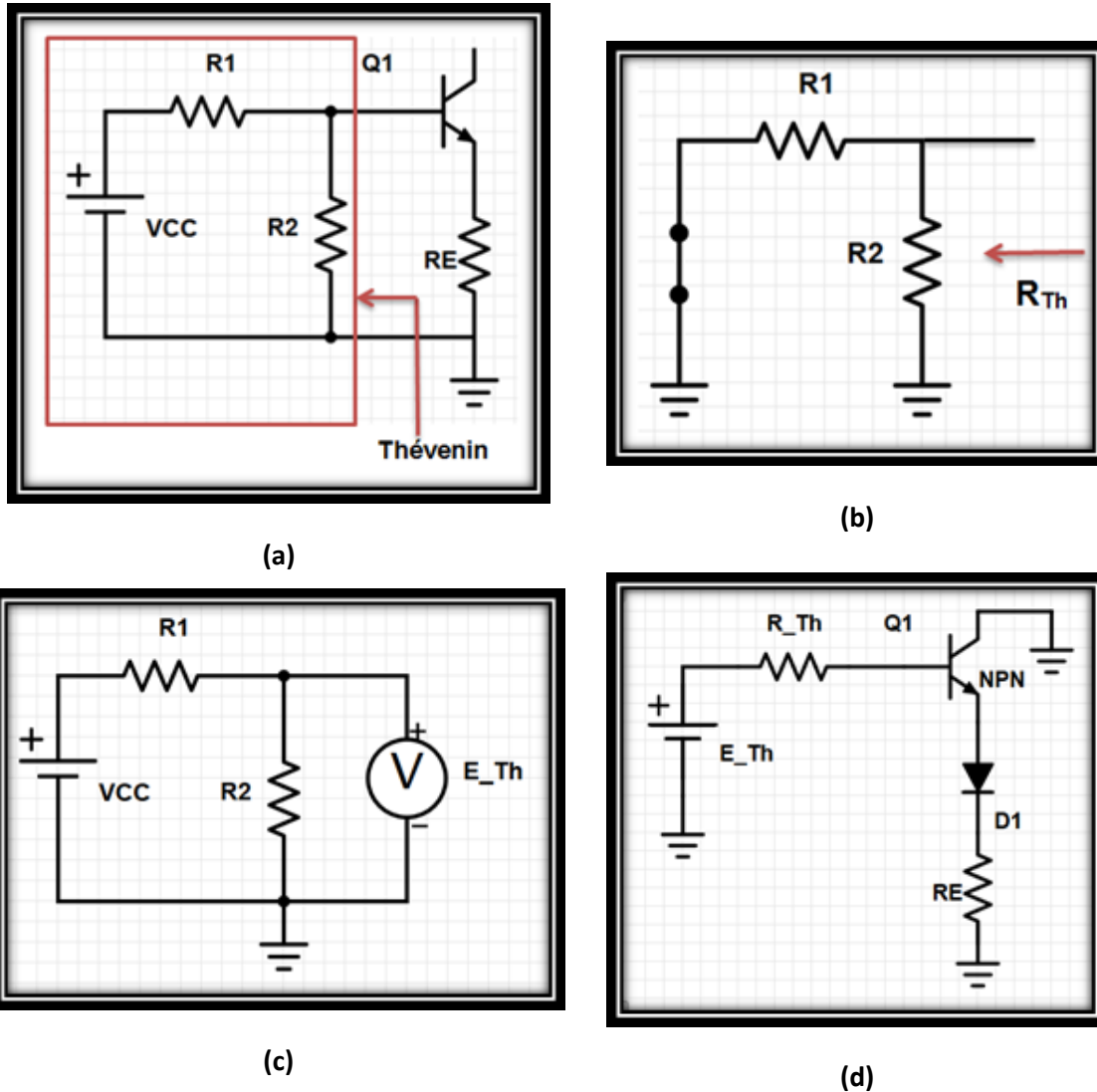


Figura 3.17 (a) Nuevo trazo del lado de entrada de la red de la figura 3.16 (b) Determinación de R_{Th} (c) Determinación de E_{Th} (d) Inserción del circuito equivalente de Thévenin

Implementación del amplificador

Para la implementación del amplificador, la primera consideración que se tuvo fue el voltaje mínimo necesario para encender el LED, el cual resultó ser de $V_{LED} = 1.2 V$, esto con la finalidad de que el LED solo encienda en la presencia de señal a la entrada del amplificador y no simplemente por la corriente proporcionada por la polarización del transistor. Esto conlleva a tener un voltaje de Thévenin:

$$E_{Th} = V_{LED} + V_{BE} = 1.2V + 1.4V = 2.6 V \quad (3.25)$$

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

El primer elemento que se propuso fue una resistencia $R_2 = 20 \text{ K}\Omega$, con la cual se calculó el valor de R_1 . Sustituyendo el valor de E_{TH} y R_2 en la ecuación 3.20 y considerando una fuente de $V_{CC} = 12 \text{ V}$ se resuelve para R_1 :

$$R_1 = \frac{R_2 * (V_{CC} - E_{TH})}{E_{TH}} = \frac{20\text{K}\Omega * (12\text{V} - 2.6\text{V})}{2.6\text{V}} = 72.3\text{K}\Omega \quad (3.26)$$

Debido a los valores nominales de las resistencias se consideró una resistencia $R_1 = 82 \text{ K}\Omega$. Para la resistencia de emisor, dado que se desea una corriente grande se seleccionó una resistencia pequeña $R_E = 10 \Omega$. Posteriormente mediante las ecuaciones 3.23 y 3.19 y considerando $\beta=1000$, se obtiene la corriente de base.

$$I_B = \frac{2.6\text{V} - 1.4\text{V}}{16.07\text{K}\Omega + (1000 + 1) * 10\Omega} = 45.99 \mu\text{A}$$

Y empleando la ecuación 3.22 se obtiene la corriente de emisor:

$$I_E = 45.99\mu\text{A} * 1001 = 46.04 \text{ mA}$$

La potencia disipada por el circuito, considerando la corriente de emisor $I_E = I_{LED} = 46.04\text{mA}$, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P_0 = R_E(I_E^2) \quad (3.27)$$
$$P_0 = 10\Omega * (46.04\text{mA})^2 = \mathbf{21.19 \text{ mW}}$$

Lo cual cumple con el requerimiento de que el sistema sea de bajo consumo.

Finalmente se hicieron las pruebas del circuito, en la figura 3.18 se tiene el diagrama eléctrico de la conexión entre el demultiplexor, el pre-amplificador y el amplificador (nombrados por orden de aparición).

En la figura 3.19 se muestran las formas de onda obtenidas en los puntos de medición A, C y D marcados en la figura 3.18:

- Canal 1 (forma de onda amarilla): la forma de onda en la entrada del demultiplexor (punto de medición A) que es el tren de pulsos de frecuencia $f \approx 10 \text{ KHz}$ y ciclo de trabajo $\tau = 10\%$, presentando una amplitud de $V = 5.36 \text{ V}_{PP}$
- Canal 2 (forma de onda azul): la forma de onda a la salida del pre-amplificador (punto de medición C), que son 4 periodos del tren de pulsos presentando una amplitud de $V = 4.32 \text{ V}_{PP}$

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

- Canal 3 (forma de onda rosa): la forma de onda a la salida del amplificador de corriente (punto de medición D), que corresponde al voltaje que cae en la resistencia del emisor, presentando una amplitud de $V = 2.32 V_{pp}$. Vemos que la amplitud disminuye, esto se debe a que en el emisor seguidor la ganancia en voltaje es menor a uno.

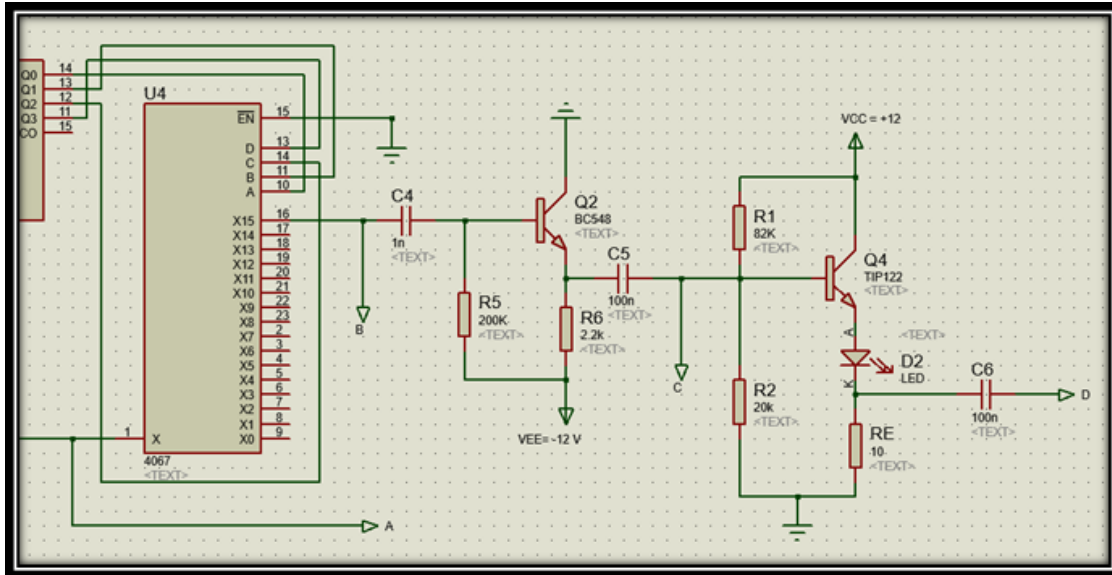


Figura 3.18 Diagrama eléctrico de la conexión del demultiplexor, el pre-amplificador y el amplificador de corriente

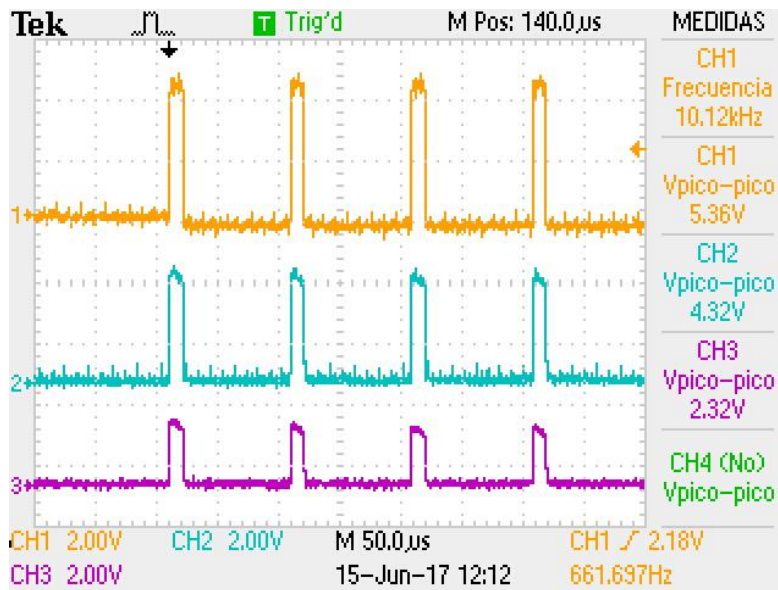


Figura 3.19 Formas de onda presentes en un canal del transmisor

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

Cómo se mencionó, el canal 3 del oscilograma de la figura 3.19 corresponde al voltaje que cae en la resistencia de emisor, por tanto la corriente que circula por dicha resistencia se puede calcular aplicando ley de ohm de la siguiente manera:

$$I_{R10} = \frac{V_{RMS}}{R_{10}} = \frac{2.32V_{PP}}{10\Omega} = 232 \text{ mA} \quad (3.28)$$

Cabe mencionar que la corriente que circula en la resistencia de 10 Ω es la misma que circula a través del LED.

Pese a que se logró disminuir la distorsión presentada en el pulso y se aumentó la corriente del LED considerablemente, el sistema no es lineal, sin embargo para fines de éste proyecto no es de suma importancia, puesto que se trabaja de manera pulsátil.

3.5.6 Diagrama eléctrico del transmisor óptico

En la figura 3.20 puede observarse el diagrama eléctrico del transmisor óptico, implementando un solo canal.

El diagrama eléctrico del transmisor óptico consiste de:

1. GENERADOR DE TREN DE PULSOS: es un circuito integrado NE555 de Texas Instruments alimentado con $V= 5 \text{ V}$ y el cual tiene conectado en sus terminales $R_1 = 1.3 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ K}\Omega$, $C_1 = C_2 = 10 \text{ nF}$.
2. CIRCUITO INVERSOR: amplificador basado en un transistor TBJ (BC548B de Fairchild). En el circuito amplificador el transistor se encuentra en emisor común y en configuración de polarización fija, alimentado con una fuente de 5 V. Tiene conectado en sus terminales $R_B = 100 \text{ K}\Omega$, $R_C = 1 \text{ K}\Omega$, $C_8 = C_9 = 10 \text{ nF}$.
3. DIVISOR DE FRECUENCIA: se encuentra dividiendo a razón de 4:1 y consiste de un circuito integrado 74LS73 (JK flip-flop) de Texas Instruments alimentado de igual manera con $V= 5 \text{ V}$.
4. CONTADOR DE 4 BITS: compuesto por el circuito integrado 74LS163 de Texas Instruments alimentado con $V= 5 \text{ V}$, cuyas salidas conectan al multiplexor analógico para controlar la conmutación.
5. MULTIPLEXOR ANALÓGICO: esta función es realizada por el circuito integrado de Texas Instruments CD4067BE, que es un multiplexor analógico de 16 canales con 4 entradas binarias de control y una inhibidora, dispuesto de manera que cualquier combinación de las entradas realiza un cambio en la salida, es decir, conmuta entre las 16 salidas la entrada. Se encuentra alimentado con 5 V.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

6. PRE-AMPLIFICADOR: es un circuito basado en un transistor de unión bipolar (BC548 de Fairchild) en configuración de seguidor de emisor, alimentado por una fuente de -12 V. Tiene conectado en sus terminales $R_B = 200\text{ K}\Omega$, $R_E = 2.2\text{ K}\Omega$, $C_1 = 1\text{ nF}$, $C_2 = 100\text{ nF}$.
7. AMPLIFICADOR DE SEÑAL DÉBIL: o amplificador de corriente, es un circuito emisor seguidor estabilizado por divisor de voltaje y está construido por un transistor tipo Darlington NPN de potencia (TIP102) de la marca de Fairchild. El circuito está alimentado con una fuente de $V=12\text{ V}$ y tiene conectado en sus terminales $R_1 = 82\text{ K}\Omega$, $R_2 = 20\text{ K}\Omega$, $R_E = 10\ \Omega$ y un diodo LED Everlight infrarrojo ($\lambda = 940\text{nm}$).

Para la implementación de los 16 canales únicamente se repitió la parte del circuito seguidor de tensión y amplificador de potencia. Es decir, a partir del demultiplexor analógico (chip CD4067BE) cada una de sus 16 salidas se conectó a la entrada de un réplica del pre-amplificador y posteriormente la salida de éste se conectó a la entrada de una réplica del amplificador de corriente de LED, logrando así el transmisor óptico con sistema TDM de 16 canales.

En la figura 3.21 se muestra un diagrama de estados del transmisor óptico, donde se observa las señales presentadas en el generador de pulsos, en el contador y en cada uno de los 16 canales.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

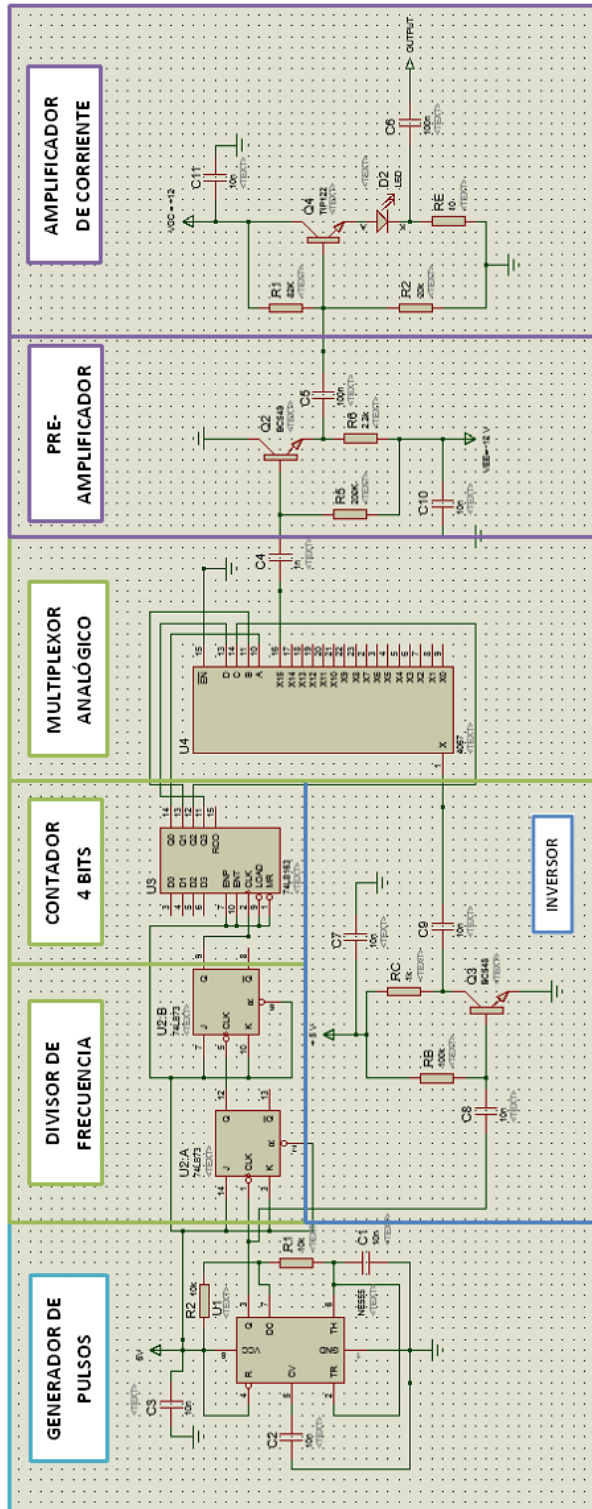


Figura 3.20 Diagrama eléctrico del Transmisor óptico, implementando un canal TDM

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

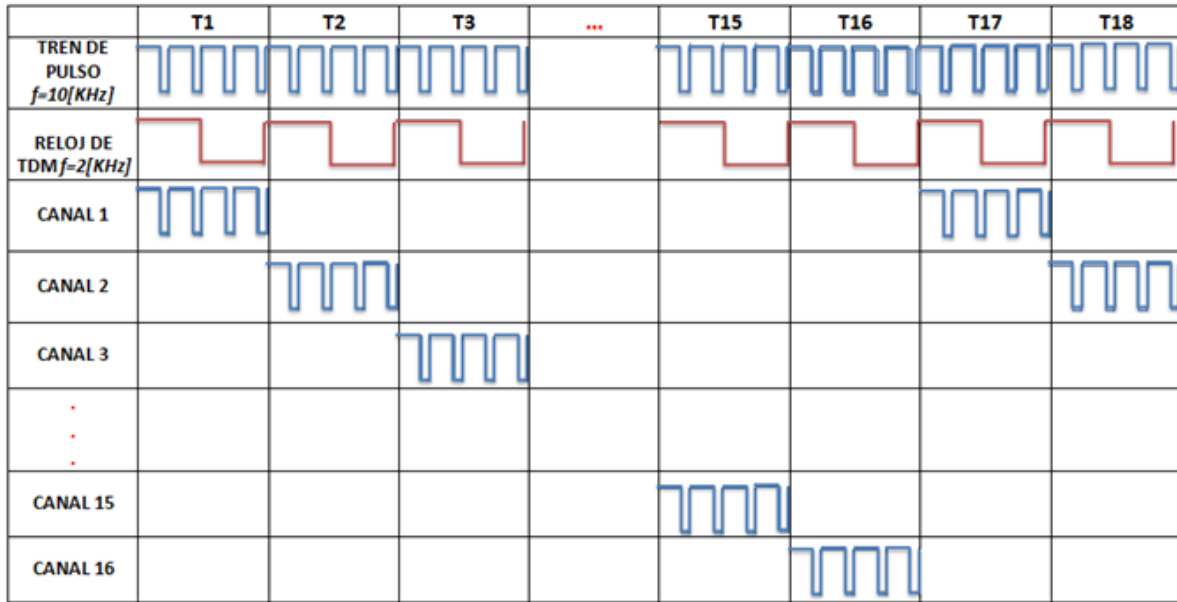


Figura 3.21 Diagrama de estados del transmisor óptico

3.5.7 Medición del consumo de corriente

Se realizó la medición de consumo de corriente por bloques del transmisor óptico obteniendo las siguientes mediciones:

- GENERADOR DE TREN DE PULSOS: el bloque tiene un circuito integrado NE555 que con una alimentación de $V = 5\text{ V}$ consume $I = 1.98\text{ mA}$.
- CIRCUITO INVERSOR: es un circuito basado en un transistor de unión bipolar BC548B alimentado con $V = 5\text{ V}$, el cual consume $I = 4.20\text{ mA}$
- DIVISOR DE FRECUENCIA: el bloque tiene un circuito integrado 74LS73 que con una alimentación de $V = 5\text{ V}$ consume $I = 3.35\text{ mA}$.
- CONTADOR: el bloque tiene un circuito integrado 74LS16 que con una alimentación de $V = 5\text{ V}$ consume $I = 17\text{ mA}$.
- MULTIPLEXOR ANALÓGICO: el bloque tiene un circuito integrado CD4067BE que con una alimentación de $V = 5\text{ V}$ consume $I = 0.1\text{ mA}$
- PREAMPLIFICADOR: es un circuito basado en un transistor de unión bipolar BC548B alimentado con $V = -12\text{ V}$, el cual consume $I = 0.1\text{ mA}$. El transmisor contiene en su totalidad 16 bloques de preamplificadores por lo que en su totalidad consume de la fuente de $V = -12\text{ V}$ una corriente de $I \sim 1.6\text{ mA}$.
- AMPLIFICADOR DE CORRIENTE: el bloque tiene un circuito emisor seguidor que con una alimentación de $V_{cc} = 12\text{ V}$ consume una corriente de $I = 3.5\text{ mA}$. El transmisor tiene en

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

total 16 bloques amplificadores de corriente por lo que en su totalidad consume una corriente de $I \sim 56$ mA.

3.6 Diseño del receptor óptico

En esta sección se describe el diseño del receptor óptico, es decir, la parte del sistema que se encuentra después de la fibra óptica.

El receptor constituye la parte más crítica de un sistema pues es el que determina la sensibilidad requerida por el sistema para su correcto funcionamiento, al igual que determina la fidelidad proporcionada por el sistema.

Está compuesto por un detector de semiconductor, un bloque de amplificación y un bloque de regeneración de la señal. El detector convierte la señal óptica en una corriente eléctrica, después la señal eléctrica es transformada en una señal de tensión que se amplifica (bloque de amplificación) y se regenera (bloque de regeneración).

El proceso de diseño del receptor óptico fue un poco diferente al utilizado para diseñar el transmisor óptico, esto debido a que la mayoría de los simuladores comerciales de circuitos eléctricos no tienen la opción de simular dispositivos ópticos, y el desconocimiento del software especializado dificulta la posibilidad de usar una herramienta tan útil en el diseño de circuitos como lo es la simulación de los mismos. Es por ello que la metodología consistió esencialmente en el desarrollo, implementación y experimentación de hipótesis basadas en los conocimientos que se tienen sobre el funcionamiento de los elementos foto-receptores. Así se fue recopilando conocimiento y experiencia que sirvió para perfeccionar las hipótesis.

Entonces como se mencionó el receptor debe de tener una buena sensibilidad para que pueda ser capaz de detectar la señal transmitida por la fibra. La señal transmitida se trata de 4 periodos de un pulso de 10 KHz y un ciclo de trabajo de 10% mostrada en la figura 3.12, la cual sufrirá atenuación y dispersión a través de la fibra.

A continuación se detallan los bloques del receptor correspondientes al detector y al amplificador.

3.6.1 Detector óptico

El detector óptico es un componente esencial de un sistema de comunicaciones por fibra óptica y es uno de los elementos cruciales que determinan el rendimiento general del sistema. Su función es convertir la señal óptica recibida en una señal eléctrica.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

El papel que desempeña el detector requiere que se cumplan requisitos muy estrictos de rendimiento y compatibilidad. Algunas exigencias técnicas en esta aplicación para el detector son [12]:

- Alta sensibilidad, en un rango entre 50[dB] y 70[dB], para la región de trabajo para la que se diseña.
- Alta fidelidad, es decir, reproducción exacta de la señal óptica en un amplio margen. Para la transmisión analógica la respuesta del fotodetector debe ser lineal con respecto a la señal óptica.
- Alta respuesta eléctrica a la señal óptica recibida. El fotodetector debe producir una señal eléctrica máxima para una determinada potencia óptica, es decir, la eficiencia cuántica debe ser alta.
- Bajo tiempo de respuesta para obtener un ancho de banda adecuado, puesto que trabajamos en frecuencias de decenas de KHz.
- Bajo ruido. La corriente oscura y de fuga del fotodetector deben ser bajas. También el mecanismo de ganancia dentro del detector o los circuitos asociados deben ser de bajo nivel de ruido.
- Estabilidad frente a alteraciones de las condiciones ambientales.
- Baja tensión de funcionamiento, lo que implica un consumo mínimo de potencia.
- Pequeño tamaño, compatible con la conexión a la fibra óptica.
- Fiabilidad. El detector debe ser capaz de operar de manera continua y estable a una temperatura ambiente por muchos años.
- Bajo coste, esto es importante si se piensa en la reproducción en masa del sistema y la competitividad con otros sistemas existentes.

Para detectar la radiación óptica en la región del infrarrojo cercano del espectro se puede utilizar tanto la fotoemisión externa e interna de electrones. En la mayoría de los sistemas actuales de comunicación por fibra óptica se emplean los dispositivos de fotoemisión interna esto debido a que estos dispositivos proporcionan un buen rendimiento y un bajo coste.

Los fotodiodos semiconductores con o sin ganancia interna (avalancha), son dispositivos de fotoemisión interna que están hechos de semiconductores tales como silicio, germanio y diversas aleaciones III-V, todas las cuales satisfacen de varias maneras los requisitos del detector.

El proceso de fotoemisión interna puede tener lugar tanto en semiconductores intrínsecos como extrínsecos. En la absorción intrínseca los fotones recibidos excitan electrones de la banda de valencia a la banda de conducción del semiconductor, mientras que la absorción extrínseca implica

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

centros de impurezas creados dentro del material. Sin embargo para tener una respuesta rápida en conjunto con una absorción eficiente de fotones, se prefiere el proceso de absorción intrínseca.

Idealmente, el material de un fotodiodo se debe escoger con una energía de banda prohibida ligeramente menor que la energía del fotón correspondiente a la mayor longitud de onda a la que opera el sistema. Esto da un coeficiente de absorción suficientemente alto que asegura una buena respuesta y limita el número de portadores generados térmicamente con el fin de tener una baja corriente oscura.

Los fotodiodos de silicio tienen alta sensibilidad sobre la banda de longitud de onda $\lambda=0.8-0.9 \mu\text{m}$, con una velocidad adecuada (decenas de GHz), baja corriente oscura y estabilidad a largo plazo. Por tanto se utilizan ampliamente en sistemas de comunicación por fibra óptica de primera generación. Su utilidad se limita a la primera generación de longitud de onda, ya que el silicio tiene una energía de banda prohibida de 1.14 eV provocando una pérdida en la respuesta arriba de los $1.09 \mu\text{m}$.

En este trabajo se describirá el funcionamiento de un fotodiodo y un fototransistor, discutiendo las ventajas de uno sobre otro y decidiendo cuál de ellos es el detector óptimo para el desarrollo del proyecto en cuestión.

Principio de detección óptica

El proceso de detección básico en la absorción intrínseca se ilustra en la figura 3.22, que muestra un fotodiodo p-n. Este dispositivo es polarizado inversamente y el campo eléctrico desarrollado a través de la unión p-n barre los portadores móviles (agujeros y electrones) a sus respectivos lados mayoritarios (material de tipo p y n). Por lo tanto, se crea una región o capa de agotamiento, que es una zona desprovista de portadores de carga libre, en ambos lados de la unión. Esta barrera tiene el efecto de detener a los portadores mayoritarios de cruzar la unión en dirección opuesta al campo. Sin embargo, el campo acelera los portadores minoritarios de ambos lados al lado opuesto de la unión, formando la corriente de fuga inversa del diodo. Por lo tanto, se crean condiciones intrínsecas en la región de agotamiento que permite la absorción de fotones.

Un fotón incidente en o cerca de la región de agotamiento de este dispositivo con una energía mayor o igual que la energía de la banda prohibida E_g del material de fabricación (es decir, $hf \geq E_g$) excita un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. Este proceso deja un agujero vacío en la banda de valencia y se conoce como fotogeneración de un par agujero-electrón (portador), como se muestra en la figura 3.22(a). Los pares portadores así generados cerca de la unión son separados y barridos bajo la influencia del campo eléctrico para producir un desplazamiento por la corriente en el circuito externo en exceso de cualquier corriente de fuga

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

inversa (figura 3.22 (b)). La fotogeneración y la separación de un par portador en la región de agotamiento de esta unión p-n polarizada inversamente se ilustra en la figura 3.22 (c).

La región de agotamiento debe ser suficientemente gruesa para permitir que una gran fracción de la luz incidente sea absorbida con el fin de lograr la máxima generación de pares portadores. Sin embargo, dado que los tiempos de barrido de los portadores largos en la región de agotamiento restringen la velocidad de funcionamiento del fotodiodo es necesario limitar su anchura. Por lo tanto, existe un compromiso entre el número de fotones absorbidos (sensibilidad) y la velocidad de respuesta.

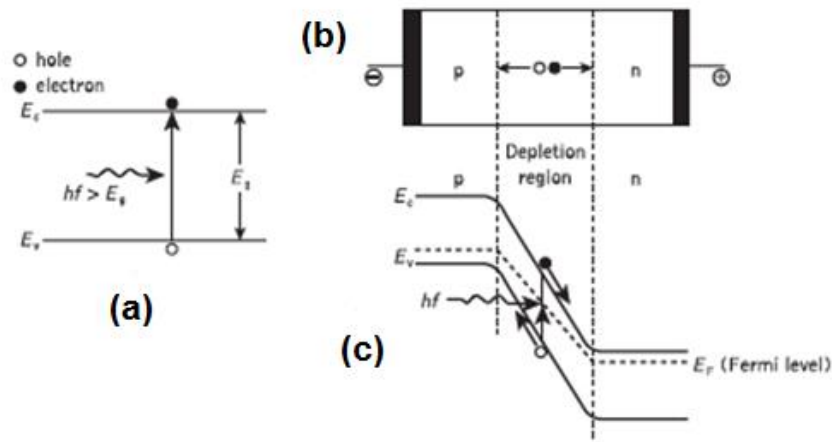


Figura 3.22 Funcionamiento de un fotodiodo p-n: (a) fotogeneración de un par electrón-hueco en un semiconductor intrínseco; (b) estructura de la unión p-n con polarización inversa ilustrando el desplazamiento de un portador en la región de agotamiento; (c) diagrama de la banda de energía de la unión p-n polarizada en inversa mostrando la fotogeneración y la separación subsecuente de un par electrón-hueco

Fotodiodo P-N

El fotodiodo consiste en esencia de una unión de material tipo "P" y material tipo "N" polarizada inversamente, se parece mucho a un diodo semiconductor común, pero tiene una característica que lo hace muy especial: es un dispositivo que conduce una cantidad de corriente eléctrica proporcional a la cantidad de luz que lo incide (lo ilumina). En la figura 3.23 puede observarse la simbología empleada comúnmente para un fotodiodo.

Esta corriente eléctrica fluye en sentido opuesto a la flecha del diodo y se llama corriente de fuga. Cuando la luz de longitud de onda apropiada es dirigida hacia la unión, se crean pares hueco-electrón que se desplazan a través de la unión debido al campo generado en la región prohibida. El

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

resultado es un flujo de corriente, denominado fotocorriente, en el circuito externo, que es proporcional a la irradiancia efectiva en el dispositivo.

El fotodiodo se comporta básicamente como un generador de corriente constante hasta que se alcanza la tensión de avalancha. El fotodiodo exhibe un pico de respuesta en una longitud de onda radiante determinada. Para esta longitud de onda, se produce la máxima cantidad de pares huecos-electrón en la proximidad de la unión.

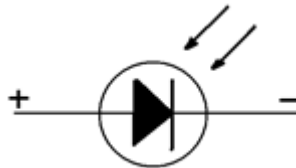


Figura 3.23 Simbología de un Fotodiodo

Si el fotodiodo se polariza de manera directa, de manera que por él circule la corriente en el sentido de la flecha, la luz que lo incide no tendría efecto sobre él y se comportaría como un diodo semiconductor normal.

Fototransistor

En específico el fototransistor PT1302B, cuya hoja de datos puede verse en [13], elegido principalmente por tener un pico de sensibilidad a la longitud de onda de 940 nm ideal para trabajar con el IR383 que trabaja a 940 nm.

Un fototransistor no es muy diferente de un transistor normal, es decir, están compuestos por el mismo material semiconductor, tienen dos junturas y las mismas tres conexiones externas: colector, base y emisor. Sin embargo el fototransistor no cuenta físicamente con la terminal base, ésta es sustituida por un cristal o capa de silicio fotosensible que cuando recibe luz produce una corriente eléctrica que activa el transistor.

El fototransistor es un transductor de energía luminosa (luz) a energía eléctrica (corriente) unidireccional, es decir, que la corriente sólo puede circular de colector a emisor y la magnitud de la corriente es directamente proporcional a la intensidad de luz que entra por la terminal fotosensible a la que por estándar se le sigue llamando "base", en alusión a que actúa de la misma manera que un transistor convencional.

El fototransistor mantiene los mismos tres estados de conducción que los transistores tradicionales (figura 3.24), con la diferencia de que estos estados dependen de la intensidad luminosa recibida:

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

- *Estado de corte:* si la base no recibe luz o la luz es muy débil, el transistor se comporta como un aislante, impidiendo el paso de la corriente entre las terminales de colector y emisor.
- *Estado activo:* al exponer el fototransistor a la luz, los fotones entran en contacto con la base del mismo, generando huecos y con ello una corriente de base que hace que el transistor entre en la región activa, y se presente una corriente de colector a emisor. Es decir, los fotones en este caso, reemplazan la corriente de base que normalmente se aplica eléctricamente. La intensidad de corriente es directamente proporcional a la intensidad de luz recibida.
- *Estado de saturación:* cuando la luminosidad recibida supera un cierto límite, es decir, supera la capacidad del fototransistor la proporcionalidad del estado activo desaparece y la conducción ya no se incrementa.



Figura 3.24 Grafica del comportamiento de un fototransistor

Debido a que la base no necesita un terminal eléctrico externo, los fototransistores solamente disponen de dos terminales. En la figura 3.25 se presenta la simbología de estos dispositivos opto electrónicos, en cuanto a su forma física es muy parecida a la presentada por un LED.

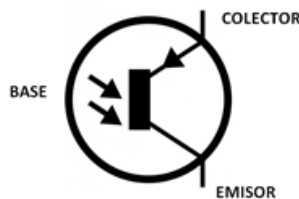


Figura 3.25 Simbología del fototransistor

Si se desea aumentar la sensibilidad del transistor, debido a la baja iluminación, se puede incrementar la corriente de base, con ayuda de polarización externa. Las corrientes típicas del

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

fototransistor para una tensión inversa de 10 V, son del orden de 1 nA a temperatura ambiente y aumentan en un factor de 2 para cada 10° C de aumento de temperatura.

La sensibilidad de un fototransistor es superior a la de un fotodiodo, ya que la pequeña corriente fotogenerada es multiplicada por la ganancia del transistor y el tiempo de respuesta es corto al igual que el presentado por el fotodiodo.

3.6.2 Amplificador

En este caso se decidió emplear un amplificador de transimpedancia el cual se encontró que es una de las configuraciones empleadas frecuentemente en los receptores para recibir información proveniente de fibras ópticas.

El amplificador de transimpedancia tiene la característica de no necesitar estrictamente un ecualizador, además de carecer del problema de sensibilidad (a diferencia del amplificador de baja impedancia). Sin embargo, la resistencia de realimentación R_F introduce una fuente adicional de ruido. [12]

La principal dificultad de esta configuración es que se requiere un diseño bastante cuidadoso, pudiendo oscilar con facilidad si no se hace correctamente.

El circuito empleado se muestra en la figura 3.26. El fototransistor, que se encuentra polarizado en directa, recolecta la señal luminosa proveniente de la fibra óptica y la convierte en una corriente eléctrica, ésta corriente eléctrica ingresa al amplificador operacional dónde es amplificada. El amplificador operacional se encuentra en la configuración inversora con una realimentación negativa. Los elementos empleados en el circuito son:

- Fototransistor de 5 mm con filtro de luz de día (PT1302B/C2).
- Un amplificador operacional (LM741, hoja de datos [14]).
- Resistencia de realimentación $R_F = 100 K\Omega$ y una resistencia a la entrada de $R = 1 M\Omega$.
- Fuente positiva de 12 V y fuente negativa de -12 V.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

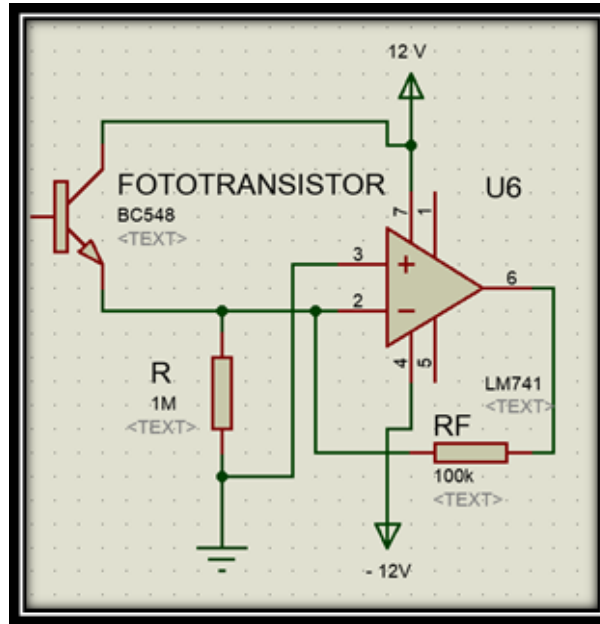


Figura 3.26 Circuito amplificador en el receptor

3.7 Conclusiones

Se implementó y se verificó el funcionamiento de un interrogador de arreglos de fibras ópticas utilizadas como sensores binarios, de tipo intensidad, de algunas cantidades físicas. Una aplicación particular es el sensado de daño estructural.

El interrogador funciona en el modo TDM trabajando a una frecuencia de $f = 2.5$ KHz y cuenta con 16 canales de interrogación con la posibilidad de escalabilidad.

La variante implementada del interrogador cuenta con 16 transmisores ópticos y un solo receptor óptico, por ser la parte más compleja y más costosa que el transmisor óptico.

Como fuentes ópticas se emplean LEDs que trabajan en la banda del infrarrojo (pico de emisión $\lambda_p = 940$ nm). La ventaja de utilizar LEDs infrarrojos consiste en su mayor eficiencia en comparación con los LEDs de la banda visible.

Como detector óptico se emplea un fototransistor (pico de detección $\lambda_p = 940$ nm) el cual es compatible con el LED utilizado, puesto que trabaja en la misma banda, y además presenta un tiempo de respuesta adecuado para el sistema.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

Se ocupa una señal pulsátil con un ciclo de trabajo pequeño ($\tau = 10\%$) con la finalidad de reducir el consumo total de energía.

El interrogador tiene la posibilidad de trabajar con fibras de diámetros pequeños de núcleo, fibras desde $d_{nucleo} = 100 \mu m$ (hasta $d_{nucleo} = 400 \mu m$).

Con las características mencionadas anteriormente, el interrogador es compacto y de bajo consumo de energía, lo que ayuda a que su implementación sea factible en el monitoreo de edificios históricos.

Referencias

- [1] Mirón-Carrasco, S. J., Reporte del sistema TDM, Maestría en Ingeniería Eléctrica-Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, UNAM, Octubre 2016.
- [2] Mirón-Carrasco, S. J., Reporte del sistema TDM 3, Maestría en Ingeniería Eléctrica-Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, UNAM, Octubre 2016.
- [3] Mirón-Carrasco, S. J., Variaciones del sistema, Maestría en Ingeniería Eléctrica-Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, UNAM, Octubre 2016.
- [4] Instruments, T. Precision timers. *NE555 datasheet* [archivo PDF]. Recuperado de: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>
- [5] Semiconductor, F. Transistors. *BC548 datasheet* [archivo PDF]. Recuperado de: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/50731/FAIRCHILD/BC548.html>
- [6] Instruments, T. Dual J-K FLIP-FLOPS. *SN74LS73A datasheet* [archivo PDF]. Recuperado de: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/27428/TI/74LS73.html>
- [7] Instruments, T. Synchronous 4-bit counters. *SN74S163 datasheet* [archivo PDF]. Recuperado de: <http://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/27437/TI/74LS163.html>
- [8] Instruments, T. CMOS analog multiplexers/demultiplexers. *CD4067BE datasheet* [archivo PDF]. Recuperado de: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4067b.pdf>
- [9] Everlight. *5mm Infrared LED datasheet* [archivo PDF]. Recuperado de: <http://www.everlight.com/file/ProductFile/IR383.pdf>
- [10] Boylestad, R. L., Nashelsky, L., *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*, 10a. ed., México, Pearson Educación, 2009, 894Pag.
- [11] Semiconductor, F. Transistors. *TIP102 datasheet* [archivo PDF]. Recuperado de: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/54787/FAIRCHILD/TIP102.html>
- [12] Otón, J. M., *Comunicaciones Ópticas: Receptores*. Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Telecomunicación, Departamento de Tecnología Fotónica. Abril 2005. 15pág.

CAPITULO 3. La implementación del sistema de monitoreo de arreglos de sensores de fibra óptica.

- [13] Everlight. *5mm Phototransistor datasheet* [archivo PDF]. Recuperado de: <http://www.datasheetspdf.com/PDF/PT1302B-C2/796537/1>
- [14] Semiconductor, F. Single operational amplifier. *LM741 datasheet* [archivo PDF]. Recuperado de: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/170960/FAIRCHILD/LM741.html>

4 CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

Se realizó el monitoreo, mediante la aplicación de un arreglo de fibras ópticas y del interrogador opto-electrónico descrito en el capítulo anterior, de un ensayo mecánico de un elemento estructural de tabique, el cual fue sometido a una prueba de compresión. Esta aplicación fue realizada en colaboración con el Instituto de Ingeniería y como parte del proyecto “Sistemas de Detección Temprano de Riesgos en Edificios Históricos”, un proyecto patrocinado por el Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería de la UNAM en conjunto.

A continuación se describe el elemento estructural bajo prueba, la técnica empleada para pegar las fibras, el proceso realizado, el material empleado, los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas de esta actividad.

4.1 Técnica de detección de daño

Las fibras ópticas en forma de arreglos de diferente extensión y topología se unen a la superficie del elemento de mampostería de ladrillo. La información sobre el daño estructural (grietas provocadas por sobrecarga mecánica) está contenida en la variación de la transmisión óptica de las fibras ópticas del arreglo: la disminución de la señal óptica cuando la fibra óptica, que atraviesa la grieta, se estira y luego se rompe con el ensanchamiento de la grieta. La variación de la transmisión óptica de todas las fibras del arreglo es supervisada por el interrogador: un sistema de transmisores y receptores ópticos, de forma continua o periódica a un ritmo razonable

4.2 Espécimen bajo prueba

Se construyó una pila de dimensiones 520 x 520 x 500 mm de ladrillos de arcilla cocida (tabique) de dimensiones 70x140x210 mm y un mortero de arena-cemento (proporción: 2: 1, cemento Portland tipo II y arena pumítica fina) que se muestra en la figura 4.1,a,b. Para lograr una distribución uniforme de la carga por compresión en la pila de ladrillos, se construyeron dos placas de hormigón armado en la parte superior e inferior de la pila (520x 520 x 100 mm) reforzadas cada una con 5 barras de refuerzo de $\frac{3}{4}$ " de diámetro.

El mortero de la pila de ladrillos se curó durante 28 días. A continuación, la pila se instrumentó con las fibras ópticas, transportadas a la máquina de carga mostrada en la figura 4.2 e instaladas en su marco de prueba (figura 4.3).

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

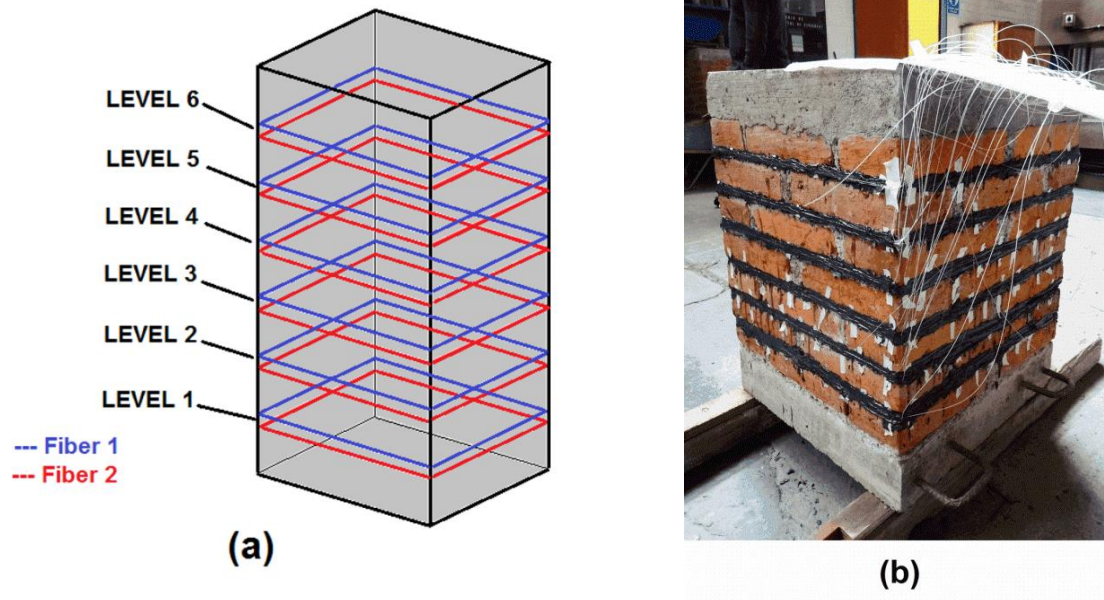


Figura 4.1 Pila de tabique instrumentada con las fibras ópticas: (a) Esquemático; (b) Fotografía



Figura 4.2 Transportación de la pila de tabique a la máquina de carga

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique



Figura 4.3 Pila de tabique instalada en el marco de prueba de la máquina de carga

4.3 Arreglo de fibra óptica

Se instrumentó la pila de ladrillos con doce fibras ópticas multimodo. Las fibras ópticas se unieron a la pila sobre su perímetro a seis planos horizontales separados por 70 mm, como se muestra esquemáticamente en la figura 4.1, a. Las fibras se colocaron en los planos horizontales, debido a que las grietas en los elementos de mampostería de ladrillo sometidos a una carga de compresión surgen predominantemente en la dirección vertical. En cada plano (nivel de pila), dos fibras ópticas fueron unidas a la pila en estrecha proximidad uno al otro. Es decir, utilizamos doce fibras ópticas en total para instrumentar la muestra de ensayo. Las fibras ópticas eran de tres tipos y modelos diferentes. Las características de las fibras ópticas unidas a la muestra de ensayo en cada plano horizontal (nivel) se dan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Especificaciones de las fibras ópticas empleadas en el experimento

Nivel de la pila	Fibra óptica #	Modelo de fibra óptica	Diámetro núcleo μm	Diámetro revestimiento μm	NA	Diámetro recubrimiento μm	Material recubri.
6	6.1	MM-S105/125	105	125	.22	245	Acrilato
	6.2	MM-S105/125	105	125	.22	245	Acrilato
5	5.1	MM-S105/125	105	125	.22	245	Acrilato
	5.2	MM-S105/125	105	125	.22	245	Acrilato
4	4.1	MM-S105/125	105	125	.22	245	Acrilato
	4.2	AFS105/125Y	105	125	.22	250	Acrilato

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

3	3.1	MM-S105/125	105	125	.22	245	Acrilato
	3.2	AFS200/220Y	200	220	.22	320	Acrilato
2	2.1	MM-S105/125	105	125	.22	245	Acrilato
	2.2	MM-S105/125	105	125	.22	245	Acrilato
1	1.1	AFS105/125Y	105	125	.22	250	Acrilato
	1.2	AFS105/125Y	105	125	.22	250	Acrilato

Utilizamos el adhesivo epoxi (Devcon Plastic Steel Putty (A) 10110) para unir las fibras ópticas a la superficie de la pila. Es un pegamento de dos componentes de grado industrial que se adhiere bien a diferentes tipos de materiales, incluyendo ladrillos al horno de arcilla. Adquiere su dureza máxima 24 horas después de haberlo aplicado. Las especificaciones del adhesivo pueden encontrarse en [1].

4.4 Fibras ópticas

Se emplearon fibras ópticas multimodo de índice escalonado con núcleo y revestimiento de silicio de tres diferentes tipos y modelos. El diámetro del núcleo y del revestimiento de la fibra óptica del primer y segundo tipo fue de 105 μm y 125 μm , respectivamente. El tercer tipo de fibra óptica fue de un diámetro de núcleo y de revestimiento de 200 μm y 220 μm , respectivamente. Los materiales y la estructura interna de los tres tipos de fibras ópticas son similares (véase la figura 4.4), excepto el diámetro del núcleo, revestimiento y / o recubrimiento.

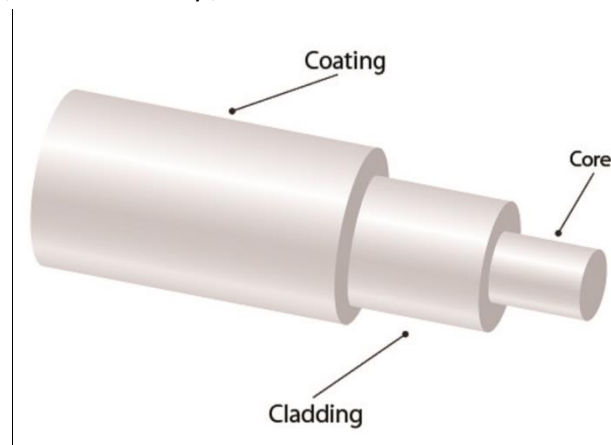


Figura 4.4 Estructura general de las fibras ópticas empleadas en el experimento

Las principales diferencias entre las fibras ópticas de la tabla 4.1 con respecto a la presente aplicación son:

- a) La resistencia mecánica de la fibra óptica y su comportamiento bajo estrés de tensión y flexión dependen básicamente del diámetro de sus elementos: el núcleo y el revestimiento, en las fibras ópticas recubiertas de sílice. Las fibras ópticas de pequeño

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

diámetro y con núcleo y revestimiento de sílice pueden ser demasiado sensibles a grietas pequeñas e insignificantes, mientras que las fibras ópticas de gran diámetro pueden ser insensibles incluso a grietas relativamente grandes.

- b) Las fibras ópticas de gran diámetro y con núcleo y revestimiento de sílice son más rígidas y tienen un mayor radio de curvatura que las fibras ópticas de pequeño diámetro. Por lo tanto, es más difícil desplegar fibras ópticas de gran diámetro sobre superficies irregulares y rugosas, en particular para pegarlas en superficies irregulares y doblarlas en esquinas.
- c) La fuerza de adhesión de la fibra óptica a la superficie del elemento de mampostería de ladrillo depende de las propiedades de la superficie del ladrillo, del pegamento y del material de revestimiento de la fibra óptica.
- d) El presupuesto de potencia del sistema de medición de la transmisión óptica depende en gran medida del diámetro del núcleo de la fibra óptica y de su apertura numérica (NA), y de los parámetros geométricos y ópticos de la fuente de luz: su diámetro y su patrón de radiación. El presupuesto de potencia es significativamente menor con las fibras ópticas de núcleo pequeño y NA pequeña, debido a la eficiencia de acoplamiento mucho menor de las fuentes de luz, tales como LED y fibra óptica, en comparación con las fibras ópticas de diámetro de núcleo grande y NA grande. Por lo tanto, las fibras ópticas de diámetro pequeño del núcleo y NA pequeña requieren fotorreceptores de ganancia mucho mayor y el interrogador se hace más complejo y costoso, en comparación con el caso de fibras ópticas de gran diámetro.

Se verificó la transmisión óptica de las 12 fibras después de su instalación con el fin de identificar las fibras ópticas que podrían haberse dañado al adherirlas a la pila de ladrillos o al endurecer el adhesivo. Esto se hizo con una lámpara LED común. Se iluminó cada fibra óptica en un extremo y se comprobó si la luz estaba saliendo del otro extremo. La inspección mostró que todas las fibras transmitieron la luz normalmente, es decir, ninguna de las fibras se rompió durante el proceso de instalación.

4.5 Interrogador opto-electrónico

El daño estructural en la pila de ladrillo se detectó por medio de un interrogador opto-electrónico multicanal especialmente desarrollado que se encuentra descrito en el capítulo 3. El interrogador es mostrado esquemáticamente en la figura 4.5. El sistema midió la transmisión óptica de las 12 fibras del arreglo (1) que se colocaron sobre las cuatro caras laterales de la pila de ladrillos (2).

El interrogador opto-electrónico desarrollado en el capítulo 3 se empleó para monitorear los niveles 1 y 4 de la pila de tabique, en donde se encontraban fibras de $d_{nucleo} = 105\mu m$, por lo

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

que sólo fue necesario emplear 4 canales de los 16 disponibles. Dos canales más fueron empleados como referencia.

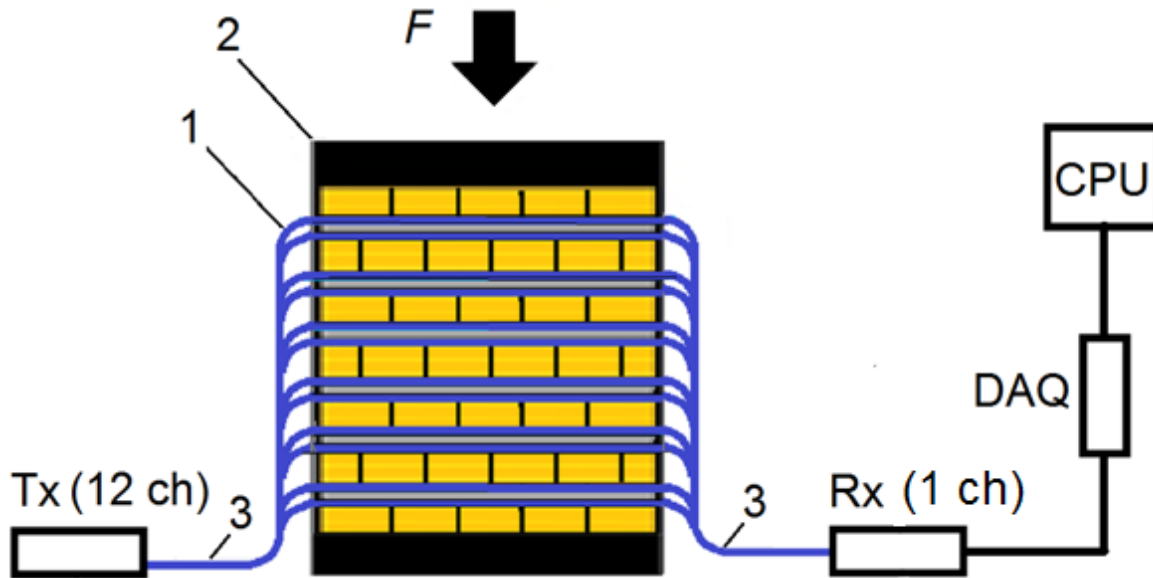


Figura 4.5 Esquema del sistema de monitoreo opto-electrónico: (1) Fibra óptica; (2) Muestra de ensayo; (3) Grupo de 12 cables de fibra óptica; Tx - transmisor óptico, 12 canales; Rx - receptor óptico; DAQ - Módulo de adquisición de datos (convertidor analógico/digital, 16 canales); CPU-unidad de procesamiento central para almacenar la transmisión óptica medida en forma digital

Además, para fines de comparación fue empleado un interrogador diferente descrito en [2]. Dicho interrogador consta de 16 transmisores ópticos (Tx) y 16 receptores ópticos (Rx). Sin embargo, solo 8 receptores y 8 transmisores se utilizaron activamente en la presente aplicación. Los transmisores y receptores restantes se utilizaron para fines de referencia de señal. El diagrama de bloques que muestra los elementos esenciales se muestra en la figura 4.6. Cada transmisor óptico genera una onda sinusoidal continua de 1 kHz. Las fuentes de luz son diodos emisores de luz (LED) que funcionan a una longitud de onda de 633 nm (luz roja visible). En cuanto a los fotodetectores son fototransistores que tienen su pico de sensibilidad a una longitud de onda de 860 nm.

En ambos interrogadores cada LED fue acoplado a una de las fibras ópticas del arreglo (su conductor de entrada) por medio de un acoplador individual, especial y original. El extremo lejano de cada fibra óptica estaba conectado a la entrada de su respectivo receptor óptico. Las fibras ópticas se conectaron a sus respectivos transmisores ópticos y receptores manualmente después de instalar la pila de ladrillos en la plataforma de la máquina de prueba. Se muestran ambos interrogadores instalados cerca de la pila de mampostería de tabique en la figura 4.7, a, b.

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

Se utilizó un osciloscopio digital para verificar las formas de onda de la señal de salida. Esto se hizo para detectar y evitar la posible saturación de los fotodetectores por la potencia de señal óptica excesiva.

Además, se convirtieron las señales de salida de los receptores ópticos en formato digital, mediante el uso de un dispositivo adquisidor de datos (DAQ de la marca Agilent, modelo U2353A, véase [3]). Cada salida del receptor fue acoplada a una de las entradas de un módulo comercial de adquisición de datos TDM de 16 canales (DAQ). Los datos obtenidos se almacenaron en un ordenador (CPU).

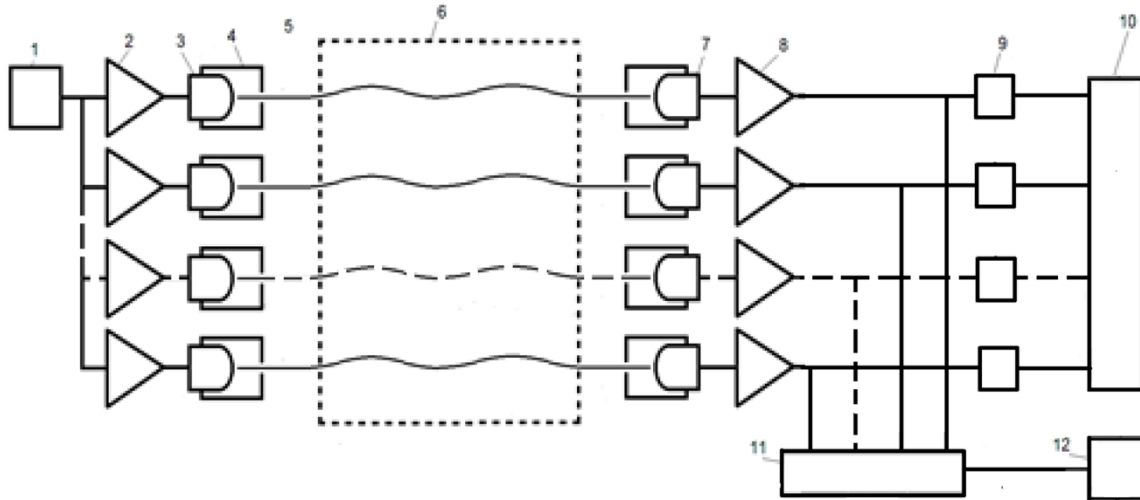


Figura 4.6 Diagrama de bloques del interrogador de 16 canales para la monitorización continua de la transmisión óptica de las fibras ópticas del arreglo: (1) generador de forma de onda sinusoidal; (2) amplificador de potencia; (3) LED; (4) acoplador; (5) fibra óptica; (6) elemento estructural bajo prueba; (7) fototransistor; (8) amplificador de transimpedancia; (9) comparador de voltaje; (10) display; (11) DAQ de 16 canales; (12) CPU.

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

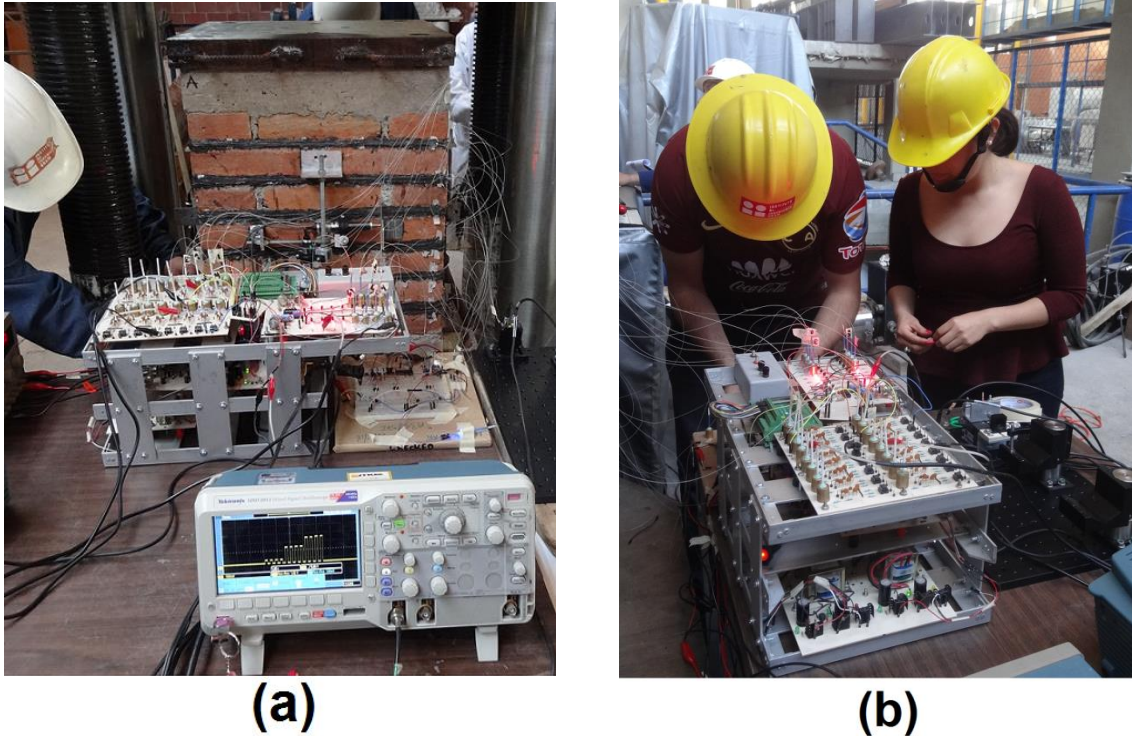


Figura 4.7 (a) Interrogadores opto-electrónicos para el monitoreo continuo de la transmisión óptica de las fibras ópticas del arreglo montado sobre el espécimen de prueba; (b) Conexión de las fibras ópticas al sistema de monitoreo opto-electrónico

4.6 Experimento

4.6.1 Ensayo de carga de compresión

La pila de ladrillos se instrumentó con el conjunto de 12 fibras ópticas descrito en las secciones anteriores. Adicionalmente, para los fines de comparación con sensores tradicionales, la pila se instrumentó con ocho transductores de desplazamiento eléctrico. Los sensores de desplazamiento eléctrico se instalaron en la parte central de las cuatro caras de la pila de ladrillos en la dirección horizontal y vertical, como se muestra en la figura 4.8, a, b.

La prueba de carga de compresión se llevó a cabo mediante el empleo de una máquina universal de 230 toneladas (marca Satec) capaz de proporcionar carga estática, la cual se muestra en la figura 4.9. El ensayo se llevó a cabo en varias etapas: (a) una carga inicial de 2 t; (b) un aumento de carga a 4 t; (c) tres ciclos de carga-descarga en el rango de 4 a 20 t; (d) una carga de 20 a 60 t seguida de la descarga a 0; (e) un incremento lineal monótono de la carga hasta que se logró una ruptura significativa de la pila de ladrillos (160 t). Las etapas de prueba de carga se muestran mediante un gráfico en la figura 4.10.

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

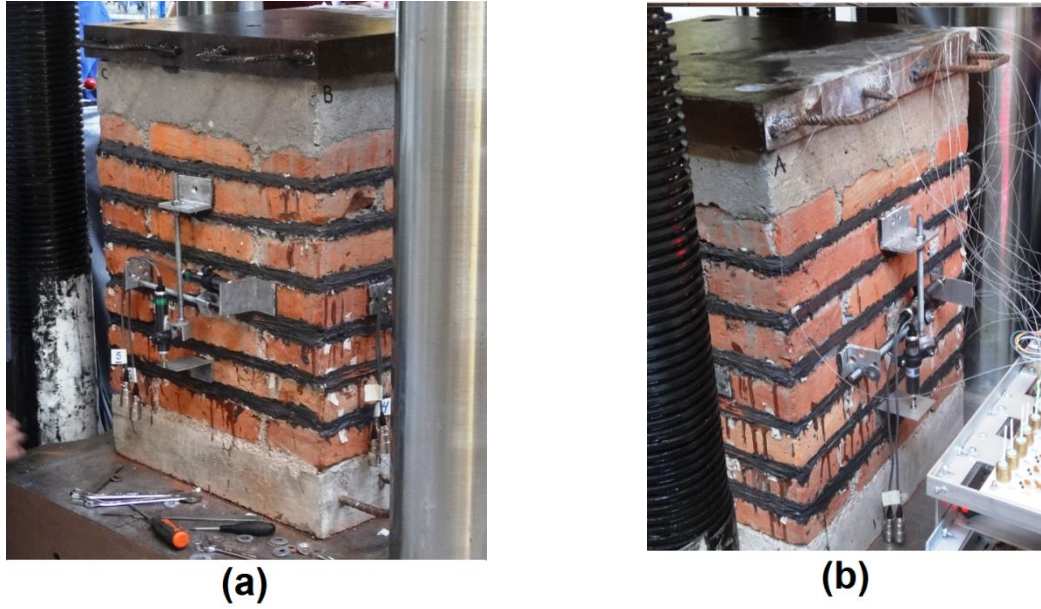


Figura 4.8 Sensores de desplazamiento eléctrico montados en la cara posterior (a) de la muestra de prueba y en la cara frontal (b).



Figura 4.9 Máquina de carga universal con el espécimen de prueba y el interrogador opto-electrónico para la detección de daños estructurales

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

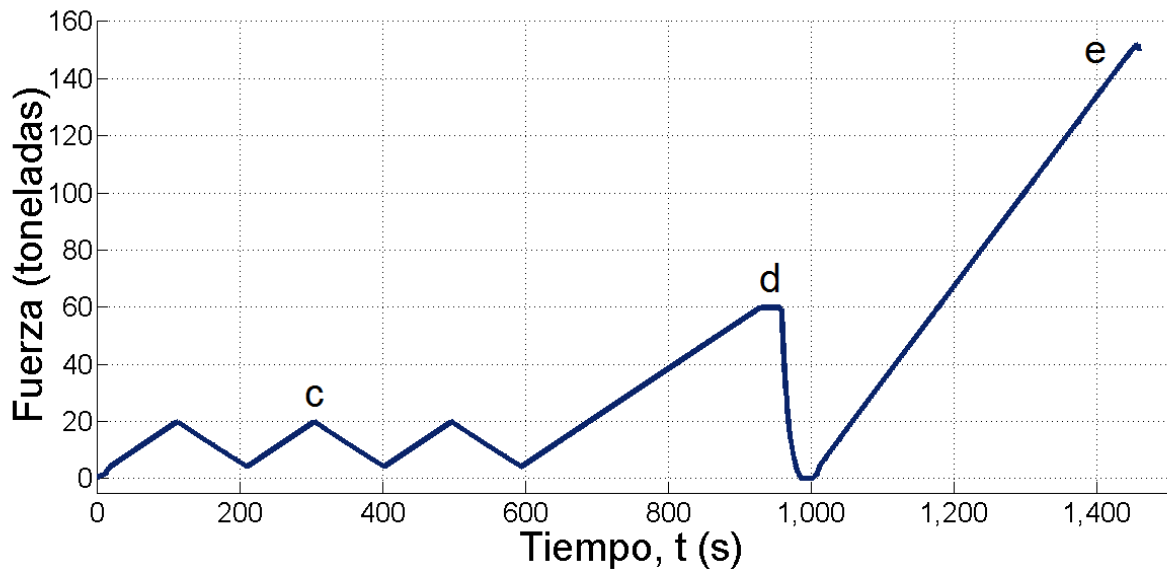


Figura 4.10 Variación de la carga de compresión Vs el tiempo durante la prueba

4.6.2 Comportamiento observado en las fibras ópticas durante el ensayo

Las figuras 4.10 a 4.17 muestran los resultados de la supervisión de la pila de ladrillos sometida a carga de compresión vertical. La figura 4.10 muestra la variación de la carga de compresión, la figura 4.11 la deformación vertical de la muestra de ensayo (medida con los sensores de desplazamiento eléctricos) y el cambio respectivo en la amplitud normalizada de las señales de salida de las doce fibras ópticas en el tiempo es mostrada en las gráficas de las figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17. Los gráficos de transmisión óptica se muestran en grupos de dos para seis niveles diferentes de la muestra de prueba, dado que cada nivel fue instrumentado con dos fibras ópticas. Se observó un comportamiento significativamente diferente de la transmisión óptica de las fibras ópticas. Lo cual dependió del plano de la pila (nivel) donde se colocaron las fibras ópticas.

Las amplitudes de las señales de las fibras ópticas en los niveles 2, 5 y 6 no variaron significativamente hasta que se alcanzó la carga de 160 toneladas y se produjo una ruptura significativa (pero no el fallo completo de la pila). En este punto, la amplitud de la señal de dichas fibras disminuyó bruscamente. La señal óptica de algunas fibras ópticas se desvaneció completamente (fibras ópticas 1.1, 2.1, 2.2, 3.1, 4.1, 5.2, 6.1), mientras que la amplitud de la señal de otras fibras disminuyó hasta aproximadamente el 20% de su valor inicial.

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

La inspección visual realizada después de la prueba reveló que todas las fibras ópticas de la matriz, excepto una, estaban rotas en muchos lugares cerca de las grietas estructurales. Esto se evidenció por la luz roja que venía de las respectivas secciones de las fibras ópticas, como puede verse en la figura 4.18, a, b.

La desaparición de la señal óptica se puede atribuir a la fractura de las fibras ópticas en las zonas de grietas de la pila, como se muestra en la figura 4.18, a. La amplitud residual, no nula, de la señal óptica de algunas fibras ópticas (1-, 3-, 4-, 5-, 6-) se puede atribuir al acoplamiento óptico finito que existe mientras que las partes fracturadas de las fibras ópticas permanecen dentro del plástico tenso pero con revestimiento intacto. Tal caso se ilustra en la figura 4.18, b.

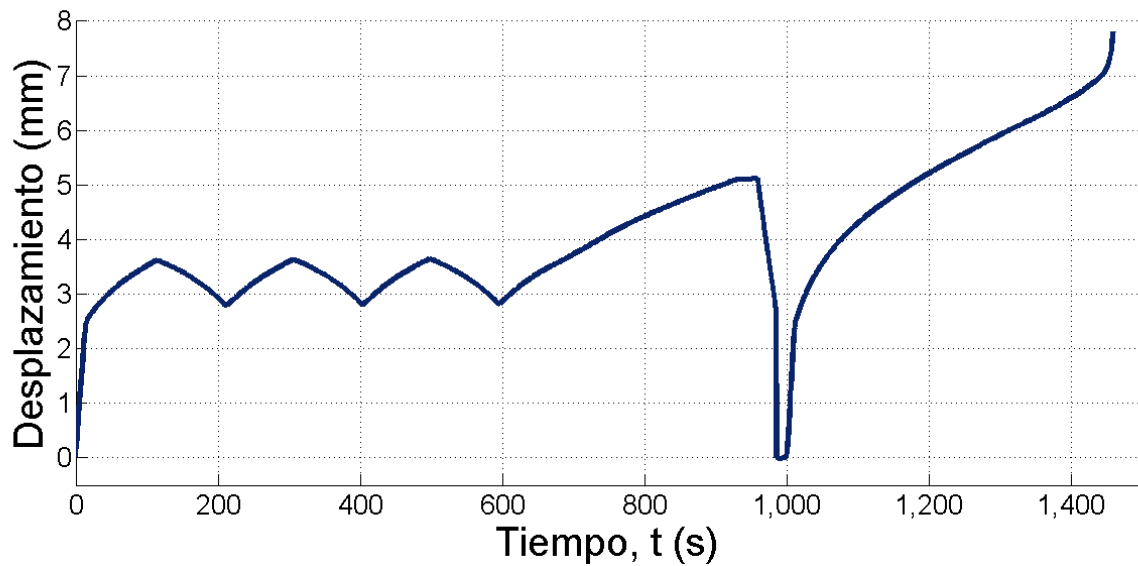


Figura 4.11 Deformación vertical de la muestra de ensayo en función del tiempo

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

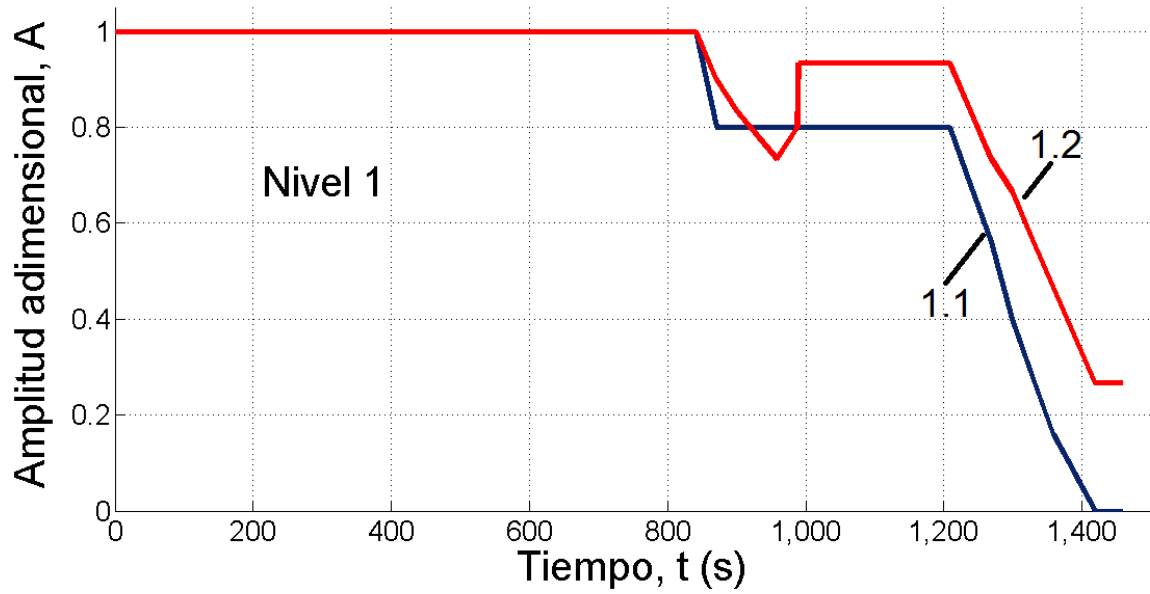


Figura 4.12 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A , montada en el espécimen en el nivel 1 en función del tiempo, t .

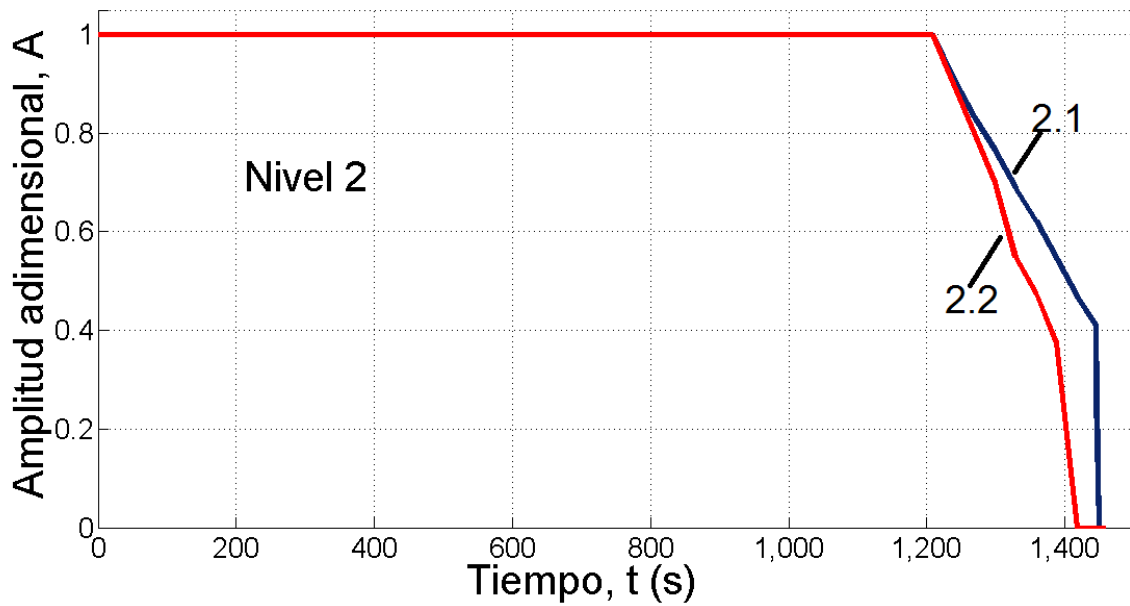


Figura 4.13 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A , montada en el espécimen en el nivel 2 en función del tiempo, t .

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

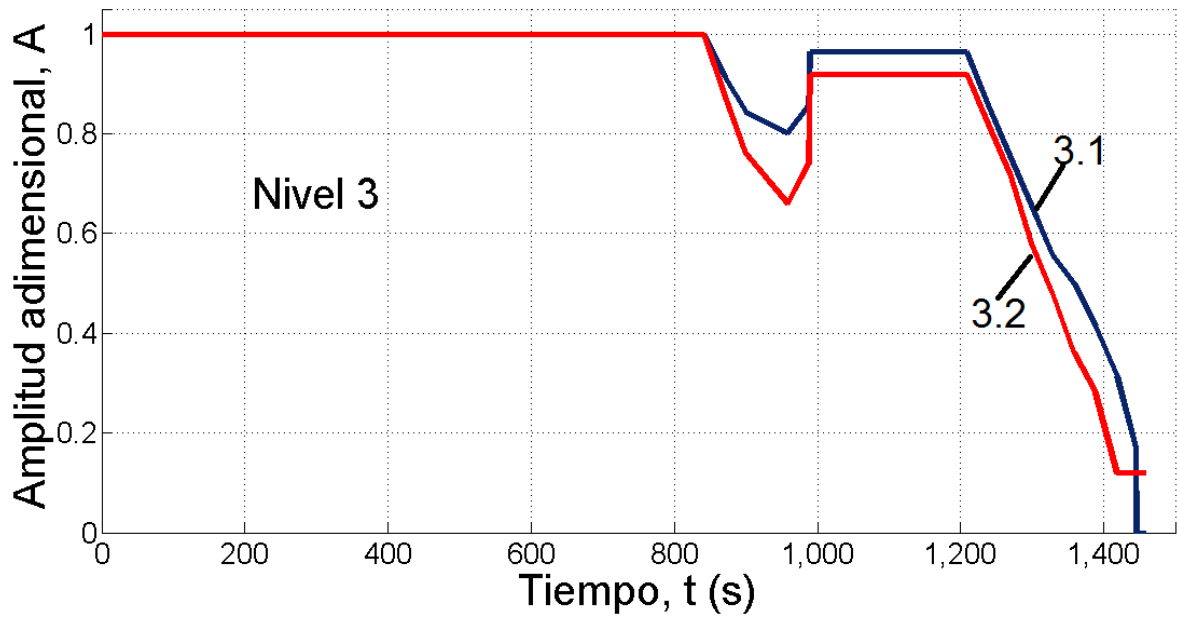


Figura 4.14 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A , montada en el espécimen en el nivel 3 en función del tiempo, t

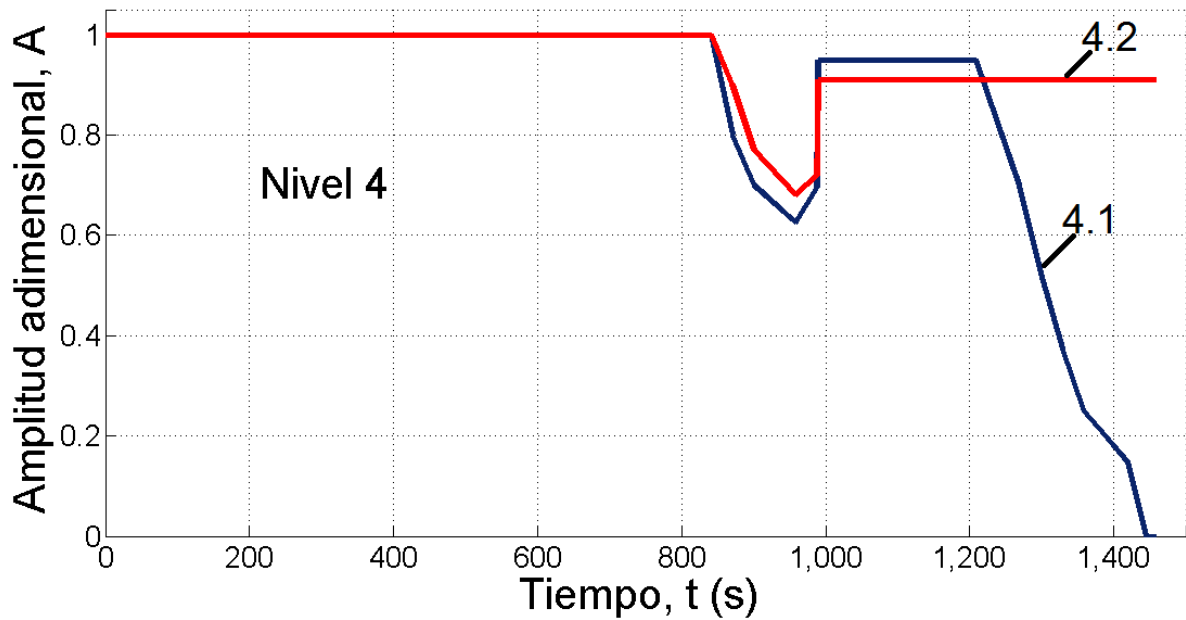


Figura 4.15 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A , montada en el espécimen en el nivel 4 en función del tiempo, t

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

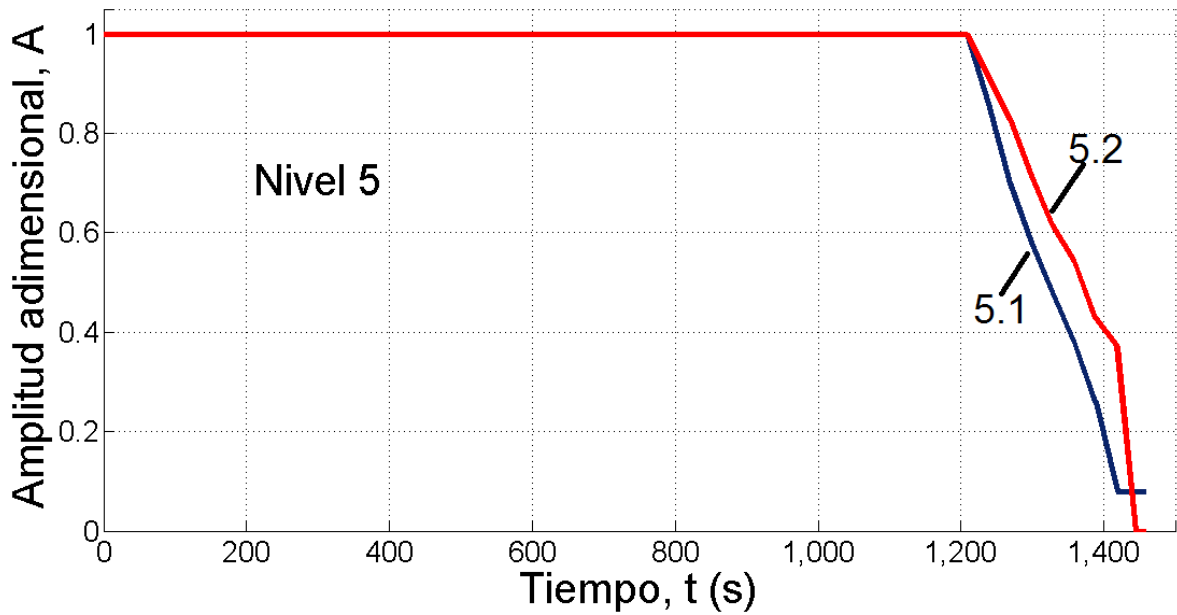


Figura 4.16 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A , montada en el espécimen en el nivel 5 en función del tiempo, t

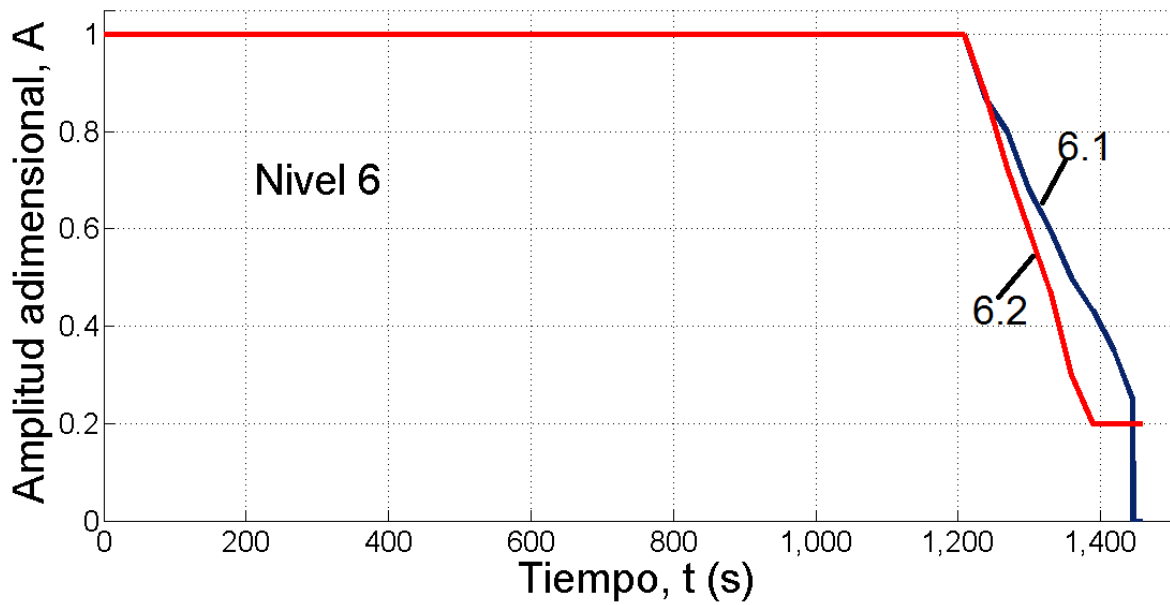


Figura 4.17 Amplitud adimensional de la señal óptica de la fibra óptica, A , montada en el espécimen en el nivel 6 en función del tiempo, t

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

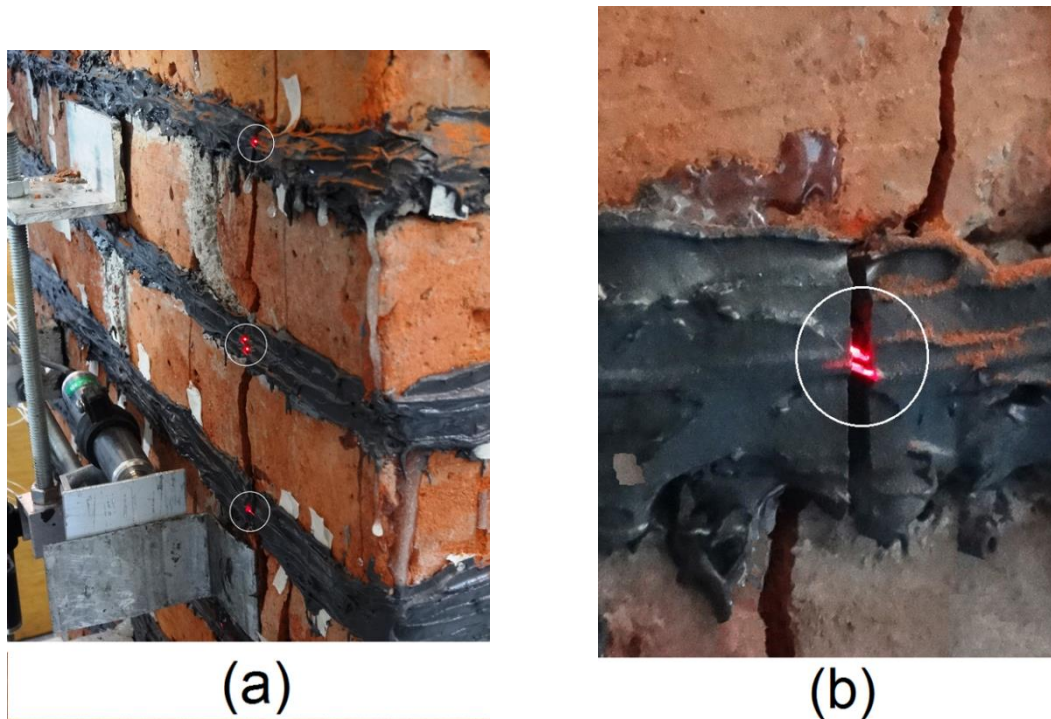


Figura 4.18 *Fibras ópticas rotas en las proximidades de grietas estructurales: a) Fibras ópticas completamente rotas; (b) Fibras ópticas con núcleos de sílice rotos dentro de revestimientos elásticos tensos pero intactos.*

En contraste, las fibras ópticas situadas en los niveles 1, 3 y 4 de la pila de ladrillos mostraron un comportamiento diferente cuando se aplicaron cargas cíclicas en el intervalo de 55 a 60 toneladas. No hubo variación de la amplitud de la señal antes del inicio de las primeras grietas en la parte central de la pila cuando se aplicó la carga de 55 toneladas. Luego hubo una fuerte disminución en las amplitudes de la señal óptica de las cuatro fibras ópticas que se colocaron en la muestra en dichos niveles.

Atribuimos esta disminución al ensanchamiento de la pila de ladrillos principalmente en su parte central bajo la carga de compresión y el inicio y ensanchamiento de las fisuras predominantemente en esta parte, lo que provocó la ruptura de las fibras ópticas en esta zona. La disminución de las amplitudes de las señales ópticas se hizo mayor cuando la carga alcanzó las 60 toneladas. Esto puede explicarse por la separación progresiva de los núcleos de sílice fracturados de las fibras ópticas bajo la tensión de tracción creciente.

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

Además, durante la fase de descarga, la amplitud de la señal óptica de tres fibras ópticas (3.1, 3.2 y 4.1) recuperó su valor original. La posible explicación es que los recubrimientos de plástico de dichas fibras ópticas resistieron a la deformación por tracción y no se rompieron bajo la carga especificada. Los recubrimientos se contrajeron de regreso y trajeron de nuevo las facetas de las fibras ópticas rotas en estrecha proximidad, de modo que la transmisión óptica y las amplitudes originales de la señal óptica fueron casi restauradas.

La distribución del número de las fibras ópticas que se rompieron y mostraron una disminución significativa en la transmisión óptica contra el ancho de la fisura se muestra en la figura 4.19. Fueron 92% de las fibras ópticas que se rompieron al completar la prueba de carga de compresión.

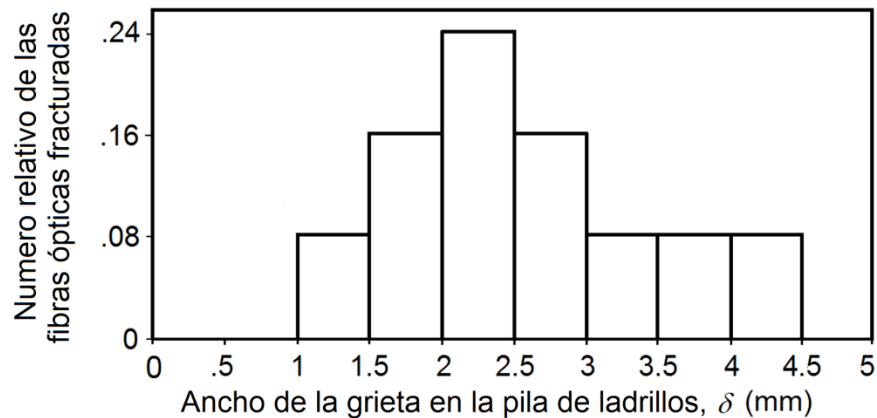


Figura 4.19 Distribución de las fibras ópticas fracturadas Vs. el ancho de fisura en la muestra de pila de ladrillos después de completar la prueba de carga de compresión

La fibra óptica 4.2, que era de un diámetro mayor que el resto de las fibras ópticas, no mostró ninguna disminución drástica de la amplitud de la señal óptica hasta que se aplicó la carga de compresión máxima de 160 toneladas. Tal comportamiento se puede atribuir a su mayor diámetro y mayor resistencia a la tracción. En nuestra opinión, esta fibra podría fracturarse bajo una carga mayor y una mayor apertura de la grieta. Es decir, aplicando fibras de diferente diámetro, puede ser posible expandir el intervalo de anchuras de grieta detectables.

En resumen, el experimento demostró la eficacia de la detección del daño estructural en forma de grietas en elementos de mampostería de ladrillo arcilloso mediante el uso de arreglos de fibras ópticas unidas a los elementos. El experimento evidenció que tal detección es posible con fibras ópticas multimodo convencionales, empleadas en las comunicaciones, sin elementos sensibles o estructuras especiales (tales como las *tapers*, FBG o FPR).

4.7 Discusión

La técnica para detectar el daño estructural en forma de fisuras descrito en esta sección es esencialmente de naturaleza discreta, es decir, la fibra óptica está intacta o fracturada. Permite una identificación sencilla del daño y, por lo tanto, una estrategia de monitoreo fiable para elementos de mampostería de ladrillo, así como elementos estructurales de otros tipos.

Además, las variaciones de amplitud de la señal óptica pueden estar relacionadas con diferentes grados de daño estructural. Esto se puede explotar para la cuantificación de la abertura de la grieta, aunque requeriría un procesamiento de señal más sofisticado y, tal vez, alguna inteligencia añadida al sistema de procesamiento de señales.

Hemos probado fibras ópticas de diferente diámetro de núcleo, revestimiento y recubrimiento, y diferente apertura numérica. El uso de fibras ópticas con diámetro de núcleo relativamente grande tiene ventajas y desventajas. Por un lado, son más resistentes y menos propensas a sufrir daños o incluso fracturas durante la etapa de instalación en elementos estructurales. Son más fáciles de manejar, instalar y acoplar a los componentes opto-electrónicos.

Esta última característica da como resultado tener amplitudes mayores de señales ópticas y receptores ópticos más simples y más baratos, y por lo tanto especificaciones técnicas menos estrictas del sistema completo de detección de daños. Sin embargo, las fibras ópticas de núcleo grande no son tan sensibles a esfuerzos de flexión y de tracción como las fibras de diámetro de núcleo pequeño. Por lo tanto, pueden no ser capaces de detectar el desarrollo de las grietas.

Nuestro experimento mostró que todas las fibras ópticas de menor diámetro de núcleo y de revestimiento (105/125 μm) utilizadas en la prueba funcionaron suficientemente bien y permitieron la detección de daños estructurales. Mientras que la fibra óptica de mayor diámetro y revestimiento (200/220 μm) fue menos sensible al inicio de las grietas y no mostró una disminución drástica en su transmisión bajo el ensanchamiento de las grietas hasta 4.5 mm, en comparación con las fibras ópticas de 105/125 μm de diámetro de núcleo / revestimiento. Se espera encontrar más argumentos a favor o en contra de determinados tipos y modelos de fibras ópticas con respecto a esta aplicación en el curso de trabajos futuros.

Una de las ventajas de la técnica propuesta radica en su compatibilidad con las tecnologías de monitoreo y equipos de medición existentes. En particular, esta técnica puede complementarse con un OTDR de 1 mm de resolución capaz de identificar el punto exacto de ruptura de la fibra óptica y, por tanto, la ubicación exacta de la grieta en el elemento estructural.

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

El siguiente paso es la implementación de la versión práctica del sistema diseñado para la detección de daños estructurales, que se ajustaría a las condiciones de funcionamiento del mundo real (ambientales y de otro tipo), como las que se encuentran en el monitoreo de edificios históricos.

El interrogador opto-electrónico desarrollado puede funcionar en el modo de multiplexación por división de tiempo (TDM) y emplear una conexión de tipo matriz de hasta $16 \times 16 = 256$ fibras ópticas del arreglo por módulo interrogador. Lo cual permite desplegar conjuntos densos de fibras ópticas sobre grandes áreas de edificios. Su ventaja en comparación con el segundo interrogador empleado consiste en un menor consumo de energía y la modularidad del sistema de detección de daños estructurales que, debido al requisito de escalabilidad, es una característica importante durante la fase de implementación práctica de la presente técnica.

Otras mejoras a los sistemas de detección de daños estructurales pueden incluir la incorporación de cierta inteligencia, tales como algoritmos de detección automática de daños y evaluación de su grado.

4.8 Conclusiones

Se obtuvieron resultados positivos en la detección de las grietas en los elementos de mampostería de ladrillo usando un arreglo de fibras ópticas que se unieron a la superficie de los elementos antes mencionados. Las fibras ópticas disminuyeron su transmisión óptica al inicio y en el ensanchamiento de grietas en la estructura bajo la carga de compresión. Es decir, las fibras ópticas resultaron ser detectores fiables de daño estructural.

Se demostró que la transmisión óptica de las fibras ópticas se correlaciona con el daño en un elemento de mampostería de ladrillo. Las fibras ópticas se fracturaron en las localizaciones exactas de las grietas en el elemento.

Se diseñó, desarrolló, fabricó y probó un equipo opto-electrónico (un interrogador) fácil de operar y de bajo costo para la generación de señales y la interrogación del arreglo de fibra óptica. El interrogador nos permitió medir y monitorizar la transmisión óptica de todas las fibras ópticas del arreglo y detectar sus variaciones debido a curvaturas, torsiones y fracturas asociadas a daños estructurales: el inicio y el ensanchamiento de las grietas.

Los resultados del presente estudio demuestran la eficacia de esta técnica y definen un conjunto de características que lo hacen práctico y útil en la detección de daños estructurales.

CAPITULO 4. Desarrollo de una aplicación: Monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique

Las ventajas de la técnica implementada sobre otras técnicas acústicas, ópticas y eléctricas actualmente en uso incluyen su simplicidad, inmunidad a la interferencia electromagnética y bajo coste de materiales (fibras ópticas) y el equipo de monitoreo.

La simplicidad de la operación y el costo relativamente bajo de la técnica propuesta lo convierten en un gran candidato para aplicaciones en la detección de daños estructurales en edificios históricos. Esta técnica permite una evaluación rápida de los daños en una estructura.

Finalmente hay que decir que el interrogador es un diseño original que no se encuentra en el mercado ni en la literatura científica y que la técnica empleada aún no se encuentra reportada por otros autores.

Referencias

- [1] Devcon. *Plastic Steel Putty (A)* [archivo PDF]. Recuperado de: http://www.devcon.com/prodfiles/pdfs/fam_tds_101.pdf
- [2] Gonzalez-Tinoco, J. E., Martinez-Gonzalez, D. M., Miron-Carrasco, J., Khotiaintsev, S., Guzman-Olguin, H. J., Lopez-Bautista, M. C., Zuñiga-Bravo, M. A., Ovando-Shelley, E., and Sanchez-Ramirez, A. R. 2016. Specialized optical fibre sensor array for structural damage detection. *10th IEEE/IET International Symposium on Communications Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP'16)*, Prague, Czech Republic, July 2016.
- [3] Agilent, Keysight Technologies. Data Acquisition Devices. *U2352A datasheet* [archivo PDF]. Reuperado de: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-0566EN.pdf?id=2205049>

5 CAPITULO 5. Perspectiva de monitoreo de nivel de helio líquido en tanques y recipientes con sensores refractométricos de fibras ópticas

5.1 Introducción

El índice de refracción es una de las características ópticas importantes de la materia que describe la interacción de la sustancia con la luz. En particular, sirve para la medición de niveles de líquidos en tanques y recipientes, basándose en la diferencia de índice de refracción de la sustancia líquida y el gas encima de líquido. Es por esto que es importante contar con los métodos y dispositivos para cuantificar dicha cantidad.

Este capítulo se enfoca en el problema de medición de niveles de fluidos criogénicos, en especial helio líquido (LHe), empleando un arreglo de sensores refractométricos de fibra óptica. Esto dado a que la aplicación de dicho fluido en la industria, medicina e investigación científica está en aumento, por lo que es de interés desarrollar nuevos y mejores sensores de fluidos criogénicos.

Para almacenar los líquidos criogénicos (tales como el nitrógeno líquido y el helio líquido), los cuales tienen un punto de ebullición más bajos que la temperatura ambiente, se emplea un tipo especializado de frasco de vacío conocido como *dewar*. Dichos contenedores pueden tomar varias formas diferentes, incluyendo cubos abiertos, frascos con tapones sueltos y depósitos de auto-presurización. Todos los contenedores tienen paredes construidas a partir de dos o más capas, con un alto vacío mantenido entre las capas, lo cual proporciona un aislamiento térmico muy bueno entre el interior y el exterior, lo que reduce la velocidad a la que el contenido se evapora.

Considerando la estructura de los contenedores de fluidos criogénicos, la medición del nivel de helio líquido puede realizarse mediante la implementación de un arreglo de sensores refractométricos de tal manera que dichos sensores se introduzcan a través de la boquilla del contenedor al mismo. Para la determinación del nivel se debe realizar el monitoreo de la señal proveniente de los sensores refractométricos, lo cual se puede lograr al conectar los sensores con el interrogador opto-electrónico descrito en el capítulo 3, tal y como se muestra en la figura 5.1

Sin embargo, se debe realizar una optimización de los sensores refractométricos para asegurar que la variación de la señal de salida será suficiente para que los sensores refractométricos funcionen con el interrogador, además de ser capaces de distinguir entre el helio líquido y el medio gaseoso sobre él.

CAPITULO 5. Perspectiva de monitoreo de nivel de helio líquido en tanques y recipientes con sensores refractométricos de fibras ópticas

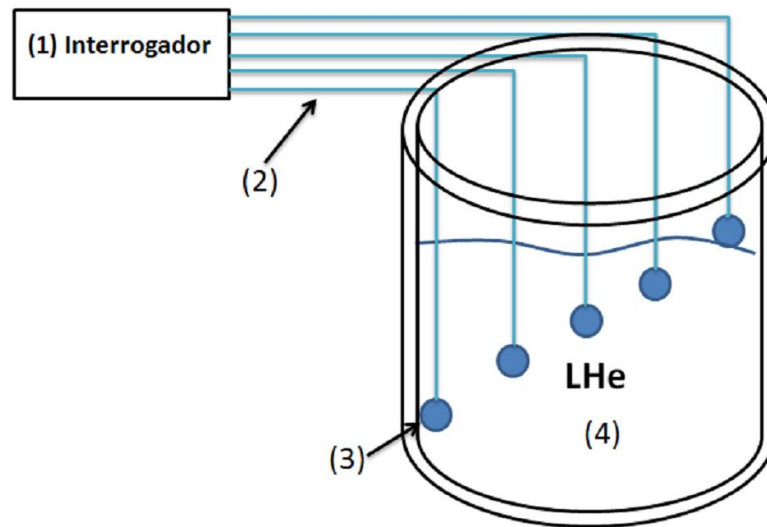


Figura 5.1 Propuesta conceptual del arreglo de sensores para la medición de nivel de helio líquido. (1) Interrogador opto-electrónico, (2) Fibra óptica, (3) Sensor refractométrico, (4) Contenedor (dewar)

Existen trabajos previos realizados por integrantes de nuestro equipo de trabajo acerca de la medición de líquidos criogénicos, como el hidrógeno líquido y el nitrógeno líquido, mediante el uso de sensores de fibra óptica con un elemento detector externo. Sin embargo aún no han incursionado en la detección del helio líquido dado su bajo índice de refracción, el más pequeño entre los líquidos previamente mencionados. [1] - [3]

5.2 El helio líquido, sus singularidades y aplicaciones

El Helio líquido es un fluido criogénico, es decir, es una sustancia que permanece en su estado líquido a temperaturas extremadamente bajas. En condiciones normales de temperatura y presión, el helio permanece en su estado gaseoso. Una pequeña cantidad de helio líquido puede expandirse a un gran volumen de gas.

El helio líquido tiene las siguientes características de interés:

- Tiene un punto de ebullición, a 1 atm, de 4.22 Kelvin.
- Es un gas inerte, lo que quiere decir que no tiene una reacción química significativa. No quema ni permite la combustión.
- Tiene un índice de refracción muy pequeño, $n_{LHe} = 1.026$, muy cercano al índice de refracción del aire.

CAPITULO 5. Perspectiva de monitoreo de nivel de helio líquido en tanques y recipientes con sensores refractométricos de fibras ópticas

Los líquidos criogénicos, como el helio líquido, son contenidos en recipientes térmicamente aislados. Dichos recipientes están diseñados específicamente para soportar cambios bruscos de temperatura y diferencias extremas de temperatura.

El helio líquido es comúnmente empleado como refrigerante criogénico; es usado en imanes superconductores tales como los utilizados en la formación de imágenes de resonancia magnética (Magnetic Resonance Imaging, MRI), resonancia magnética nuclear (Nuclear Magnetic Resonance, NMR), magnetoencefalografía (MEG) y aceleradores de partículas como el “Large Hadron Collider”.

El helio enfría el material a una temperatura cercana al cero absoluto, de manera que la resistencia eléctrica de los superconductores cae abruptamente a cero. La baja resistencia eléctrica de los superconductores permite crear campos magnéticos más potentes, lo cual es necesario para las aplicaciones antes mencionadas.

Un imán superconductor puede mantener una corriente constante sin una fuente de alimentación debido a que la resistencia es cero. Pero si el imán superconductor se queda sin helio líquido, el material se calienta y su resistencia ya no es nula. Al existir una resistencia, se genera calor y un aumento en la temperatura lo cual a su vez aumenta la resistencia del material. Por lo dicho anteriormente es importante tener un control sobre el nivel de líquido helio presente en el imán superconductor.

5.3 La refractometría

La refractometría es una técnica y un proceso de medición, por medio del cual se determina un valor específico del índice de refracción de una sustancia, a una determinada longitud de onda.

El cociente entre la velocidad de propagación en el espacio libre, c , y la velocidad de propagación dentro de un medio, v , se llama índice de refracción del medio, n , y se encuentra definido por la siguiente ecuación:

$$n = \frac{c}{v} \quad (5.1)$$

El índice de refracción es una cantidad adimensional, real para los materiales transparentes y complejos si hay absorción. Por lo general depende de la dirección de la luz en relación al material con el cual tiene interacción, por ejemplo, algunos vidrios son anisotrópicos, esto es, que poseen más de un índice de refracción. Sin embargo, muchas sustancias son isotrópicas, esto significa que sólo poseen un índice de refracción, como son los líquidos.

CAPITULO 5. Perspectiva de monitoreo de nivel de helio líquido en tanques y recipientes con sensores refractométricos de fibras ópticas

Para todos los medios ópticos el índice de refracción varía con la longitud de onda. En general el índice es mayor para longitudes de onda cortas en comparación con las largas. La variación del índice de refracción con respecto a la longitud de onda es llamada dispersión cromática y está dada por la expresión:

$$\Delta n = n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2} \quad (5.2)$$

Cuando la luz pasa de un medio a otro ocurren varios fenómenos, de los cuales puede usarse cualquiera como base de la medición del índice de refracción de interés. Entre dichos fenómenos se encuentran:

- Cambio en la velocidad de propagación, como consecuencia de su interacción con las partículas del otro medio.
- Pérdidas por reflexión de la luz, pudiendo ocurrir reflexión total.
- Cambio en la dirección de propagación, si la luz incidente no es perpendicular a la superficie entre los dos medios, generando efectos de polarización.

La refractometría óptica permite la identificación de sustancias sólidas y líquidas, permitiendo conocer diferentes parámetros como concentración de una sustancia específica en un líquido, la caracterización de mezclas de dos o más sustancias, posibilitando numerosas aplicaciones como medición del nivel de líquidos, detección de fugas, etc. Por tanto, es una herramienta de gran importancia para la industria, la medicina y la investigación científica en química, biología y otros campos.

Hoy en día, hay muchos refractómetros comerciales disponibles.

Método del ángulo de Brewster

El ángulo de Brewster, θ_B , es el ángulo para el cual no hay reflexión de la luz linealmente polarizada que se hace incidir en la superficie de la muestra (figura 5.2). Mediante la ecuación 5.3 se puede obtener el índice de refracción de la muestra, donde n_1 es el índice de refracción del medio que contiene el haz de luz incidente y reflejado, que usualmente es aire:

$$n_2 = n_1 \tan \theta_B \quad (5.3)$$

Un láser linealmente polarizado es una fuente adecuada de luz monocromática. Las fuentes no polarizadas requieren ser polarizadas con un prisma Glan-Thomson. Con un láser de He-Ne con potencia de 1 mW y con un juicio ocular mínimo de reflectancia, una precisión de θ_B cerca de 0.1° puede ser obtenida, dando una precisión en la obtención del índice de refracción de muestra cerca de 0.005.

CAPITULO 5. Perspectiva de monitoreo de nivel de helio líquido en tanques y recipientes con sensores refractométricos de fibras ópticas

El método del ángulo de Brewster es comparable con la precisión del método del ángulo crítico, pero a diferencia de éste, no se requiere un material de referencia con un índice de refracción mayor al de la muestra.

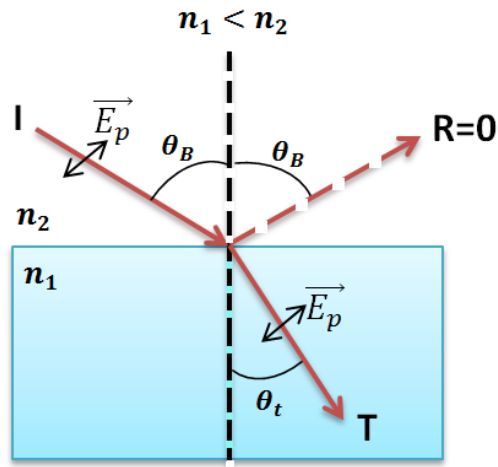


Figura 5.2 Descripción gráfica del ángulo de Brewster

Método del ángulo crítico

Cuando existe una interfaz entre dos medios, la ley de Snell determina la relación entre los ángulos de incidencia y transmisión de la luz con el índice de refracción de ambos medios. A partir de la medición del ángulo crítico (ecuación 5.4) es posible entonces determinar el índice de refracción de una muestra.

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (5.4)$$

En la región del ángulo crítico, las ecuaciones de Fresnel muestran que la potencia óptica transmitida o reflejada varía en forma discontinua con el ángulo. Dicho ángulo puede ser medido con una precisión de alrededor de 10^{-4} o 10^{-5} . [4]

El método del ángulo crítico se ocupa para muestras líquidas, las cuales son colocadas directamente sobre una cara del prisma de índice de refracción conocido. Para una muestra transparente pueden ser usados el modo de transmisión o reflexión, debido a que θ_c es el mismo para ambos.

En el modo de transmisión, la interfaz prisma-muestra es iluminada difusamente a través de la muestra, el ángulo crítico entonces es el ángulo más grande donde ocurre la transmisión del

CAPITULO 5. Perspectiva de monitoreo de nivel de helio líquido en tanques y recipientes con sensores refractométricos de fibras ópticas

prisma. El modo de reflexión, es útil para muestras con gran esparcimiento o absorción. El ángulo crítico es donde la reflectancia cambia discontinuamente con el ángulo de reflexión dentro del prisma, siendo total para $\theta \geq \theta_c$. En el modo de transmisión, la transmitancia de la muestra dentro del prisma es cero para $\theta \geq \theta_c$ y finita para $\theta \leq \theta_c$. Mientras que, en el modo de reflexión una proporción baja de la luz es reflejada para $\theta \leq \theta_c$ y el 100% es reflejado para $\theta \geq \theta_c$.

Método interferométrico

En las mediciones interferométricas del índice de refracción, se divide un haz de luz en dos partes, una de las cuales sigue una trayectoria de índice de refracción conocida y la otra pasa por la sustancia cuyo índice de refracción desea conocerse. Los dos haces se recombinan de tal forma que se formen franjas de interferencia. El desplazamiento de las franjas, debido al medio de índice de refracción desconocido, es una medida de este índice.

Si N es el número de franjas desplazadas con respecto a una línea de referencia, λ es la longitud de onda de la luz usada, n_0 el índice de refracción del medio conocido y d la longitud del camino recorrido en el medio, el índice de refracción, n , está dado por la siguiente expresión:

$$n = n_0 + \frac{N\lambda}{d} \quad (5.5)$$

Por inspección visual se pueden medir fracciones de 0.1 franjas, y empleando métodos electro-ópticos se pueden medir hasta 10^{-6} de franja[4]. Como el desplazamiento de las franjas es muy sensible a pequeños cambios de índice, el método ofrece gran precisión. Sin embargo, un interferómetro además de caro es delicado.

5.4 Sensores refractométricos de fibra óptica

Existen diferentes tipos de sensores refractométricos de fibra óptica de campo evanescente, fabricados en fibras de diferentes materiales y que hacen uso de diversos dispositivos ópticos. Entre los más conocidos podemos encontrar sensores refractométricos basados en tapers fabricados en SMF; fibras ópticas de plástico parcialmente peladas; sensores que operan en un régimen de interferencia, entre los cuales podemos encontrar sensores que emplean rejillas ya sean FBG o LPFG, estructuras que incluyen interferómetros de tipo Mach-Zender, sensores basados en la Resonancia de Plasmón Superficial (SPR) o resonadores Fabry-Perot; sensores con transductores ópticos externos de diferentes formas y materiales, por ejemplo, prismas y semiesferas, entre los más comunes.

Los dispositivos de tipo intensidad constituyen, quizás, el mayor grupo de sensores refractométricos de fibra óptica existentes. Muchos de estos sensores emplean la reflexión interna de la luz (parcial o total) en la interfaz del elemento de detección y el medio externo, es decir, son

CAPITULO 5. Perspectiva de monitoreo de nivel de helio líquido en tanques y recipientes con sensores refractométricos de fibras ópticas

sensores de campo evanescente. La reflexión óptica en la interfaz es una función del índice de refracción de los dos medios. Este tipo de sensores son uno de los más elementales, ya que para su configuración más simple basta con tener un transmisor y un receptor para su funcionamiento.

Durante la última década fueron desarrollados diferentes sensores ópticos refractométricos basados en fibras ópticas y empleados en una amplia gama de aplicaciones en diversos campos de la investigación y la industria. En su mayoría, son sensores refractométricos en fibras ópticas aplicados a la discriminación de líquidos (particularmente en mezclas acuosas, combustibles y aceites), así como la medición de nivel de líquido.

En la industria automotriz, se han desarrollado diferentes sensores que permiten la evaluación de los combustibles utilizados con la finalidad de detectar posibles adulteraciones a éstos que puedan llegar a contaminar el medio ambiente y la salud de la población. En este sentido, Gobiernos como el de Brasil, han propiciado el desarrollo de sensores para medir la calidad de los combustibles que se comercializan dentro de ese país. Un ejemplo de esto es el desarrollo de un sensor refractométrico que emplea una LPFG, inscrita en una fibra óptica dopada con Boro y Germanio mediante el haz de un láser de CO₂, aplicado a la detección de la adulteración del combustible y la identificación de hidrocarburos dentro de tuberías [5]. Otro ejemplo de este tipo de aplicación, es el sensor que consta de una LPFG inscrita en una SMF, utilizada en la medición de la concentración de etanol en la gasolina, que puede operar en un rango de índices de refracción de 1.36 a 1.43 [6].

El rango de operación de varios sensores basados en fibras ópticas de sílice para la detección de líquidos, se encuentra limitado por el índice de refracción de dicho material; por tal motivo restringen operación con sustancias como aceites que presentan un índice de refracción mayor al de sílice. Una solución a este problema consiste en utilizar estructuras basadas en tapers fabricados en SMF [7] o en MMF [8], por mencionar algunas.

Otra de las aplicaciones que nos interesa, es la medición del nivel de líquido mediante sensores refractométricos de fibras ópticas, a continuación mencionaremos algunos de los desarrollados en la última década. Sohn *et al.* [9] realizaron la medición de líquido en un tanque mediante una fibra óptica multimodo (MMF) conectada a un FBG, la detección de líquido emplea la reflexión que sufre la señal al final de la MMF monitoreando dicho extremo de la fibra mediante la FBG para detectar posibles daños en caso de que choque con el contenedor. Otros sensores desarrollados miden el nivel de líquido mediante la inmersión de una rejilla inscrita en fibra óptica, ya sea LPFG [10] o FBG [11].

Otro sensor propuesto es el refractómetro en fibra óptica intrínseco [12]. Este tiene su aplicación en la medición de índices de refracción de los líquidos, y también se basa en la modulación de la intensidad de la luz que viaja por la fibra tal que las pérdidas en la potencia óptica que ocurren en

CAPITULO 5. Perspectiva de monitoreo de nivel de helio líquido en tanques y recipientes con sensores refractométricos de fibras ópticas

la fibra se deben a efectos de transmisión y reflexión (parcial o total interna); consta de una fibra de perfil de índice escalonado que parcialmente es insertada en una placa de resina de poliéster; la placa es de ayuda para el proceso de pulido con el que queda descubierto el núcleo de la fibra, por lo que el sensor estará conformado por tres capas: núcleo de la fibra óptica, líquido bajo medición y aire.

La potencia óptica que puede ser medida a la salida del sensor dependerá de las condiciones de reflexión que sufre el haz a lo largo de la fibra y, por tanto, de las condiciones presentadas en la interfaz núcleo-líquido o líquido-aire. La precisión del dispositivo se ve afectada por la altura de la capa de líquido depositada sobre el núcleo de la fibra óptica, por lo que puede ser utilizado de dos maneras: depositando una gota sobre la superficie pulida (interfaz núcleo-líquido-aire) o sumergiendo por completo el sensor en el medio bajo medición (interfaz núcleo-líquido). La precisión del sensor es de 2×10^{-3} usando gotas sobre la superficie pulida, y de 5×10^{-3} sumergiéndolo en el líquido; es empleado para la medición de índices de refracción de 1.3 a 1.59 (usando una fibra de $n_{nucleo} = 1.492$ y $n_{revestimiento} = 1.417$).

Un sensor propuesto en [13] opera en el rango de índices de refracción de 1.36 a 1.46 con una precisión de 10^{-4} . Éste emplea una fibra óptica multimodo que es adelgazada en un tramo de longitud L , de tal manera que los diámetros de núcleo y revestimiento se reducen. Para determinado grosor de la sección adelgazada, ciertos modos propagados no satisfacen la condición de reflexión total interna dentro del núcleo de la fibra y es entonces cuando son radiados fuera del núcleo. Sin embargo, esos modos pueden ser guiados por el revestimiento si satisfacen las condiciones de reflexión en la interfaz revestimiento-medio. Para que dichos rayos puedan ser guiados, se debe de cumplir que el índice de refracción del revestimiento sea mayor que el índice de refracción del medio. La fuente de luz que emplea es un LED.

En la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM se realizaron una serie de proyectos de investigación científica y trabajos de tesis sobre sensores refractométricos de fibra óptica con un elemento transductor óptico externo de una forma geométrica semiesférica y semicilíndrica, para aplicaciones potenciales en diversos campos como en la industria alimentaria para acceder a la concentración de sal [14] en soluciones acuosas, medición de sustancias criogénicas como el nitrógeno líquido [3], también se utilizan para medir el nivel de agua, gasolina y combustible diesel en tanques en una forma de matrices de sensores [15] [16]. Las ventajas principales de los sensores refractométricos de fibra óptica con elemento de detección externo son en primer lugar su simplicidad y bajo costo en comparación con los sensores de fibras ópticas de otro tipo, así como el rango de índices de refracción en los que es posible trabajar con estos sensores.

5.5 Conclusiones

Los sensores de fibra óptica, en particular, los sensores refractométricos tienen varios campos de aplicación debido a las ventajas competitivas con respecto a los sensores mecánicos, eléctricos y de otros tipos. Sus principales ventajas consisten en la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, seguridad en ambientes inflamables y explosivos, alta resistencia a agentes químicos, un rango de temperaturas superior al rango que soportan los sensores de competencia y otras numerosas ventajas.

A pesar de la sensibilidad y resolución superior que presentan los sensores basados en SPR, FBG, LPFG y sensores refractométricos basados en fibras microestructuradas, el bajo costo y la simplicidad de los sensores refractométricos de tipo intensidad de fibra óptica los mantienen competitivos en muchas aplicaciones prácticas.

Los sensores refractométricos con elemento de detección externo de tipo intensidad presentan un gran interés práctico, dado que son relativamente fáciles de implementar y por esto tienen un costo menor en comparación con otros sensores de competencia.

Sin embargo, todavía existen problemas no resueltos que dificultan y restringen la introducción de estos sensores en la práctica. Por esto, es importante la obtención de nuevos conocimientos científicos y aplicados sobre los siguientes aspectos particulares dentro del tema del presente trabajo: las características de dichos sensores, tales como la función de transmisión en función del índice de refracción del medio externo y la pérdida intrínseca, en el modo de transmisión así como en el modo de reflexión, con un enfoque a la modificación de la respuesta del sensor en un rango grande de índice de refracción, aumento de la linealidad de la respuesta, aumento de la sensibilidad del sensor, y su diseño físico lo más compacto posible.

Referencias

- [1] Svirid, V., Khotiaintsev, S., & Swart, P. L. 2002. Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element. *Optical Engineering*, 41(4), 779-787.
- [2] Svirid, V., Khotiaintsev, S., & Swart, P. L. 2003. Linear and steplike characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element. *Optical Engineering*, 42(5), 1383-1389.
- [3] Romo Medrano, K. E., Khotiaintsev, S. 2006. An optical-fiber discrete liquid-level sensor for liquid nitrogen. *Measurement Science and Technology*, 17, pp. 998-1004.
- [4] Meteen, G. *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, CRC Press, 1999.

CAPITULO 5. Perspectiva de monitoreo de nivel de helio líquido en tanques y recipientes con sensores refractométricos de fibras ópticas

- [5] Kher, S., Chaubey, S., Kishore, J., and Oak, S. M. 2013. Detection of fuel adulteration with high sensitivity using turnaround point long period fiber gratings in B/Ge doped fibers. *Sens. J.* 13, 4482–4486
- [6] Posetti, G. R. C., Muller, M., Fabris, J. L. 2009. Refractometric optical fiber sensor for measurement of ethanol concentration in ethanol-gasoline blend. *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009 SBMO/IEEE MTT-S International*. IEEE, p. 616-620.
- [7] Wu, D., Zhao, Y., and Wang, O. 2015. SMF Taper Evanescent Field Based RI Sensor Combined with Fiber Loop Ring Down Technology. IEEE.
- [8] Komanec, M., Martan, T., Nemecek, T., and Zvanovec, S. 2015. Multimode fiber tapers for reproducible refractometric liquid detection. *Optical Engineering*, 54, 047102.
- [9] Sohn, K. R., 2010. Liquid sensors using refractive intensity at the end-face of a glass fiber connected to fiber-Bragg grating. *Sens. Actuators A*, 158, 193–197.
- [10] Huang, Y., Chen, B., Chen, G., Xiao, H., and Khan, S. U. 2013. Simultaneous detection of liquid level and refractive index with a long-period fiber grating based sensor device. *Meas. Sci. Technol.*, 24, 095303.
- [11] Jiang, Q., Hu, D., and Yang, M. 2011. Simultaneous measurement of liquid level and surrounding refractive index using tilted fiber Bragg grating. *Sens. Actuators A*, 170, 62–65.
- [12] Zubia, J., Garitaonandía, G., Arrúe, J. 2000. Passive device based on plastic optical fibers to determine the indices of refraction of liquids. *Applied Optics*, 39(6), pp. 941-946.
- [13] Villatoro, J., Monzón-Hernández, D., Talavera, D. 2004. High resolution refractive index sensing with cladded multimode tapered optical fibre. *IEEE Electronic Letters*, 40(2), pp.106-107.
- [14] Khotiaintsev, S., Garcia-Guerra, C. E., Morales-Farah, J. E., Perez-Garcia, S., Yam-Ontiveros, L. E. 2012. Optical intensity-type refractometer for remote measurements via fiber-optic cables. *IEEE J. Lightwave Technology*, 30(8), pp. 1073 – 1079.
- [15] Khotiaintsev, S. 2009. Discrete POF liquid-level sensor for measuring the level of gasoline and detecting water in automobile tanks. *In Proceedings of the 18th International Conference on Plastic Optical Fibers*, pp. 1–4.
- [16] Khotiaintsev, S., Llanito-Caudillo, E., Perez-Garcia, S., and Morales-Farah, J. 2009. Optical-fiber refractometric sensor with semi-cylindrical optical detection element for measuring the level of gasoline. *In Proceedings of the IEEE Conference on Electronics, Robotics and Automotive Mechanics, IEEE*, pp. 468–473.

6 CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

En este capítulo se evalúa la sensibilidad de un sensor refractométrico de helio líquido, con el fin de obtener una variación de la señal de salida suficientemente grande para poder trabajar de forma binaria en conjunto con el interrogador opto-electrónico en la medición de nivel de helio líquido en un contenedor. Se considera el sensor descrito en el artículo “Fiber-optic liquid-interface sensor for liquid hydrogen” [1], con la diferencia de que en este trabajo el sensor se diseña y optimiza para la detección de helio líquido. En el artículo reportan sensibilidades de $\mathfrak{R}_{LHe} = 3.5 \text{ dB}$ para el helio líquido y una sensibilidad de $\mathfrak{R}_{LH} = 20.6 \text{ dB}$ para el hidrógeno líquido.

A pesar de que ya existen sensores electrónicos para dichas sustancias, estos presentan las desventajas descritas en los capítulos anteriores. Por tanto es importante e interesante verificar, si los sensores de fibra óptica de [1] puedan tener una sensibilidad suficiente para distinguir de forma eficaz entre el helio líquido y el aire, para mediciones de nivel de helio líquido en tanques y recipientes.

6.1 Configuración y funcionamiento del sensor

El sensor consta de un pequeño elemento óptico de detección de una superficie de segundo orden y un par de fibras ópticas multimodo las cuales unen al elemento sensor con el transmisor y el receptor, tal como se muestra en la figura 6.1.

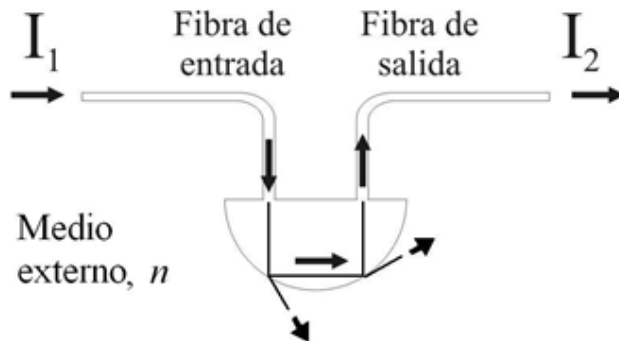


Figura 6.1 Configuración del sensor refractométrico

El funcionamiento del sensor se basa en la variación de la intensidad de la luz que se propaga a través del transductor óptico. La intensidad de la luz es una función, dada por las ecuaciones de Fresnel, de la reflexión interna (parcial o total) en la interfaz del transductor con el medio externo.

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

Cuando el transductor se encuentra en el aire, las dos fibras ópticas se encuentran ópticamente acopladas debido a la reflexión interna de la luz en la superficie esférica. Al entrar al líquido, la diferencia entre los índices de refracción del material del sensor y el medio externo es pequeña, lo cual reduce la reflexión interna (o la reflexión desaparece por completo). Por lo tanto, la intensidad de la luz y la señal de salida varían cuando el medio externo cambia de aire a helio líquido y viceversa.

Uno de los retos que se presentan en el diseño de dicho sensor es que la aplicación del principio refractométrico para estos fluidos es difícil dado su bajo índice de refracción, que es muy cercano al índice de refracción del aire. Presentando índices de refracción de $n_{LHe} = 1.026$ para el helio líquido y $n_{LH_2} = 1.11$ para el hidrógeno líquido.

Otro de los retos presentados es la discriminación entre el líquido criogénico, helio líquido, y el medio gaseoso, para lo cual es necesario que la función de transmisión óptica del transductor, $T(n)$, tenga un gradiente negativo tan grande como sea posible en el rango de $n = 1$ a n_{LHe} .

Parámetros del sensor

La propagación de la luz en el sensor depende fuertemente de las características físicas y ópticas del sensor. Por ello es importante definir parámetros sobre las características físicas del sensor así como sobre características de su interacción con la señal óptica (luz). En cuanto a las características físicas del sensor es conveniente definir parámetros adimensionales, referenciados a la dimensión fundamental del sensor. De esta manera si se desea fabricar el sensor, puede hacerse en gran escala o en miniatura sin afectar las propiedades del diseño.

En la figura 6.2 se observan los elementos ópticos del sensor así como las dimensiones físicas importantes. Puede apreciarse que la dimensión fundamental del sensor, geoméricamente hablando, es el radio R de la semiesfera, por tanto los parámetros físicos estarán referenciados a este.

Para las fibras ópticas (1) y (2) es importante definir el diámetro del núcleo, por lo que el diámetro adimensional del núcleo de las fibras ópticas queda definido cómo:

$$d = \frac{D}{R} \quad (6.1)$$

Siendo D el diámetro del núcleo y R el radio del elemento óptico detector (3).

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

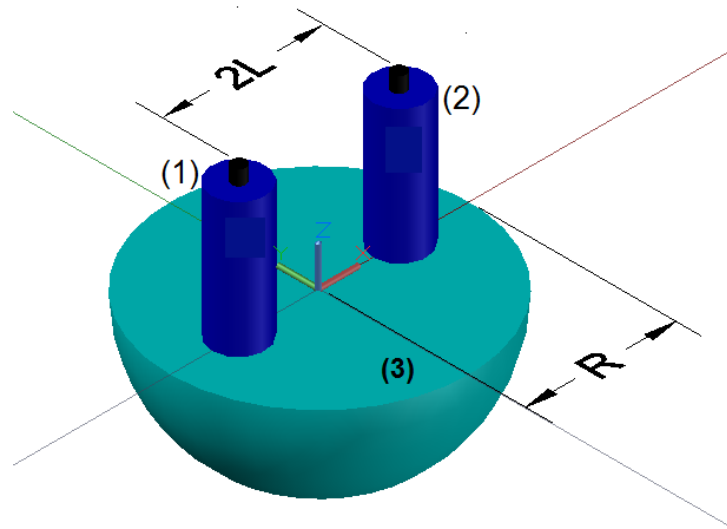


Figura 6.2 Dimensiones del sensor refractométrico

Otro parámetro físico importante de definir es la distancia entre las fibras y el eje vertical del transductor, ya que las fibras se encuentran de manera simétrica opuestas diametralmente respecto a dicho eje. Por tanto la distancia adimensional entre el eje de la fibra óptica y el eje vertical del transductor queda definida como:

$$A = \frac{L}{R} \quad (6.2)$$

Siendo L la distancia del eje de la fibra al eje vertical del transductor y R el radio del transductor.

En cuanto a los parámetros ópticos, son importantes la apertura numérica, NA , la función de transmisión óptica y la sensibilidad del sensor. La apertura numérica, cuando el medio es aire, se define con la ecuación 6.3, siendo n_1 y n_2 los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, respectivamente.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (6.3)$$

La función de transmisión óptica se define como la relación entre la intensidad óptica de salida, $I_2(n)$, y la de entrada del transductor, I_1 , como función del índice de refracción del medio externo:

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

$$T(n) = \frac{I_2(n)}{I_1} \quad (6.4)$$

La función de transmisión óptica define el funcionamiento del sensor, sin embargo no es posible medir de manera directa la intensidad óptica que incide en el elemento detector óptico (intensidad de entrada), ni la intensidad óptica incidente en la fibra receptora (intensidad de salida) por la misma estructura del sensor. La única intensidad óptica que puede cuantificarse es la que existe a la salida de la fibra receptora. Es por lo dicho anteriormente que se hace necesario tener una transmisión relativa al aire, que es donde puede realizarse la medición. Se considera la transmisión en el aire:

$$T_{aire} = \frac{I_{2aire}}{I_1} \quad (6.5)$$

Donde I_{2aire} es la intensidad óptica de salida y T_{aire} es la transmisión del sensor cuando el medio externo es el aire. Por tanto la transmisión relativa se define como:

$$T^*(n) = \frac{T(n)}{T_{aire}} = \frac{\frac{I_2(n)}{I_1}}{\frac{I_{2aire}}{I_1}} = \frac{I_2(n)}{I_{2aire}} \quad (6.6)$$

Hacer la función de transmisión óptica relativa al aire permite excluir las pérdidas intrínsecas al funcionamiento del sistema, como las debidas a los acoplamientos entre los elementos ópticos, y que no dependen del fluido que funge como medio externo. De esta manera la transmisión relativa $T^*(n)$ muestra solo los efectos de atenuación de la señal óptica asociados al medio externo y por consiguiente debido al índice de refracción.

En base a la transmisión relativa se define la sensibilidad del sensor, otro parámetro fundamental del sensor, como:

$$\mathfrak{R} [dB] = 10 * \log\left(\frac{1}{T^*(n)}\right) \quad (6.7)$$

6.2 Metodología de análisis teórico

El proceso de diseño del sensor es complicado puesto que no existe un método teórico que te diga cómo lograr aumentar la sensibilidad, y tampoco aseguran que la sensibilidad obtenida sea máxima.

En este trabajo se hizo una optimización iterativa, la cual consistió en ciclos de análisis de la respuesta del elemento transductor al índice refractivo externo mediante el trazado de rayos de

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

un modelo matemático del sensor. El modelo toma en cuenta la geometría del arreglo, en particular la forma de la superficie de trabajo del transductor y la posición de las fibras ópticas, transmisora y receptora, respecto al transductor, así como parámetros ópticos y constantes de los materiales de todos los elementos del conjunto. El trazado de rayos se realizó para cada variación de cada uno de los parámetros relevantes del arreglo, definidos en la sección anterior. Estos ciclos se repitieron sucesivamente.

Para la simulación del trazado de rayos se empleó el software SRFO, el cual es un software original desarrollado por nuestro equipo de trabajo en la UNAM. La interfaz del software se muestra en la figura 6.3, en donde puede verse que, como se mencionó anteriormente, toma en cuenta parámetros fundamentales del sensor (apertura numérica, diámetro adimensional de la fibra, forma geométrica del transductor, etc.) así como constantes del material (índice de refracción).

El software SRFO supone una distribución de luz uniforme del haz de luz, siendo ésta monocromática, no polarizada y no coherente, formada por 100 rayos. Así, dependiendo de los parámetros antes mencionados y tomando la contribución de cada rayo, se obtiene la transmisión óptica $T(n)$, la cual proporciona en un archivo de texto.

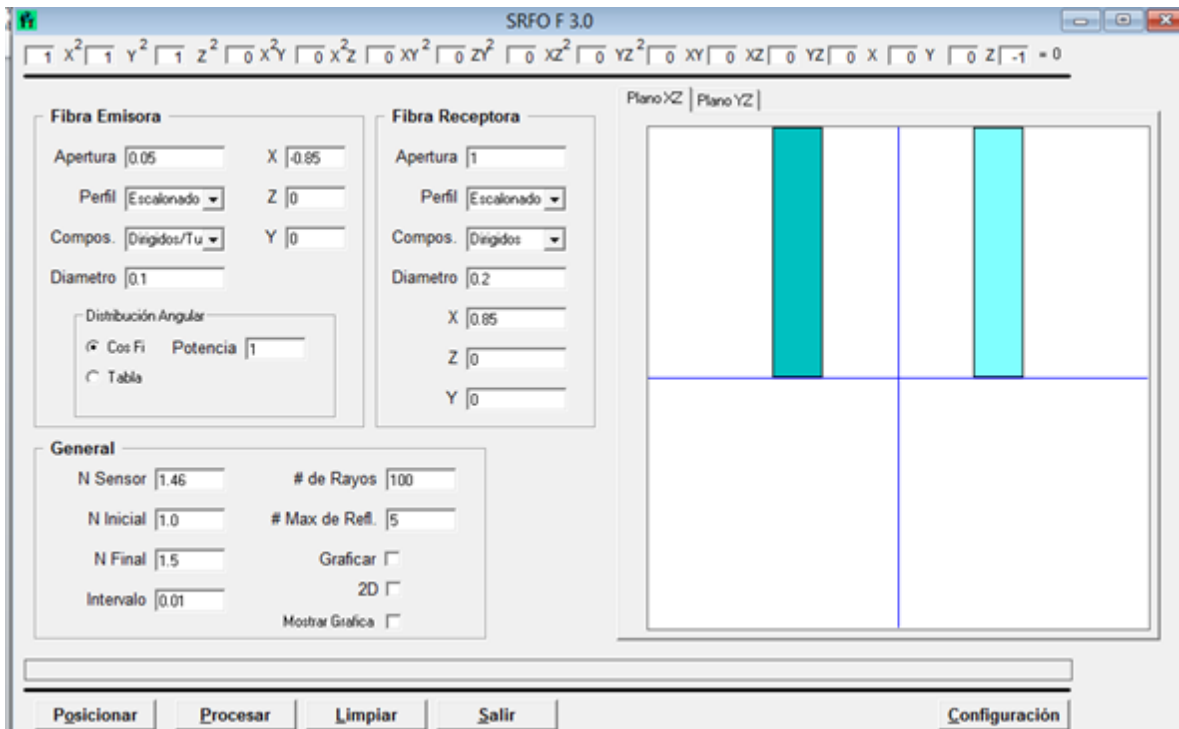


Figura 6.3 Interfaz del software SRFO, empleado para simular el trazado de rayos

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

En este trabajo se consideró una superficie esférica para el elemento óptico de detección y los siguientes parámetros del sensor permanecieron constantes en todas las simulaciones:

- $n_{sensor} = 1.46$
- $n_{inicial} = 1 ; n_{final} = 1.5 ; intervalo = 0.01$
- Número de rayos = 100. Número máximo de rayos reflejados = 5
- Fibra de perfil escalonado.

Para la optimización del sensor, como se mencionó, se realizó el trazado de rayos para cada variación de los parámetros relevantes del sensor, para los cuales se establecieron los siguientes rangos e intervalos de variación:

- Diámetro adimensional, d : 0.05 - 0.55 en intervalos de 0.05
- Distancia adimensional, Λ : 0.6 - 0.78 en intervalos de 0.02
- Apertura numérica, NA: 0.1 - 0.55 en intervalos de 0.05

Para cada una de las variaciones se realizó la simulación, al término de la simulación el software muestra los rayos que salen de la fibra transmisora y cuántos de estos están entrando a la fibra receptora, como se muestra en la figura 6.4. En esta figura también se aprecia la ventana de los resultados desplegados por el software, que son el número de rayos de salida y su razón en base al número de rayos recibidos. Esto permite tener una primera idea de la respuesta del sensor.

De cada simulación se obtuvieron datos de transmisión óptica los cuales se convirtieron a transmisión relativa, para así comparar la intensidad obtenida cuando el medio externo es helio líquido con la obtenida cuando el medio externo es aire. Posteriormente los datos de transmisión relativa se graficaron, para una mejor comprensión de estos, y se analizaron, obteniendo la sensibilidad correspondiente. A continuación se muestran los resultados.

Cabe mencionar que en cada caso se busca la curva de transmisión óptica una pendiente cercana a uno, pues en ese caso se tendrá la mejor sensibilidad.

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

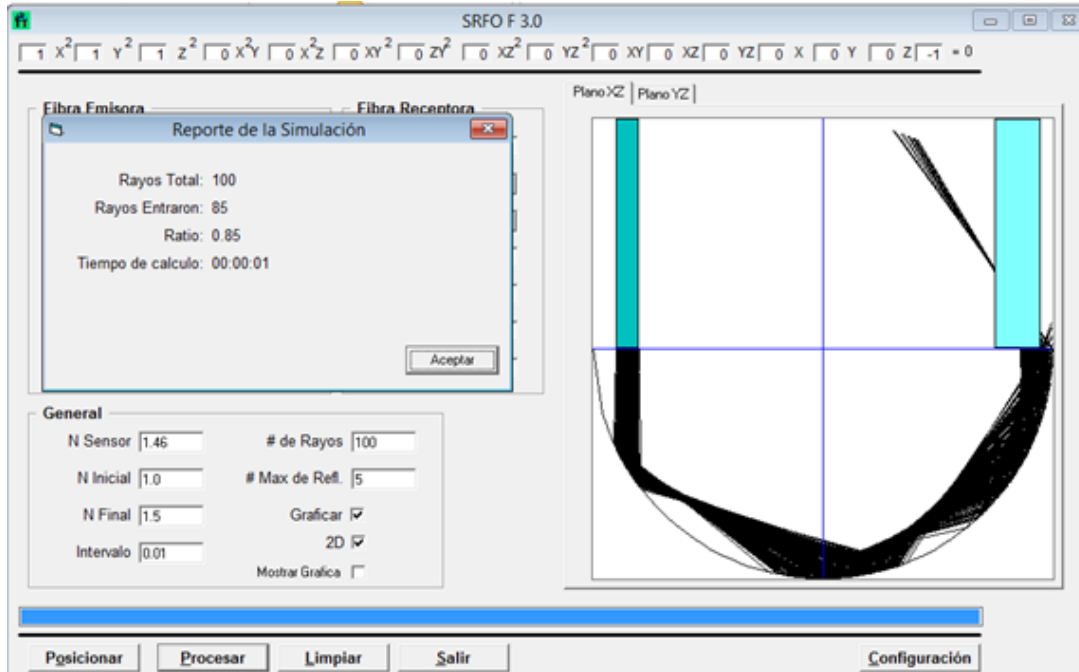


Figura 6.4 Ejemplo de simulación de trazado de rayos con parámetros específicos

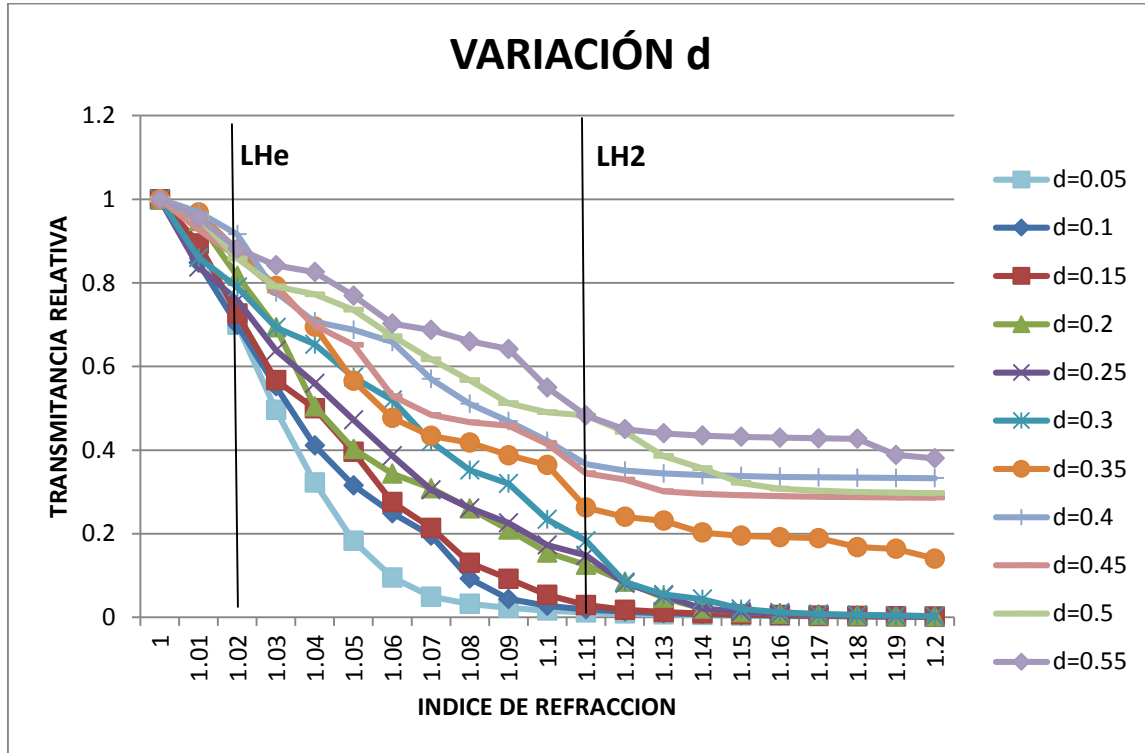
Variación del diámetro adimensional, d.

En el caso de la variación del diámetro adimensional se mantuvieron fijos $NA=0.45$ y $\Lambda=0.707$, los cuales en artículos anteriores se reportaron como óptimos [1], y se obtuvo la gráfica 6.1.

La sensibilidad obtenida en los puntos de interés, es decir, para el helio líquido ($n_{LHe} = 1.02$) y el hidrógeno líquido ($n_{LH_2} = 1.11$) se reporta en la tabla 6.1.

Como puede observarse en la gráfica 6.1, la función de transmisión relativa que presentan un mejor comportamiento, es decir, la que presenta una pendiente mayor es aquella relacionada al valor de diámetro $d=0.05$, presentando una sensibilidad de $\mathfrak{R}_{LHe} = 1.54 \text{ dB}$ para el helio líquido y una sensibilidad de $\mathfrak{R}_{LH_2} = 19.22 \text{ dB}$ para el hidrógeno líquido.

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido



Gráfica 6.1 Resultados gráficos de la variación del diámetro adimensional, d

Tabla 6.1 Sensibilidad en los puntos de interés para la variación del diámetro adimensional, d

n	d=0.0	d=0.1	d=0.1	d=0.2	d=0.2	d=0.3	d=0.3	d=0.4	d=0.4	d=0.5	d=0.5
	5	R	5	R	5	R	5	R	5	R	5
1.02	1.549	1.548	1.388	0.880	1.199	1.024	0.566	0.380	0.642	0.664	0.544
1.11	19.22	17.22	15.30	9.014	8.296	7.372	5.808	4.358	4.628	3.165	3.161
	8	1	4								

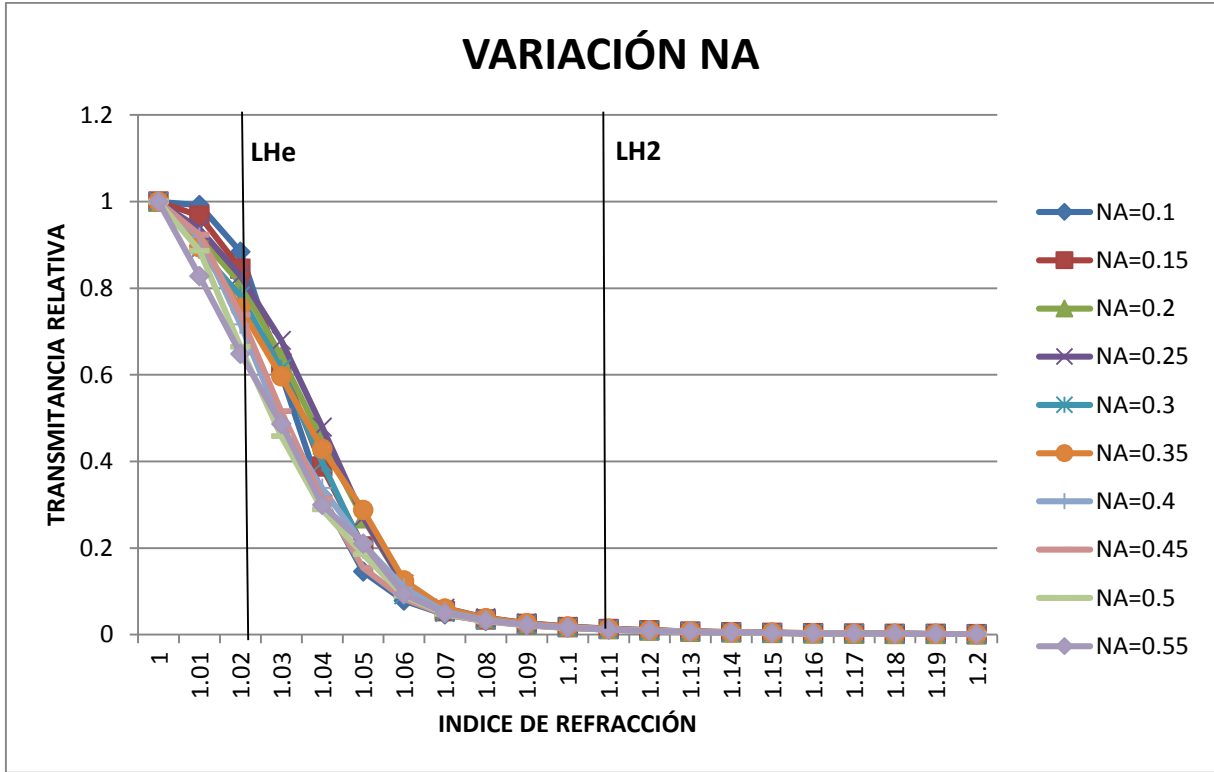
Variación de apertura numérica, NA.

En el caso de la variación de la apertura numérica se mantuvieron fijos $d=0.05$ y $\Lambda=0.707$, los cuales en artículos anteriores se reportaron como óptimos [1], y se obtuvo la gráfica 6.2.

La sensibilidad obtenida en los puntos de interés, es decir, para el helio líquido ($n_{LHe} = 1.02$) y el hidrógeno líquido ($n_{LH2} = 1.11$) se reporta en la tabla 6.2.

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

Como puede observarse en la gráfica 6.2, la función de transmisión no presenta gran variación según el valor de NA establecido, lo que si se logra apreciar es que las funciones relacionadas a NA=0.45 Y NA=0.5 son las que presentan una pendiente mayor, presentando una mejor sensibilidad en el primer caso como puede observarse en la tabla 6.2.



Gráfica 6.2 Resultados gráficos de la variación de la apertura numérica, NA

Tabla 6.2 Sensibilidad en los puntos de interés para la variación de la apertura numérica, NA

n	NA=0.1	NA=0.15	NA=0.2	NA=0.25	NA=0.3	NA=0.35	NA=0.4	NA=0.45	NA=0.5	NA=0.55
1.02	0.536	0.732	0.912	0.816	1.067	1.223	1.447	1.317	1.776	1.880
1.11	19.18	18.90	18.70	18.60	19.03	18.70	19.12	19.31	19.29	19.20
	9	4	3	7	8	9	5	5	2	6

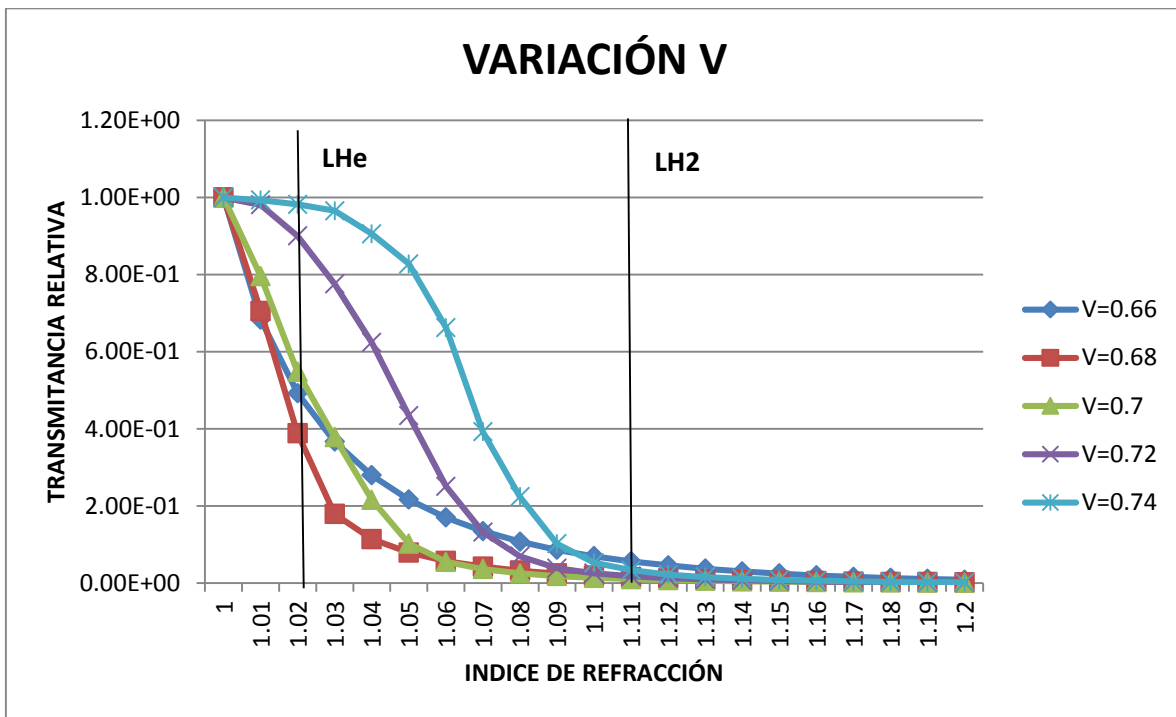
CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

Variación de la distancia adimensional, Λ

En el caso de la variación de la distancia adimensional se mantuvieron fijos $NA=0.45$ y $d=0.05$, los cuales en artículos anteriores se reportaron como óptimos [1]. En este caso para $\Lambda = 0.6, 0.62, 0.64, 0.76, 0.78$, se obtuvieron valores de transmitancia muy bajos por lo que no se tomaron en cuenta para graficar. Por tanto con los datos restantes se obtuvo la gráfica 6.3.

La sensibilidad obtenida en los puntos de interés, es decir, para el helio líquido ($n_{LHe} = 1.02$) y el hidrógeno líquido ($n_{LH2} = 1.11$) se reporta en la tabla 6.3.

Cómo puede observarse en la gráfica 6.3 las transmitancias que presentan una mejor pendiente son las relacionadas a los valores de $\Lambda=0.68$ y $\Lambda=0.7$, presentando una mejor sensibilidad en el primer caso.



Gráfica 6.3 Resultados gráficos de la variación de la distancia adimensional, Λ

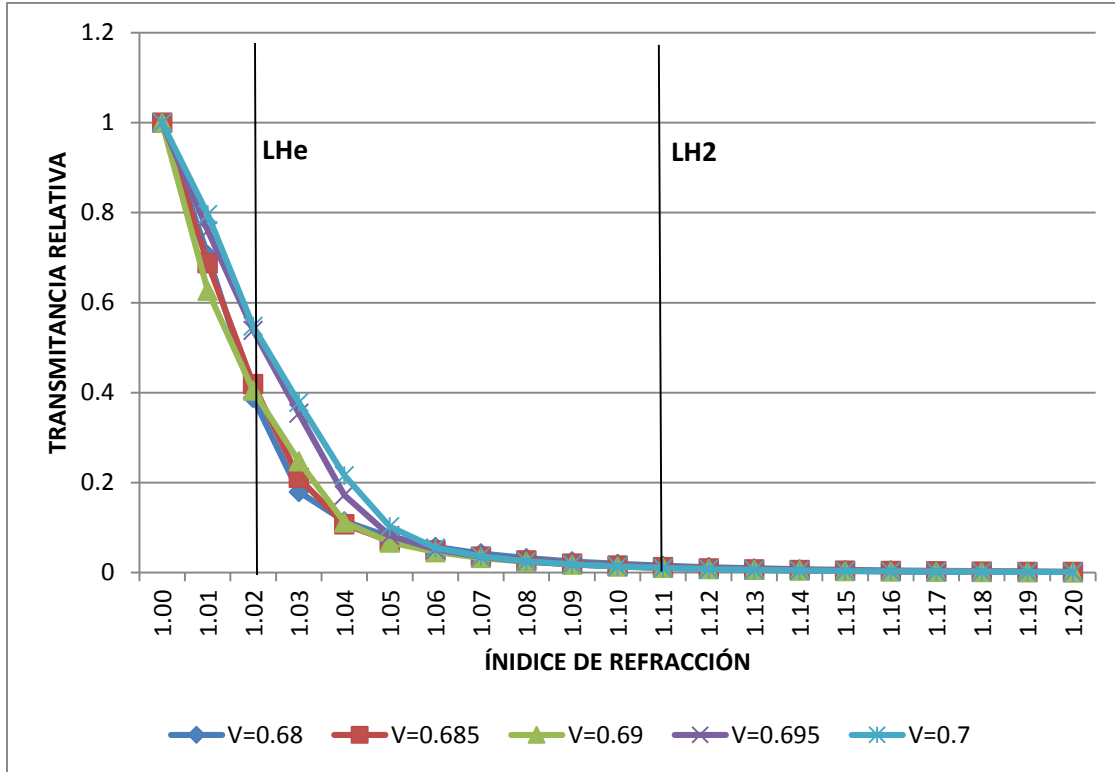
Tabla 6.3 Sensibilidad en los puntos de interés para la variación de Λ

n	$\Lambda=0.66$ R	$\Lambda=0.68$ R	$\Lambda=0.70$ R	$\Lambda=0.72$ R	$\Lambda=0.74$ R
1.02	3.08	4.109	2.615	0.455	0.077
1.11	12.5	18.133	19.868	17.437	14.755

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

En esta parte se vio que entre las curvas de 0.68 y 0.7 aún había un rango por analizar, por tanto se decidió profundizar el análisis en dicho rango. Por esta razón se simuló para valores que se consideraron prudentes para ver el comportamiento en el rango de 0.68 a 0.7, los cuales fueron Λ : 0.68, 0.685, 0.69, 0.695, 0.7. Obteniendo la gráfica 6.4 y las sensibilidades en los puntos de interés mostradas en la tabla 6.4.

En estas puede observarse que al refinar el análisis, los valores que presentan una mayor pendiente y una mejor sensibilidad son $\Lambda=0.685$ y $\Lambda=0.69$ siendo mejor el último.



Gráfica 6.4 Resultados gráficos de la variación fina de la distancia adimensional, Λ

Tabla 6.4 Sensibilidad en los puntos de interés para la variación de Λ

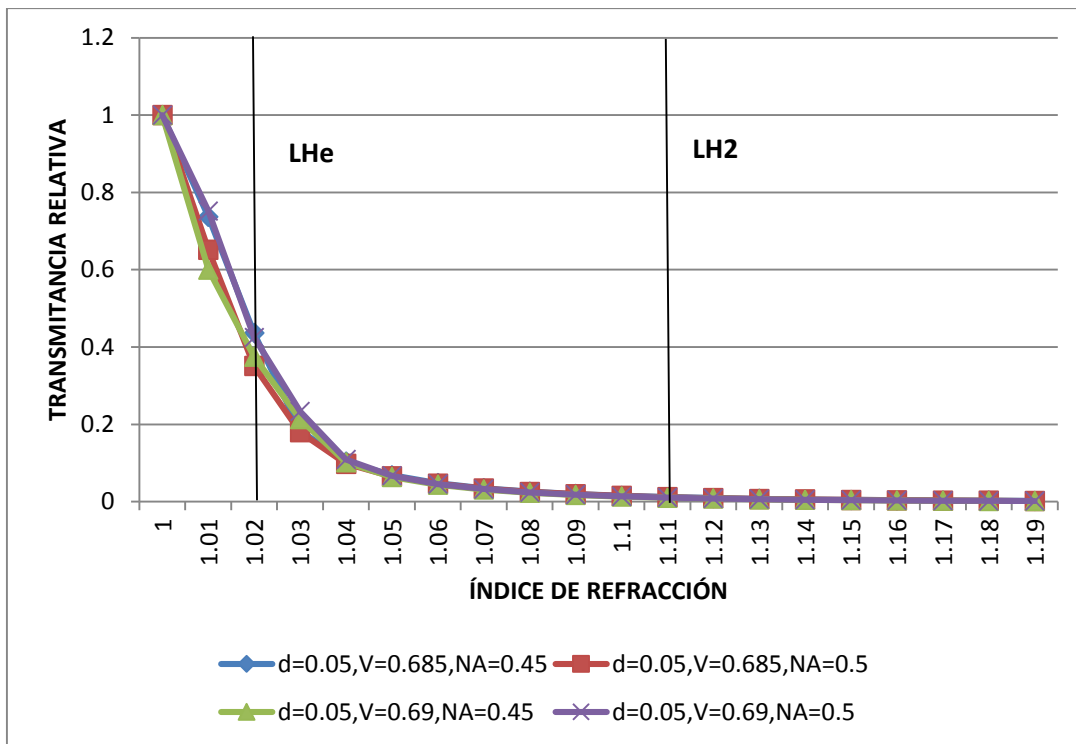
N	$\Lambda=0.68$ R	$\Lambda=0.685$ R	$\Lambda=0.69$ R	$\Lambda=0.695$ R	$\Lambda=0.7$ R
1.02	4.109	3.777	3.929	2.686	2.615
1.11	18.133	19.110	19.669	19.767	19.868

6.3 Parámetros óptimos encontrados y comparación de los resultados.

Al realizar el análisis en conjunto de las tres variaciones se encuentra que algunos parámetros óptimos encontrados durante las simulaciones son: $d=0.05$, $NA=0.45$, $NA=0.5$, $\Lambda=0.685$ y $\Lambda=0.69$. Por lo que se realizaron simulaciones en donde se combinaron dichos valores y se observó cuál de estas presentaba un mejor comportamiento, cercano al deseado.

En la gráfica 6.5 podemos observar las curvas correspondientes a la función de transmitancia relativa de cada una de las combinaciones realizadas con los parámetros, en donde se observa que las curvas que presentan una pendiente mayor, que son las de interés son las correspondientes a:

- $d=0.05$, $\Lambda=0.685$, $NA=0.5$
- $d=0.05$, $\Lambda=0.69$, $NA=0.45$



Gráfica 6.5 Transmitancia relativa, resultado de la combinación de los parámetros con mejor respuesta

Posteriormente en la tabla 6.5 podemos observar la sensibilidad presentada para cada caso y si analizamos la sensibilidad presentada por cada combinación de parámetros en ambos puntos de interés, es decir, en los índices correspondientes al helio líquido y al hidrogeno líquido, se puede decir que la mejor respuesta se obtiene con la siguiente combinación: $d=0.05$, $\Lambda=0.69$ y $NA=0.45$

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

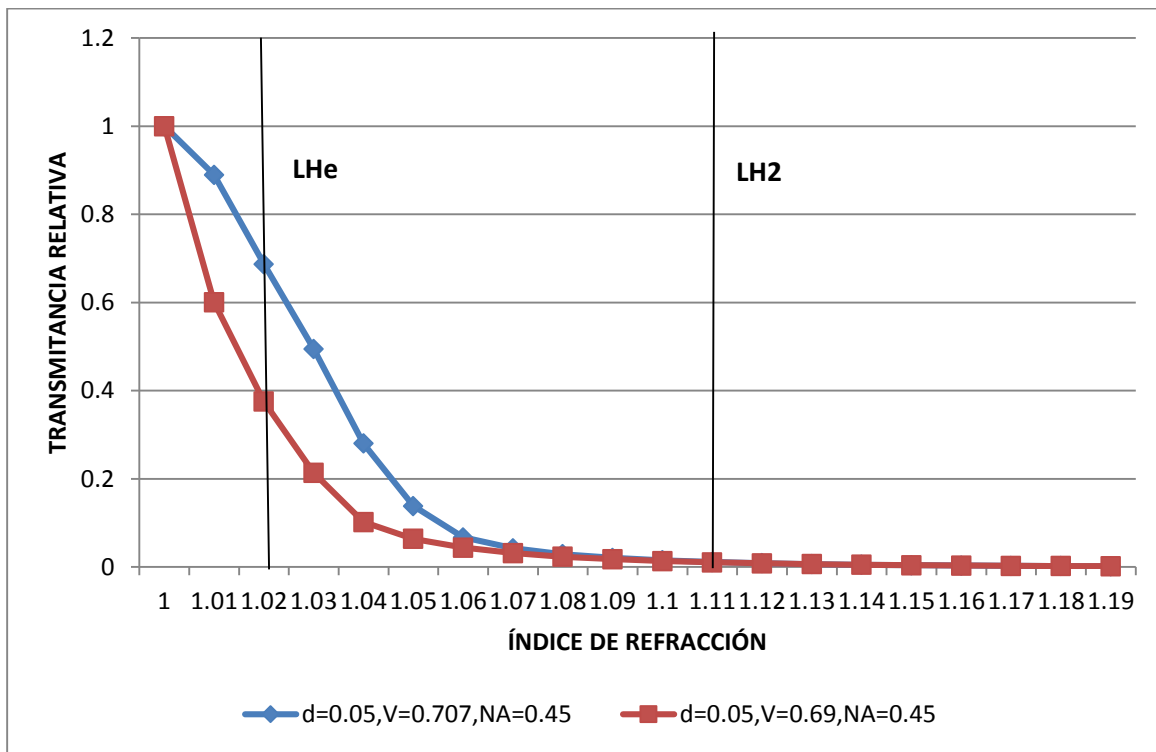
Tabla 6.5 Sensibilidad presentada en la combinación de los parámetros con mejor respuesta

n	d=0.05, $\Lambda=0.685$, NA=0.45 R	d=0.05, $\Lambda=0.685$, NA=0.5 R	d=0.05, $\Lambda=0.69$, NA=0.45 R	d=0.05, $\Lambda=0.69$, NA=0.5 R
1.02	3.601	4.547	4.259	3.715
1.11	19.270	19.366	19.847	19.733

Comparación de resultados

Con los parámetros óptimos encontrados en ésta sección se realizó una última simulación y se comparó con los que en el trabajo previo [1] habían reportado como óptimos ($d=0.05$, $NA=0.45$, $\Lambda=0.707$) y de esa manera observar si se logró el objetivo de aumentar la sensibilidad para el helio líquido.

En la gráfica 6.6 se presentan las curvas de la transmitancia relativa obtenidas para cada caso y en la tabla 6.6 la sensibilidad del sensor obtenida en los puntos de interés.



Gráfica 6.6 Comparación de la transmitancia entre el conjunto de parámetros óptimos

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

Tabla 6.6 Comparación de sensibilidad para los conjuntos de parámetros óptimos

n	d=0.05, NA=0.45, $\Lambda=0.707$	d=0.05, NA=0.45, $\Lambda=0.69$
1.02	1.62955987	4.25910179
1.11	19.5122753	19.8477843

6.4 Conclusiones

Después de un proceso iterativo de simulaciones del sensor en el software de trazado de rayos SRFO, en las cuales se variaron los parámetros de interés (diámetro adimensional, distancia adimensional entre los ejes y apertura numérica) y se observó la respuesta, se considera que se obtuvieron resultados satisfactorios.

Se logró optimizar la respuesta del sensor a pequeñas variaciones del índice de refracción externo cercano a uno.

Se observó la influencia de cada uno de los parámetros en la respuesta del sensor, es decir, en su función de transmisión óptica y como consecuencia en su sensibilidad. El análisis mostró un efecto muy fuerte del diámetro adimensional del núcleo de la fibra óptica, d , en la sensibilidad del sensor en la vecindad del índice de refracción del aire $n=1$. También la posición de las fibras ópticas con respecto al eje vertical del sensor presento una influencia fuerte en la sensibilidad. Mientras que la apertura numérica tuvo un efecto moderado en la sensibilidad.

Los parámetros óptimos del sensor encontrados en este trabajo fueron $d = 0.05$, $\Lambda = 0.69$, $NA = 0.45$.

Como puede observarse en la gráfica 6.6 la curva de transmitancia relativa correspondiente al conjunto de parámetros encontrados como óptimos en este trabajo presenta una mayor pendiente que la correspondiente al conjunto de parámetros óptimos referenciado en el trabajo previo [1].

De igual manera si comparamos la sensibilidad del sensor (tabla 6.6) para cada caso en los puntos de interés se nota una mejora, siendo mayor en el caso del helio líquido. Con nuestros parámetros se logra una sensibilidad de $\mathfrak{R}_{LHe} = 4.259 \text{ dB}$ para el helio líquido con respecto al aire.

Pese a que la variación de la señal obtenida es relativamente pequeña, es suficiente para distinguir entre el helio líquido y el medio gaseoso sobre él, lo que permitiría la medición del nivel de helio líquido en un tanque de almacenamiento con nuestro interrogador desarrollado en este trabajo y descrito en el Capítulo 3.

CAPITULO 6. Evaluación de la sensibilidad de un transductor de fibra óptica para la medición de nivel de helio líquido

Referencias

- [1] Khotiaintsev, S., Svyryd, V., & del Puerto, H. M. (2009). Fiber-optic liquid-interface sensor for liquid hydrogen. *Sens. Mater.*, 21(1), 13-23.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se realizó la investigación de las vías de implementación práctica de arreglos de algunos sensores binarios de tipo intensidad basados en fibra óptica y respectivos sistemas opto-electrónicos de monitoreo de las señales de dichos arreglos. Con base en los resultados obtenidos se desarrolló una aplicación de dichos sensores en el monitoreo de la salud estructural de edificios. La ventaja de los sensores de fibra óptica en dicha aplicación está relacionada con sus características como: inmunidad a la interferencia electromagnética, seguridad en ambientes inflamables y explosivos, alta resistencia a la corrosión química, un rango de temperatura de operación amplio, un alto grado de multicanalización debido a su gran ancho de banda, son pequeños y ligeros.
2. Se desarrolló una técnica eficiente, simple y de bajo coste, que permite una evaluación rápida de los daños en una estructura. Su simplicidad y bajo coste de materiales (fibras ópticas) e instrumentos (interrogador opto-electrónico) resultan en una gran ventaja competitiva en comparación con las técnicas eléctricas y ópticas existentes, que son más costosas y complejas como son las rejillas de Bragg de fibra óptica (FBG), el resonador de fibra óptica Fabry-Perot (FPR) y los sistemas de análisis óptico en el dominio de tiempo Brillouin (BOTDA).
3. Dicha técnica de monitoreo consiste en adherir un arreglo de sensores (fibras ópticas) a la superficie del elemento estructural (o embeber dentro del elemento), fungiendo las fibras como “nervios” de la estructura, y mediante el monitoreo de la transmisión óptica a través de las fibras detectar los daños presentados por la estructura, como la aparición de grietas.
4. Para la interrogación de dichos sensores se diseñó e implementó un interrogador opto-electrónico. El interrogador cuenta con 16 canales ópticos de interrogación y tiene la posibilidad de escalabilidad. Es un sistema pulsátil en modo TDM (16 transmisores y un receptor), que ofrece la posibilidad de trabajar con fibras de diversos diámetros de núcleo. Finalmente es un sistema pequeño que emplea dispositivos electrónicos fáciles de adquirir.
5. Se comprobó la eficacia de la técnica de monitoreo y del interrogador propuestos mediante el desarrollo de una aplicación (monitoreo de daño estructural a una pila de mampostería de tabique). Se demostró que la variación de la transmisión óptica de las fibras ópticas adheridas a la superficie del elemento estructural se correlaciona con la aparición y ensanchamientos de las grietas presentadas en la superficie de dicha estructura. También se comprobó que el interrogador fue capaz de medir dichas variaciones en las fibras del arreglo.

CONCLUSIONES GENERALES

6. En cuanto al sensor refractométrico, mediante la evaluación de la sensibilidad, se encontró un conjunto de parámetros óptimos del mismo. Esto se logró mediante un proceso iterativo de simulaciones del sensor en un software de trazado de rayos, SRFO. La variación de la señal de salida, respecto al aire, alcanzada fue de $\mathfrak{R}_{LHe} = 4.25 \text{ dB}$ lo que permite al sensor distinguir entre el helio líquido y el medio gaseoso. De igual manera dicha variación permite el trabajo conjunto entre arreglo de dichos sensores y el interrogador opto-electrónico.
7. Algunos resultados del presente trabajo fueron publicados en forma de ponencias en foros internacionales:
 - a. Mirón-Carrasco, S. J.; Martínez-Gonzalez, D. M.; Khotyaintsev, S. 2016. Design of optical-fibre refractometric sensors for liquid helium. *2nd International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumental Advances (SEIA' 2016)* llevado a cabo del 22 al 23 de septiembre de 2016 en Barcelona, España. (Anexo A)
 - b. Gonzalez-Tinoco, J. E., Martínez-Gonzalez, D. M., Miron-Carrasco, J., Khotiaintsev, S., Guzman-Olguin, H. J., Lopez-Bautista, M. C., ... & Sanchez-Ramirez, A. R. (2016, July). Specialized optical fibre sensor array for structural damage detection. *In Proceedings of Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2016 10th International Symposium on* (pp. 1-4). IEEE. (Anexo B)

Además fue sometido un manuscrito “Fiber – optical system for structural damage detection in brick masonry elements of historical buildings” a la revista internacional con arbitraje riguroso “International Journal of Architectural Heritage”, el cual se encuentra actualmente en revisión por tres árbitros del campo del conocimiento respectivo asignados por la dirección de la revista.

8. Concluyendo el presente trabajo muestra nuevas y eficientes implementaciones de los sensores basados en fibra óptica de tipo intensidad, teniendo una gran oportunidad de aplicación en entornos reales.

ANEXO A

Design of Optical-fibre Refractometric Sensors for Liquid Helium

Santa Junnuen Miron-Carrasco¹, Dora Mariela Martínez-Gonzalez¹, Sergei Khotiaintsev²

¹Posgrado en Ingeniería, ²Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México,
Avenida Universidad 3000, Ciudad de México, México, c.p. 04510
junnuen_14@hotmail.com, dorigol24@hotmail.com, sergeikh@unam.mx

Abstract: We present an optical-fibre refractometric transducer designed for the detection of liquid helium in storage tanks and elements of cryogenic installations. The transducer parameters were optimized for the discrimination between the liquid helium and the gaseous helium or air above it. The predicted signal is of 2.2 dB, which, although relatively small, allows for the detection of liquid-helium and gas interface, and for the measurement of liquid helium level.

Key words: refractive index sensing, optical fibre sensors, cryogenic fluids, liquid hydrogen, liquid helium.

1. INTRODUCTION

The use of cryogenic fluids such as liquid nitrogen (LN), liquid oxygen (LOX), liquid hydrogen (LH2) and liquid helium (LHe) progressively increases in scientific research, industry and medicine. Therefore, there is an interest in developing new and better sensors for cryogenic fluids. The refractometric optical fibre sensors, in particular, offer several competitive advantages over traditional electrical sensors, thanks to low thermal conductivity, immunity to electromagnetic interference and small size of the optical fibres [1] - [6].

However, the refractive index, n , of the cryogenic fluids is quite small. For example, $n_{LN}=1.21$, $n_{LH2}=1.11$ and $n_{LHe}=1.026$. The small refractive index presents difficulty in discriminating between the cryogenic fluid and gas above it [7].

2. REFRACTOMETRIC TRANSDUCER DESIGN FOR THE LHe

We considered a hemispherical transducer described in our previous works [8], [9], with the difference that we designed and optimized this transducer for the detection of the LHe with the lowest refractive index among the liquid substances.

The generic configuration of this transducer is shown in Fig. 1.

The transducer consists of a small transparent optical detection element (1) and a pair of multimode optical fibres (2) that link the element with the optical transmitter and receiver. When the sensing element is in the air, the two optical fibres are optically coupled due to internal reflection of light at the spherical surface of the element.

In a liquid, the difference between the refractive index of the sensor material and that of the external medium is smaller. It reduces the total internal reflection (or the reflexion vanishes completely). This

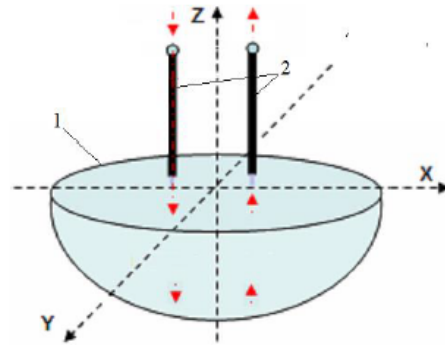


Fig.1. Schematic of the refractometric transducer.

allows one to perceive the changes in the kind of external liquid medium from air to liquid and vice versa.

For reliable discrimination between a cryogenic fluid such as LHe and a gaseous medium, an optical transmission function of the transducer, $T(n)$, has to have the largest possible negative gradient in the range from $n=1$ to n_{LHe} .

In order to achieve this goal, we carried on an iterative optimization, which consisted of cycles of numerical analyses of the transducer by means of ray-tracing of respective mathematical model. More specifically, we analysed the transducer response to the external refractive index. The mathematical model accounted for the transducer's geometry; in particular the form of transducer's working surface and the position of the two optical fibers with respect to the transducer axis z , as well as optical parameters and material constants of all array elements. The analysis by ray-tracing was followed by a variation of one of transducer's parameters. These cycles were repeated successively. The criterion for the optimality was the maximum signal $\mathcal{R}=I(\text{air})/I(n)$, $I(\text{air})$ and $I(n)$ is the light intensity at the sensor output when the sensor is in the air and liquid, respectively.

The results are presented in Figure 2

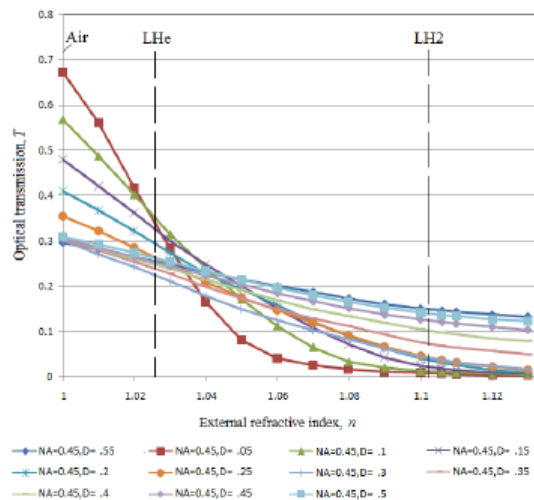


Fig. 2. Optical transmission T vs. the external refractive index n for distinct combinations of parameters.

The analysis showed a very strong effect of dimensionless diameter of the optical fibre core, d , on the signal \mathcal{R} in the vicinity of $n=1$. Also, the position of the two optical fibres with regard to transducer axis z had a strong effect on the signal \mathcal{R} . While the numerical aperture NA in a range 0.2-0.5 had a moderate effect on the sensitivity \mathcal{R} . For the transducer and optical fibre core of fused silica glass (SiO_2 , $n=1.45$ at 20 K), the optimal parameters found in this work were: $\Lambda = 0.707$, $d=0.05$, $NA=0.45$. These parameters yielded the signal $\mathcal{R}_{\text{LHe}} = 2.2$ dB.

3. CONCLUSIONS

The transducer described in this paper was designed and optimized for discrimination between the LHe and the gaseous medium such as the air or gaseous helium. The optimization yielded the predicted signal $\mathcal{R}_{\text{LHe}} = 2.2$ dB. Such a signal is relatively small, nevertheless, it allows one to discriminate between the LHe and the gaseous medium, and detect the interface between the LHe and the gas above it, as well as measure the level of LHe in storage tanks and elements of cryogenic installations.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the support of this work by the General Directorate for Academic Staff Affairs (DGAPA) of the National Autonomous University of Mexico (UNAM) [grants PAPIIT IT102515 and PAPIIME PE10161], and the Institute of Engineering and the Faculty of Engineering of the UNAM [joined grant Sistemas de Detección Temprana de Riesgos en Edificios Históricos].

REFERENCES

- [1] J. Villatoro, J. Zubia, "New perspectives in photonic crystal fibre sensors," *Optics and Laser Technology*, vol. 78, pp. 67-75, 2016.
- [2] A. N. C. Martinez, M. Komanec, T. Nemecek, S. Zvanovec, & S. Khotiaintsev, "Fiber optic refractometric sensors using a semi-ellipsoidal sensing element," *Applied Optics*, vol. 55, no. 10, pp. 2574-2579, 2016.
- [3] M. Komanec, T. Martan, T. Nemecek, & S. Zvanovec, "Multimode fiber tapers for reproducible refractometric liquid detection," *Optical Eng.*, vol. 54, no. 4, p. 047102-1-047102-6, 2015.
- [4] P. Zubieta, C. R. Zamarreño, I. Del Villar, I. R. Matias, and F. J. Arregui, "High sensitive refractometers based on lossy mode resonances (LMRs) supported by ITO coated D-shaped optical fibers," *Optics Express*, vol. 23, no. 6, pp. 8045-8050, 2015.
- [5] I. Del Villar, A. B. Socorro, J. M. Corres, F. J. Arregui, and I. R. Matias, "Refractometric sensors based on multimode-single-mode structure with reflection configuration," *Applied Opt.*, vol. 18, pp. 3913-3919, 2014.
- [6] G. Salceda-Delgado, D. Monzon-Hernandez, A. Martinez-Rios, G. A. Cardenas-Sevilla, and J. Villatoro, "Optical microfiber mode interferometer for temperature independent refractometric sensing," *Optics Lett.*, vol. 37, no. 11, pp. 1974-1976, 2012.
- [7] C. Yang, S. Chen, and A. Kazemi, "Fiber-optical liquid level sensor under cryogenic environment", *Proc. SPIE*, vol. 4204, pp. 206-215, 2001.
- [8] K. E. Romo Medrano, S. Khotiaintsev, "An optical-fiber discrete liquid-level sensor for liquid nitrogen," *Measurement Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 998-1004, 2006.
- [9] S. Khotiaintsev, V. Svyryd, H. Mejia del Puerto, "Fiber-optic liquid-interface sensor for liquid hydrogen," *Sensors and Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 13-23



Certificate of Participation

This is to certify that

Santa Junnuen MIRÓN-CARRASCO

has participated in the

**2nd International Conference on Sensors Engineering
and Electronics Instrumental Advances (SEIA'16)**

Held in Castelldefels, Barcelona, Spain; September 22-23, 2016

Prof. Dr. Sergey Yurchak
International Frequency Sensor
Association (IFSA)



Samin Farid Mulya
Dr. Amin Darmasward Mulya
Asia Society of Applied
Mathematics and Engineering
(Asia-SAME)

ANEXO B

Specialized Optical Fibre Sensor Array for Structural Damage Detection

J. E. Gonzalez-Tinoco, D. M. Martinez-Gonzalez, J. Miron-Carrasco
Posgrado en Ingeniería Eléctrica
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México
telerin10@hotmail.com

S. Khotiantsev, H. J. Guzman-Olguin, M. C. Lopez-Bautista, M. A. Zuñiga Bravo
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México
sergeikh@unam.mx

E. Ovando-Shelley, A. R. Sanchez-Ramirez
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México
eovs@pumas.ii.unam.mx

Abstract—We describe a sensor system for damage detection in concrete structures after extreme events such as earthquakes. The system employs large array of optical fibres (up to 256 fibres) that are either embedded in, or bonded to the surface of the structural element or elements under test. A structural damage (cracks or complete failure) results in breaking of one or several optical fibres and sharp decrease in their optical transmission. The fibres are interrogated using a matrix-type optical fibre circuit with 16 optical transmitters and 16 optical receivers that operate in the TDM mode. This type of system can be used for monitoring of large arrays of other intensity-type optical sensors.

Keywords—optical fibre sensors; distributed sensing; optical fibre networks; time-division multiplexing; structural health monitoring; smart structures

I. INTRODUCTION

Damage detection in structures such as building and vehicles by means of different sensor systems attracts a lot attention in recent years [1]–[6]. A timely detection of damages allows for making the right decision about further actions and could prevent major disasters.

Structural damage is associated with the appearance, extension and widening of cracks in structural elements beyond a certain value. That is, the structural damage detection capability depends on the effective means of detecting, identifying and locating cracks. In our previous works we described a technique for structural damage detection in concrete elements, such as beams and columns with arrays of common multimode optical fibres (with no special sensing elements or structures, such as Fiber Bragg Grating (FBG), Long Period Fiber Gratings (LPFG) and so on) embedded in these elements, or attached to their surface [7], [8]. The technique is aimed at damage detection to buildings and other structures (in particular, concrete structures) shortly after catastrophic events, such as explosions, fire, earthquakes and so on.

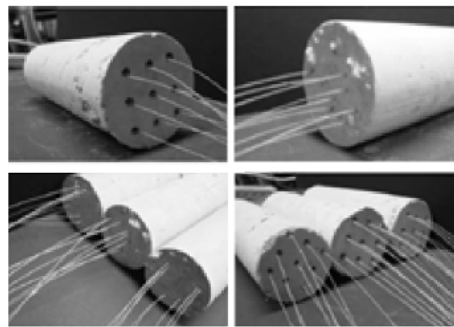


Fig. 1. Concrete elements with embedded arrays of optical fibres that serve as binary-type indicators of structural damage (cracks) in these elements.

The elasticity of silica optical fibre is higher than the elasticity of concrete; therefore, the optical fibre does not break under the elastic deformation of concrete elements. However, the appearance and widening of a crack above a certain value result in the rupture of the optical fibre, which crosses the crack zone. The rupture of the fibre, in turn, results in a sharp decrease of the intensity of optical signal that is transmitted via the optical fibre. Such a sharp decrease is an indication of the structural damage. Thus, the optical fibres can serve as indicators of structural damage.

Fig. 1 illustrates a number of structural elements of concrete with embedded optical fibres. It is worth to note that despite the loss of some optical fibres during the embedding process, quite a significant portion of optical fibres survive and constitute sensor arrays that can be used for damage detection during the complete lifespan of the structural element.

For damage detection in large structures, it is necessary to employ large arrays of such “sensor fibres” embedded in critical structural elements, or attached (glued) to their surface.

A large number of sensor fibres in an array required for damage detection in a structure poses a problem of efficacious

This work was supported by the General Directorate for Academic Staff Affairs (DGAPA) of the National Autonomous University of Mexico [grants PAPIIT IT102515 and PAPIIME PE10161], and the Institute of Engineering and the Faculty of Engineering of the National Autonomous University of Mexico [joined grant Sistemas de Detección Temprano de Riesgos en Edificios Históricos].

and at the same time economic interrogation of such arrays. This refers to the optical, electronic and optoelectronic components that are required for the implementation of such arrays, and also to their energy consumption. Following is a description of the sensor array that implements a matrix-type 16x16 optical circuit and associated electronic and optoelectronic components and devices. The system is capable of interrogation of up to 256 sensor fibres in the Time Division Multiplexing (TDM) mode.

II. OPTICAL FIBER SENSOR ARRAY DESCRIPTION

The essential elements of the developed sensor array are:

1. Sensor optical fibres embedded in one or several structural elements, or attached (glued) to the surface of element or elements,
2. Connecting optical fibres,
3. TDM optical transmitter,
4. TDM optical receiver,
5. Control circuits and
6. Data processing unit.

The current version of the sensor array can employ and interrogate up to 256 sensor fibres in the TDM mode. We employed a matrix-type optical network with a 16-channel optical transmitter and 16-channel optical receiver operating in the TDM mode.

As we used multimode optical fibres for the sensor array, there was no need in using injection lasers for light sources. Moreover, differently from all modern optical communications systems, our network works in the visible region of the spectrum and employs Light Emitting Diodes (LED) as light sources. The choice of using LEDs instead of injection lasers resulted in the low cost and allowed for simple coupling of a multitude of sensing fibres directly to the LED surface instead of using optical fibre directional couplers for branching of measurement channels (sensor fibres) in our optical network.

For illustration purposes, Fig. 2 shows an optical matrix network of much smaller dimensions (4x4) with 16 sensor fibres.

Each LED of the four optical transmitters is coupled to a bundle of four connecting optical fibres. Each of these fibres is spliced to one of sixteen sensor fibres. The opposite ends of the sensor fibres are coupled to the four photo detectors (PD) of the four optical receiver (via their respective connecting fibres), as shown in Fig 2. The activation of one LED and one photo detector (and respective photo receiver) establishes the connection between the optical transmitter and receiver via one particular sensor fibre out of the total of 16 sensor fibres. In addition to other circuit elements, the connecting fibres have optical connectors that simplify the installation of large optical fibre sensor arrays of this type in a building or in a vehicle.

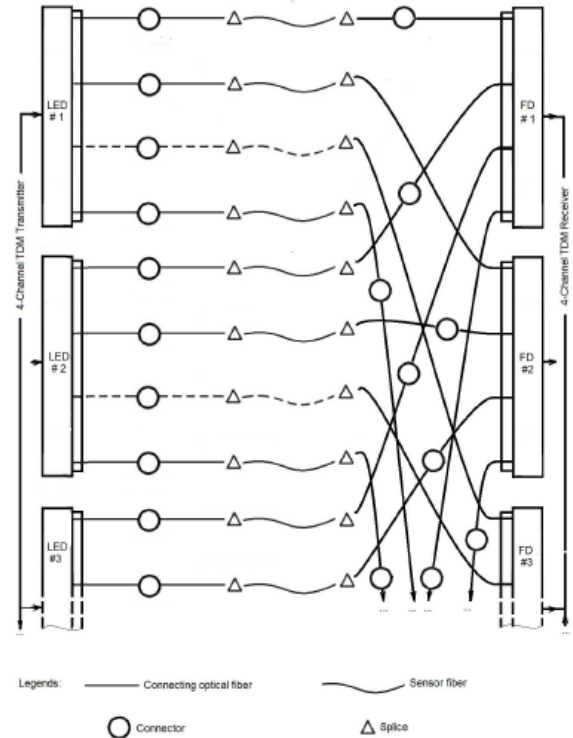


Fig.2. Optical matrix network of the optical-fibre array with combined space- and time-division multiplexing.

III. EXPERIMENT

We fabricated a concrete beam of the dimensions 100 x 150 x 450 mm with several layers of embedded multimode sensor optical fibres of a core, cladding, buffer and jacket diameter of 200 μm , 240 μm , 360 μm and 400 μm , respectively, and $\text{NA}=0.22$ (ThorLabs FG-200-LCR), as shown in Fig. 3. We did not remove and did not treat the fibre outer jacket in any special way. Also, we did not use any provisional or permanent protection of the optical fibres when

Some optical fibres were damaged and lost during the fabrication of concrete beams; however, roughly 65% of the optical fibres survived this process [7]. They were used for detecting structural damage to the concrete beams that were subjected to mechanical test.

The optical transmitters employed red LEDs (Nichia NSPR310S) of a diameter of 3.0 mm, luminous intensity of 4.7 cd, and directivity $2\theta_{0.5}=30^\circ$. The LEDs were activated in turn for 800 μs each while the optical receivers were activated in turn for 12.8 ms each. The optical radiation was modulated by a sine wave of a frequency of 31.25 kHz in the optical transmitters. Under these parameters, each optical fibre was interrogated in turn for 800 μs .

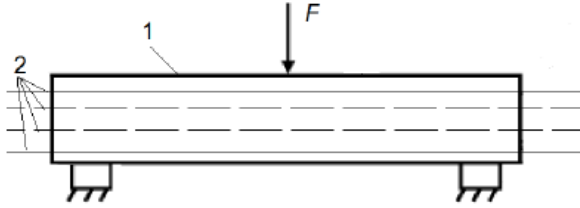


Fig.3. Concrete beam (1) of standard dimensions with embedded optical fibres (2) subjected to transverse load F .

IV. RESULTS

Typical signals obtained from the sensor fibres of the array are shown in Fig. 4. The plots in Fig 4a show the output signals of six optical fibres of the array vs. time before applying the transverse mechanical load to the concrete beam, while plots in Fig. 4b show the output signals of the same six optical fibres shortly before the total mechanical failure of the beam.

These signals were converted to digital format, stored in a computer memory and then processed in order to obtain the evolution of the output optical signals of the array against the applied load. Two examples of respective graphs are shown in Fig. 5.

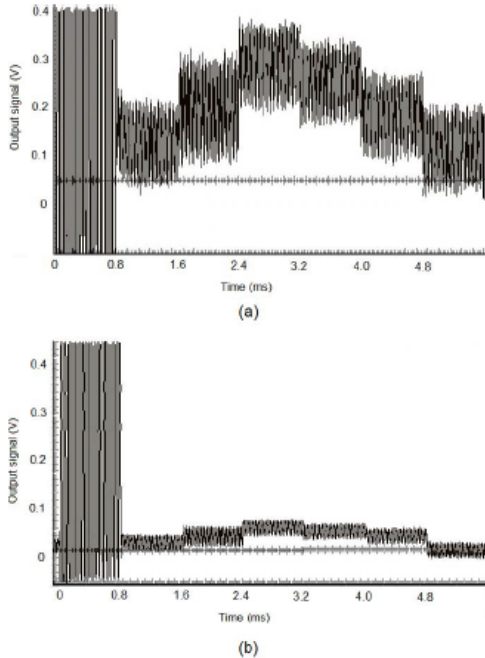
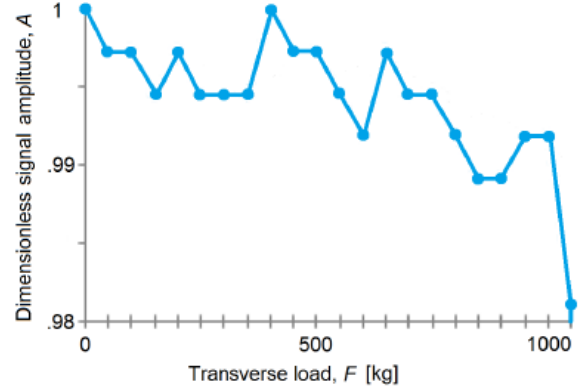
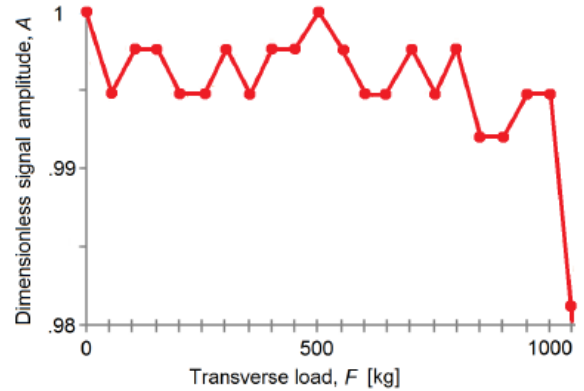


Fig. 4. Output signal of six sensor fibres of the array embedded in a concrete beam under zero transverse mechanical load (a) and after the appearance of hair cracks and shortly before the catastrophic failure (b). The reference signal is on the left.



(a)



(b)

Fig. 5. Dimensionless amplitude of the output optical signal of two optical fibres of the array vs. the applied transverse mechanical load: (a) the output signal of the optical fibre embedded at the top of the concrete beam and (b) the output signal of the optical fibre embedded at the bottom of the concrete beam.

The graphs show a relatively small variation of the optical signal amplitude A vs. load F in the range of $F=0 \dots 1000$ kg (a range of elastic deformation of the concrete beam). We attribute this effect to modulation of micro curvatures of embedded optical fibres and respective changes in optical attenuation, caused by the concrete beam deformation.

The dimensionless amplitude of the optical signal, A decreases sharply at a load $F > 1000$ kg. Under this load, the first crack occurs in the beam. The widening of the crack is followed by the rupture of the optical fibres and, consequently, a sharp decrease in the optical signal. Shortly after, the total failure of the concrete beam follows.

V. DISCUSSION

The experiment confirms the possibility of using the embedded arrays of conventional multimode optical fibres for damage detection in concrete beams.

In the real-world application, the output signal of the array can be interpreted in a binary manner, say with a threshold of $0.3 A$, and thus determine the state of the sensor fibre: intact or broken.

Future work should address the effect of optical fibre geometrical parameters and material constants on the efficacy of crack detection, as well as the minimum optical power levels and threshold for evaluating damage in the structure.

VI. CONCLUSIONS

The specialized optical fibre sensor array, as described in this work, allows for the detection of structural damage – the cracks and ruptures in concrete elements such as beams, columns and so on.

This array is different to the existing types of structural health monitoring arrays in the following ways:

1. The array employs common multimode optical fibres with no special sensing elements or microstructures, such as FBG, LPFG and so on.
2. The array employs non-coherent light sources (LEDs).
3. The array employs a matrix-type combined space- and time-division multiplexing optical network of large dimensions (16x16) that interrogates up to 256 optical sensors (sensor optical fibres).
4. The output signal is interpreted in a discrete manner in order to determine the physical condition of the sensor fibres (intact or broken). This, in turn, allows

one to know about the existence or no of structural damage.

5. Due to the aforementioned properties, the array is low-cost, simple, reliable and efficacious in detecting the structural damage.

The novel design concepts implemented in this array can find applications in a variety of optical-fibre sensor arrays used in industry and in scientific research.

REFERENCES

- [1] P. Rossi and F. LaMaou, "New method for detecting cracks in concrete using fibre optics," *Mater. Struct.*, vol. 22, 1989, pp. 437-442.
- [2] K. T. Wan and C. K. Y. Leung, "Applications of a distributed fibre optic crack sensor for concrete structures," *Sensor Actuat. A-Phys.*, vol. 135, 2007, pp. 458-464.
- [3] K. T. Wan and C. K. Y. Leung, "Fiber optic sensor for the monitoring of mixed mode cracks in structures," *Sensor Actuat. A-Phys.*, vol. 135, 2007, pp. 370-380.
- [4] P. Childs, A. C. L. Wong, W. Terry, and G. D. Peng, "Measurement of crack formation in concrete using embedded optical fibre sensors and differential strain analysis," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 19, 2008, 065301.
- [5] A. Deif, B. Martín-Pérez, B. Cousin, C. Zhang, X. Bao, and W. Li, "Detection of cracks in a reinforced concrete beam using distributed Brillouin fibre sensors," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, 2010, 055014.
- [6] K. Kesavan, K. Ravisankara, S. Parivallala, P. Sreeshylama, and S. Sridhara, "Experimental studies on fibre optic sensors embedded in concrete," *Meas.*, vol. 43, 2010, pp. 157-163.
- [7] S. Khotiaintsev, A. Beltrán-Hernández, J. González-Tinoco, H. Guzmán-Olguín, and G. Aguilar-Ramos, "Structural health monitoring of concrete elements with embedded arrays of optical fibres," *Proc. SPIE*, vol. 8695: Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2013, May 2013. San Diego, CA, USA.
- [8] J. E. Gonzalez-Tinoco, E. R. Gomez-Rosas, H. J. Guzman-Olguin, S. Khotiaintsev, and M. A. Zuñiga Bravo, "Monitoring of displacement of reinforced concrete beams under flexural loading with embedded arrays of optical fibres", *Proc. SPIE*, vol. 9437: Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace and Civil Infrastructure 2015, May 2015. San Diego, CA, USA,