



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

SISTEMA OPTOELECTRÓNICO DE INTERROGACIÓN DE ARREGLOS DE
SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

JUAN EMMANUEL GONZÁLEZ TINOCO

TUTOR PRINCIPAL

SERGIY KHOTYAINTEV, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. JUNIO, 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rangel Lícea Víctor
Secretario: Dr. Martínez López José Ismael
Vocal: Dr. Khotyaintsev Sergiy
1er Suplente: Dr. Bruce Davidson Neil Charles
2do Suplente: Dr. Rodríguez Cuevas Jorge

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CIUDAD UNIVERSITARIA, CU.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Khotyaintsev Sergiy

FIRMA

AGRADECIMIENTOS:

A mis padres Juan González Hernández y Susana Tinoco Valencia por el apoyo incondicional a lo largo de todos estos años.

A mi tutor Dr. Sergiy Khotyaintsev por su apoyo, consejos y paciencia para la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM por la formación adquirida

A la Coordinación de Estudios de Posgrado (CEP) de la UNAM y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico en forma de becas para la realización de mis estudios de maestría.

A la DGAPA-PAPIIT de la UNAM por el apoyo a éste trabajo en forma del proyecto “Nuevas técnicas de monitoreo del estado físico e integridad de elementos y estructuras de diversos materiales mediante arreglos de fibras ópticas” con número de referencia IN117512.

A la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo a éste trabajo en forma del proyecto “Implementación de fibra óptica para la detección de daño en elementos de concreto.”

A la DGAPA-PAPIME de la UNAM por el apoyo a éste trabajo en forma del proyecto “Diseño de prácticas virtuales y presenciales para el mejoramiento de la enseñanza en algunas asignaturas en Ingeniería en Telecomunicaciones” con numero de referencia PE104811.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	VII
OBJETIVOS.....	IX
METAS.....	IX
METODOLOGÍA.....	X
RESUMEN DE LA TESIS	XI
CAPÍTULO 1. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA PARA MONITOREO DE SALUD DE ESTRUCTURAS.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.....	3
1.3. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA EN EL MONITOREO DE SALUD DE ESTRUCTURAS.....	7
1.3.1. Sensores Basados en Intensidad de Luz.....	7
1.3.2. Sensores Espectrales Basados en Rejillas de Bragg.....	10
1.3.3. Sensores Interferométricos de Fabry-Perot, Mach-Zehnder y Michelson....	13
1.4. ARREGLOS (REDES) DE FIBRAS ÓPTICAS EN EL MONITOREO DE SALUD DE ESTRUCTURAS.....	17
1.5. CONCLUSIONES.....	19
1.6. REFERENCIAS.....	20
CAPÍTULO 2. PROPUESTA CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE INTERROGACIÓN DE ARREGLOS DE SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS.....	24
2.1. INTRODUCCIÓN.....	25
2.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN.....	26
2.3. ANÁLISIS DE OPCIONES DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA Y JUSTIFICACIÓN DE SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.....	27
2.3.1. Generador de Funciones.....	27
2.3.2. Etapa de Multicanalización (Demultiplexor).....	28
2.3.3. Etapa Amplificadora del Transmisor Óptico.....	29
2.3.4. Etapa de Multicanalización (Multiplexor).....	29
2.3.5. Etapa Amplificadora del Receptor Óptico.....	30
2.3.6. Fuentes de Alimentación Eléctrica.....	30
2.3.7. Acoplador LED-Fibra Óptica y Fotodetector-Fibra Óptica.....	30

2.4. ELABORACIÓN DEL ESQUEMA ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE INTERROGACIÓN DE ARREGLOS DE SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS.....	31
2.5. ELABORACIÓN DEL ESQUEMA FUNCIONAL DEL SISTEMA DE INTERROGACIÓN DE ARREGLOS DE SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS.....	35
2.6. SELECCIÓN DE ELEMENTOS CLAVE DEL SISTEMA DE INTERROGACIÓN DE ARREGLOS DE SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS.....	37
2.6.1. Tipos de Fibra Óptica.....	37
2.6.2. Tipos de Fuentes de Luz.....	37
2.6.3. Tipos de Fotodetectores.....	38
2.6.4. Elementos clave del Subsistema de Adquisición, Almacenamiento y Procesamiento de Datos.....	39
2.7. CONCLUSIONES.....	40
2.8. REFERENCIAS.....	41
CAPÍTULO 3. TRANSMISOR ÓPTICO.....	42
3.1. INTRODUCCIÓN.....	43
3.2. ELABORACIÓN DE EXIGENCIAS TÉCNICAS PARA EL EQUIPO TRANSMISOR ÓPTICO.....	43
3.2.1. Generador de Funciones.....	43
3.2.2. Etapa de Multicanalización (Demultiplexor).....	43
3.2.3. Etapa Amplificadora.....	44
3.2.4. Fuentes de Alimentación Eléctrica.....	44
3.2.5. Fuente de Luz, LEDs.....	44
3.2.6. Acoplador LED-Fibra Óptica.....	45
3.2.7. Diseño Físico Estructural del Bloque Transmisor Óptico.....	45
3.3. RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES DE SUBSISTEMAS DEL EQUIPO TRANSMISOR ÓPTICO.....	46
3.3.1. Generador de Funciones.....	46
3.3.2. Etapa de Multicanalización (Demultiplexor).....	51
3.3.3. Etapa Amplificadora.....	68
3.3.4. Fuentes de Alimentación Eléctrica.....	72
3.3.5. Fuentes de Luz (LEDs).....	72
3.3.6. Diseño Físico Estructural del Bloque Transmisor Óptico.....	76
3.4. CONCLUSIONES.....	78
3.5. REFERENCIAS.....	79

CAPÍTULO 4. RECEPTOR ÓPTICO.....	80
4.1. INTRODUCCIÓN.....	81
4.2. ELABORACIÓN DE EXIGENCIAS TÉCNICAS PARA EL EQUIPO RECEPTOR ÓPTICO.....	81
4.2.1. Fotodetector.....	82
4.2.2. Etapa Amplificadora.....	82
4.2.3. Etapa de Multicanalización (Multiplexor).....	82
4.2.4. Fuentes de Alimentación Eléctrica.....	83
4.2.5. Acoplador Fotodetector-Fibra Óptica.....	83
4.2.6. Diseño Físico Estructural del Bloque Receptor Óptico.....	83
4.3. RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES DE SUBSISTEMAS DEL EQUIPO RECEPTOR ÓPTICO.....	84
4.3.1. Fotodetector: Fototransistor.....	84
4.3.2. Etapa de Multicanalización (Multiplexor).....	98
4.3.3. Etapa Amplificadora.....	98
4.3.4. Fuentes de Alimentación Eléctrica.....	100
4.3.5. Diseño Físico Estructural del Bloque Receptor Óptico.....	100
4.4. CONCLUSIONES.....	103
4.5. REFERENCIAS.....	103
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN.....	104
5.1. CONSIDERACIONES SOBRE LA VARIANTE ÓPTIMA DE TRANSMISOR ÓPTICO EN CONDICIONES ESPECÍFICAS DE LA PRESENTE APLICACIÓN.....	105
5.2. CONSIDERACIONES SOBRE LA VARIANTE ÓPTIMA DE RECEPTOR ÓPTICO EN CONDICIONES ESPECÍFICAS DE LA PRESENTE APLICACIÓN.....	107
5.3. OPCIONES EXISTENTES PARA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y REGISTRO DE DATOS.....	109
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES.....	111
APÉNDICES: PUBLICACIONES DERIVADAS DEL PRESENTE TRABAJO.....	113

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se desarrolla un Sistema Optoelectrónico de Interrogación de redes (arreglos) de fibras ópticas utilizadas como sensores de la integridad de elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros.

El problema de monitoreo de la integridad de distintos elementos mecánicos estructurales atrae la atención de varios investigadores alrededor del mundo por la creciente complejidad y escala de estructuras, y la necesidad de disminuir los riesgos asociados con sus posibles fallas por degradación, sobrecarga o eventos catastróficos.

Los ejemplos de las estructuras que requieren de un tipo de monitoreo de su “salud” (*Structural Health Monitoring, SHM*) incluyen los cuerpos de grandes aviones, barcos, vagones de trenes, puentes, y edificios públicos de diferentes tipos. Para México, el monitoreo de estado físico de edificios públicos y privados tiene una gran importancia, debido a que el país se encuentra en una zona altamente sísmica.

En trabajos existentes sobre el SHM se emplean sensores de tensión y deformación de distintos tipos: a) sensores espectrales basados en Rejillas de Bragg, b) sensores interferométricos de Fabry-Perot, Michelson y Mach-Zehnder y varios sensores de tipo intensidad (amplitud). [1]-[4].

En la actualidad, los sensores espectrales basados en Rejillas de Bragg son los más empleados para tales aplicaciones descritas con anterioridad. Estos sensores se han puesto en práctica en estructuras como son puentes, edificios, estructuras metálicas, dando mejores resultados que los sensores tradicionales eléctricos. La ventaja principal de los sensores de fibra óptica basados en Rejilla de Bragg es que proporcionan valores absolutos de deformación que, además, no varían con el paso del tiempo. Lo que puede variar con el tiempo son las propiedades del material en el que se encuentra embebida la fibra óptica. Sin embargo, el uso de éstos sensores es complejo y caro, debido a la necesidad en interrogadores (analizadores) de espectro óptico de alto rendimiento [5]-[6].

En el laboratorio de la DIT-DIE-FI de la Facultad de Ingeniería de la UNAM a cargo de Dr. Sergiy Khotyaintsev se han realizado trabajos de tesis de licenciatura, maestría y doctorado empleando diferentes sensores de fibra óptica para elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros.

Actualmente, hay un Proyecto de Investigación e Innovación en marcha que es respaldado por la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería de la UNAM. En este proyecto se pretende implementar una técnica alternativa óptica de monitoreo de forma práctica, fácil y sencilla en elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros.

A continuación se analiza el estado de arte de los sensores de fibra óptica, se desarrolla el concepto de un Sistema Optoelectrónico de Interrogación de redes (arreglos) de fibras ópticas utilizadas como sensores de la integridad de elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros, y se describen los resultados de la implementación y pruebas de éste Sistema.

OBJETIVOS:

1. Obtener nuevos conocimientos teóricos y prácticos sobre la forma de implementar la Interrogación de arreglos (redes) de fibras ópticas empleados para el monitoreo de salud estructural en elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros.
2. Determinar cada bloque indispensable que constituye un respectivo Sistema Optoelectrónico de Interrogación y que el desempeño de cada bloque sea adecuado.
3. Lograr que el Sistema Optoelectrónico de Interrogación de arreglos (redes) de fibras ópticas cumple con el requisito de la formación de señales ópticas de forma de onda analógica adecuada para la implementación de SHM, que la amplificación de señales sea altamente lineal y que todo el Sistema funciona de una manera eficiente y confiable en el ámbito industrial.

METAS:

1. Elaboración de las exigencias técnicas eléctricas de los bloques: a) transmisor óptico y b) receptor óptico que constituyen al Sistema Optoelectrónico de Interrogación de Arreglos de Sensores de Fibras Ópticas.
2. Elaboración y comparación de los diagramas eléctricos, así como sus principales componentes y la determinación de la variante óptima para la presente aplicación.
3. Implementación y elaboración del bloque Transmisor Óptico y bloque Receptor Óptico que constituyen al Sistema Optoelectrónico de Interrogación de Arreglos de Sensores de Fibras Ópticas.
4. Obtención e Interpretación de los datos experimentales sobre el Sistema Optoelectrónico de Interrogación para determinar si la presente variante del Sistema es la mejor posible para la presente aplicación.

METODOLOGIA:

La presente tesis de maestría hace un análisis sobre el estado del arte referente a los sensores de fibra óptica que son utilizados en el monitoreo de elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros.

Con base en las investigaciones descritas en artículos y revistas nacionales e internacionales, se comenzará con definir las características técnicas requeridas para el bloque transmisor óptico y bloque receptor óptico. Posteriormente se contemplan diferentes diagramas eléctricos para su implementación tomando como referencia trabajos de investigación reportados en artículos a nivel nacional e internacional –que serán descritos posteriormente- en el trabajo que se presenta.

Se parte de la definición de las exigencias técnicas requeridas para los bloques transmisor óptico y receptor óptico que forman parte del Sistema Optoelectrónico de Interrogación de Arreglos de Sensores de Fibras Ópticas. Posteriormente se contemplan diferentes diagramas eléctricos para la elaboración de cada uno de los subsistemas de cada uno de los bloques.

Además se contempla la evaluación del Sistema para corroborar el correcto funcionamiento del mismo; esto para prevenir eventos no previstos como son: eventos transitorios, deformación ó saturación de la forma de onda analógica, mal funcionamiento de los circuitos integrados, entre otros.

Finalmente, se contempla obtener un sistema de monitoreo de sensores de fibras ópticas, con una multicanalización en el dominio del tiempo (TDM), la cual le dará una capacidad de monitoreo de cientos de fibras ópticas.

RESUMEN DE LA TESIS

En esta tesis se propone y se desarrolla un Sistema Optoelectrónico de Interrogación de Arreglos de Sensores de Fibra Óptica. La finalidad de estos arreglos es el monitoreo de salud estructural en elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros. El Sistema implementa la multicanalización de canales de medición (las fibras ópticas) en el dominio del tiempo (TDM) y tiene una estructura modular con la posibilidad de aumento de la cantidad de módulos base y respectivos canales de medición. Los módulos base son: el módulo transmisor óptico, módulo receptor óptico, y módulo de control y sincronismo. Los módulos transmisor óptico y receptor óptico constan de 16 transmisores y 16 receptores c/u, respectivamente. Entre las principales características originales de este Sistema se encuentra la posibilidad de trabajar con tres distintos tipos de señales ópticas: Onda senoidal, Onda triangular y Onda cuadrada. Esto permite un diagnostico del funcionamiento correcto del Sistema: la detección de una posible saturación de los circuitos electrónicos y distorsión de las señales. Otra característica original consiste en el empleo de fuentes de luz, LEDs de diferentes colores: rojo, azul, verde y amarillo, esto con el propósito de facilitar una identificación visual de los canales: las fibras ópticas de los arreglos embebidos en elementos de concreto. También, el Sistema es capaz de trabajar con fibras ópticas de diferentes tipos y parámetros geométricos y ópticos, monomodo y multimodo. La adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos se realiza a nivel electrónico. Este Sistema ha sido implementado y probado en forma práctica con arreglos de fibras ópticas embebidas en elementos de concreto, en los ensayos mecánicos de dichos elementos. Entre las ventajas de este Sistema con respecto a los sistemas existentes, se encuentra su eficiencia, amplias posibilidades de monitoreo de salud estructural en elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros, practicidad, portabilidad, autonomía, y un costo relativamente bajo. Los resultados obtenidos en esta tesis: el concepto del Sistema, el equipo Transmisor Óptico y Receptor Óptico desarrollados, los datos sobre el funcionamiento del Sistema con diferentes tipos de fibras ópticas y diferentes formas de onda de la señal, así como los datos sobre el funcionamiento de este Sistema en los ensayos mecánicos de distintos elementos estructurales con fibras ópticas embebidas en dichos elementos, serán útiles para trabajos futuros sobre las técnicas de monitoreo de salud estructural de distintos objetos y edificaciones.

CAPÍTULO 1

**SENSORES DE FIBRA
ÓPTICA PARA
MONITOREO DE
SALUD DE
ESTRUCTURAS**

1.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el SHM (*Structural Health Monitoring*, por sus siglas del anglosajón monitoreo de salud de estructuras) han adquirido gran importancia. Siendo el monitoreo de elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros los temas de mayor interés práctico en el campo de la infraestructura civil [7]-[12].

Hoy en día, los sensores de fibra óptica son utilizados en distintas ramas de la ingeniería; como es en Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica, Ingeniería en Telecomunicaciones, Ingeniería Aeroespacial, entre otras. En la Ingeniería Civil los sensores de fibra óptica se emplean principalmente para la medición de deformaciones de estructuras como de puentes y edificios. Con estas medidas se tiene la seguridad de que la estructura mantiene sus características mecánicas normales [13].

Existen diversos trabajos de investigación sobre el SHM en el área de la Ingeniería Civil y en materiales compuestos de polímeros. En este capítulo se lleva a cabo una revisión del estado del arte de los sensores de fibra óptica con un enfoque sobre su aplicación en el SHM de los elementos de concreto.

La literatura reporta que se han implementado diversos sensores para las aplicaciones antes descritas, principalmente los sensores basados en Rejilla de Bragg, estos se han empleado en diversos experimentos y pruebas en laboratorios y en construcciones reales, principalmente en puentes. Otros sensores son: sensores extrínsecos Interferométricos Fabry-Perot (*Extrinsic Fabry-Perot Interferometric*, EFPI, por sus siglas del anglosajón), Interferómetro Mach-Zehnder e Interferómetro Michelson [14].

Además se mencionan algunas técnicas de cuidado, prevención de los elementos de concreto y procesos de detección de grietas usando diferentes tipos de fibras ópticas; mostrando también la manipulación de los sensores de fibra óptica dentro de los elementos de concreto. En dichos sistemas de detección de fibras ópticas se han usado fibras diferentes materiales como es: dióxido de silicio, de borosilicato, de plástico [15]-[17].

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Hoy en día las telecomunicaciones han sido revolucionadas por la tecnología de fibra óptica, esta revolución comenzó con aplicaciones de sistemas sencillos con características limitadas. Dicha revolución se convirtió en derrotas técnicas para otros sistemas, dado que la tecnología de fibra óptica provee rendimiento superior a un costo menor en comparación con los sistemas tradicionales eléctricos [18].

Simultáneamente aparecen en el mercado, componentes optoelectrónicos con mejor rendimiento y bajo costo. A este contexto se suma una nueva revolución que combina las nuevas tecnológicas de telecomunicaciones de fibra óptica con dispositivos optoelectrónicos para crear sensores de fibra óptica.

Estas áreas tienen la oportunidad de ser impresionantes e incluyen la posibilidad de reemplazar la mayoría de los sensores ambientales que existen en la actualidad, así como, la apertura de nuevos mercados donde los sensores de fibra óptica no tienen comparación alguna con los dispositivos y sistemas que existen actualmente.

Como ejemplo de estas cualidades las Figuras 1.1-1.3 proporcionan una clasificación de los sensores de fibra óptica y sus principales aplicaciones en la industria moderna.

En la Fig. 1.1 se muestran los sensores extrínsecos de fibra óptica, los cuales se distinguen por la utilización de una región fuera de la fibra óptica para el sensado de una o varias cantidades físicas. Los sensores híbridos de fibra óptica combinan distintos principios físicos para el sensado y utilizan la fibra óptica para la transmisión de resultados de medición en una forma óptica.

En la mayoría de los casos, los sensores extrínsecos se pueden aplicar de manera intercambiable; su característica principal se plantea para el caso del uso como fuente de luz que se utiliza como fuente para un sensor electrónico y lleva respectivos datos a través de un enlace de fibra óptica. En la Fig. 1.2 se muestra un diagrama con la clasificación de los sensores intrínsecos de fibra óptica y sus principales aplicaciones en la industria moderna.

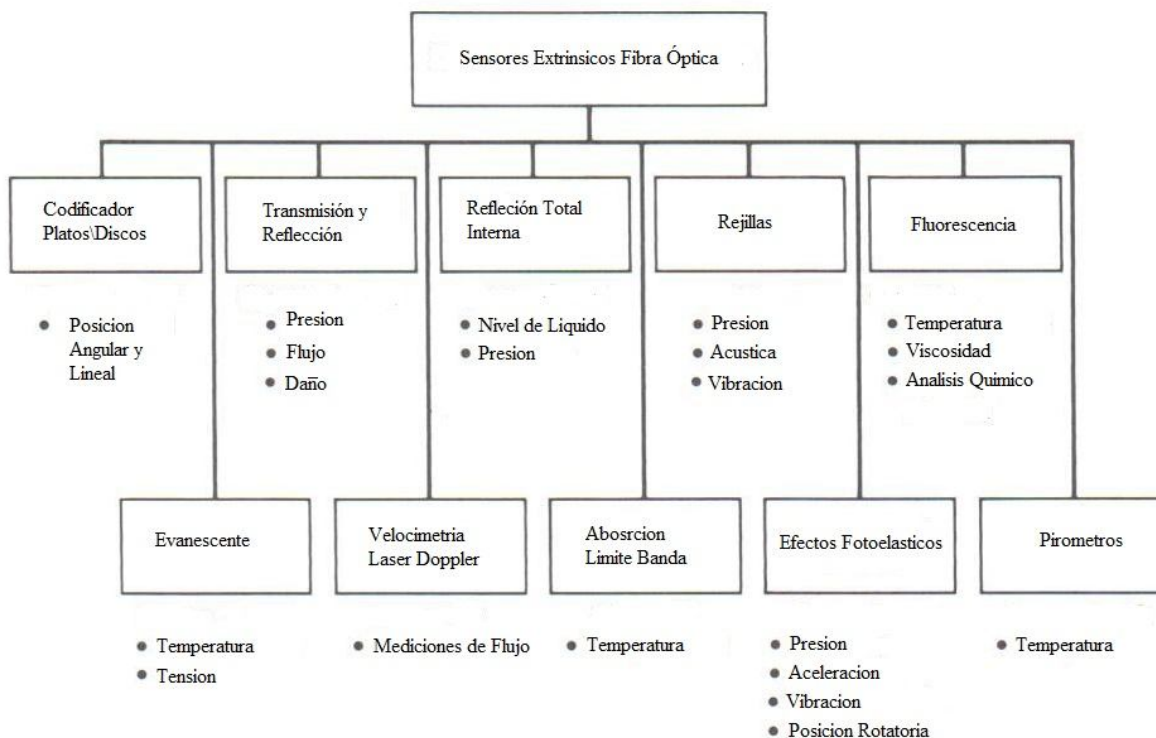


Fig. 1.1. Clasificación de los Sensores Extrínsecos de Fibra Óptica [18]

Una subclase de los sensores de fibra óptica son los sensores interferométricos. Estos sensores son los más utilizados en la aplicación de monitoreo de elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros dado sus características y las ventajas que presentan los mismos, más adelante se abordan con más detalle en este capítulo 1.

En la Fig. 1.3 se muestra un diagrama con la clasificación de los sensores interferométricos de fibra óptica y sus principales aplicaciones en la industria moderna. Muchos de los sensores interferométricos de fibra óptica han sido construidos en una forma extrínseca ó híbrida.

Los sensores de fibra óptica permiten una implementación totalmente dieléctrico-pasivo que suele ser crucial para una variedad de aplicaciones, incluyendo el aislamiento eléctrico de los pacientes en estudios y tratamientos de medicina, eliminación de caminos conductivos en ambientes de alta tensión y la compatibilidad con distintos materiales.

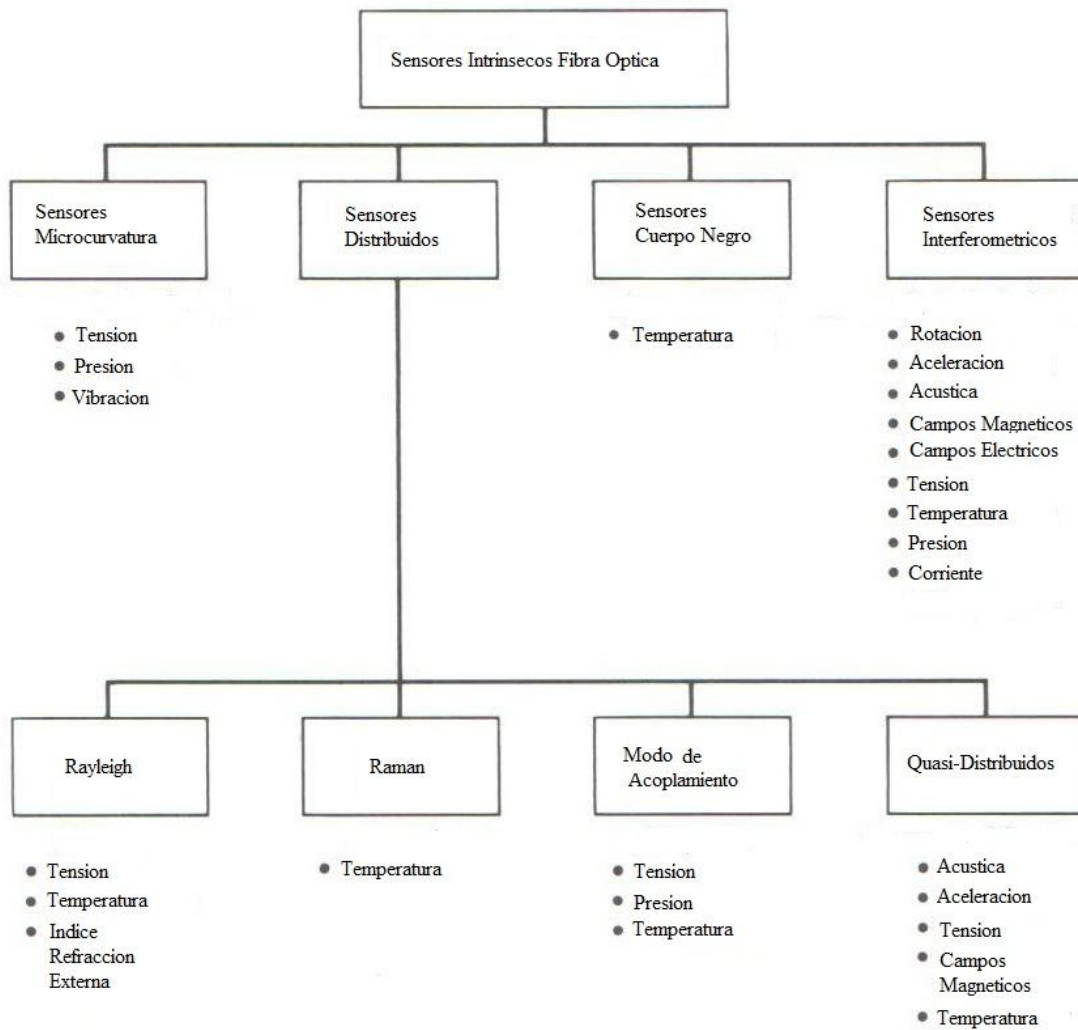


Fig. 1.2. Clasificación de los Sensores Intrínsecos de Fibra Óptica [18]

Las principales ventajas de los sensores de fibra óptica son [18]:

1. Inmunidad a interferencia electromagnética; eliminando así los costos de blindaje.
2. Desempeño a temperaturas altas.
3. Ancho de banda amplio.
4. Tamaño pequeño.
5. Sensibilidad Alta.
6. Multiplexación Eléctrica y Óptica.
7. Peso ligero.
8. Resistencia a las vibraciones y golpes.

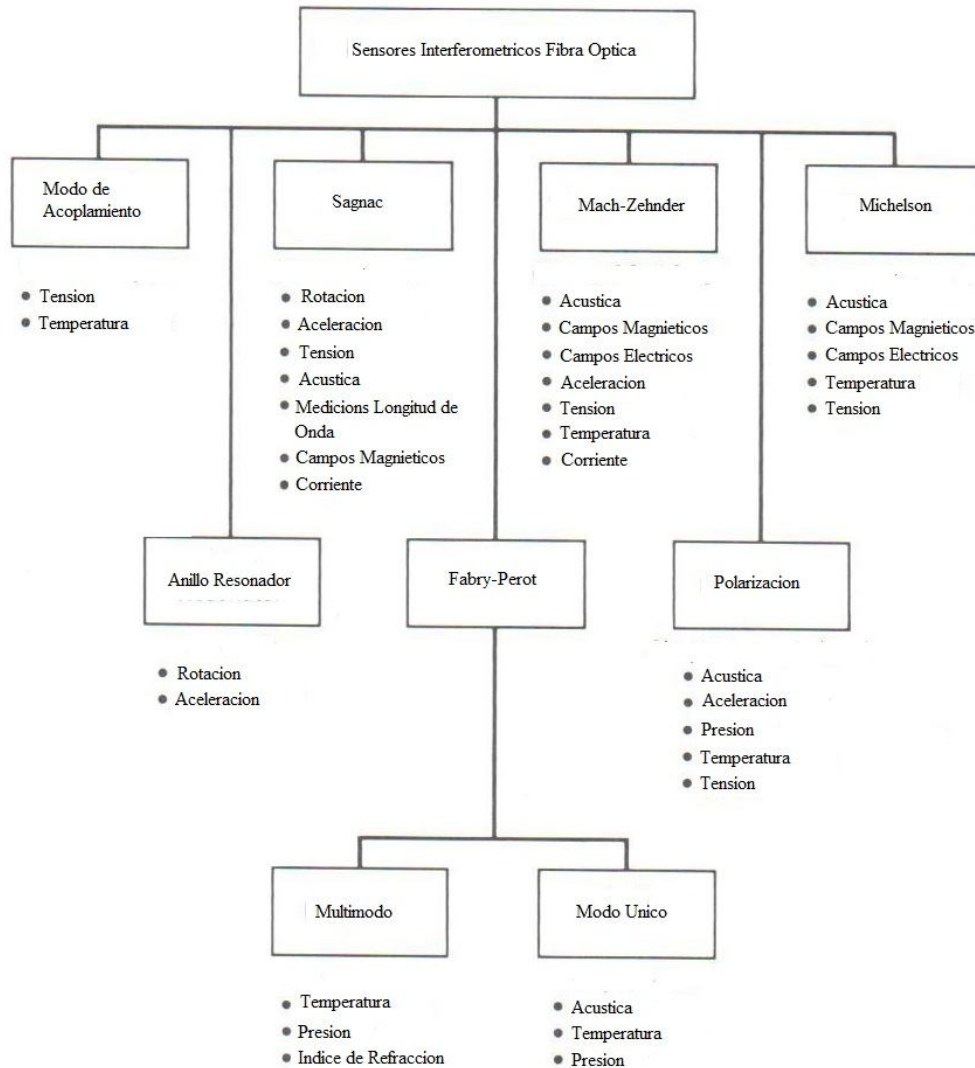


Fig. 1.3. Clasificación de los Sensores Interferométricos de Fibra Óptica [18]

El tamaño pequeño y peso ligero de las fibras ópticas son importantes en áreas como la aviación en donde las fibras ópticas proporcionan ventajas sustanciales en comparación con cables de cobre. Adicionalmente los sensores de fibra óptica ofrecen al usuario una mayor capacidad de transportar datos, dado su compatibilidad con técnicas de multiplexación de grandes conjuntos de fibra óptica. Es por estas características que los sensores de fibra óptica se han desarrollado rápidamente por fabricantes comerciales a través de pequeñas empresas para atender mercados especializados. Hoy en día, existen sensores de bajo costo que pueden ser adquiridos por usuarios comunes.

1.3. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA EN EL MONITOREO DE SALUD DE ESTRUCTURAS

La aplicación de los sensores de fibra óptica inició en el año 1977. En sus inicios los sensores de fibra óptica mostraron grandes ventajas en comparación con los sensores eléctricos. Fueron más de 60 diferentes tipos de sensores ópticos que se desarrollaron y se emplearon en diferentes aplicaciones como son: temperatura, tensión y presión.

A continuación se presentan las características de tres grupos específicos de sensores ópticos: a) los sensores basados en Intensidad de luz (amplitud), b) los sensores espectrales basados en Rejillas de Bragg, c) los sensores basados en los interferómetros intrínsecos Fabry-Perot, Mach-Zehnder y Michelson. Esto con un enfoque especial en el monitoreo de elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros [18].

1.3.1. Sensores basados en intensidad de luz

Los sensores basados en intensidad de luz fueron los primeros sensores de fibra óptica desarrollados, incluso antes de introducir fibras de baja pérdida al inicio de los años 1970s. En ellos se utilizan fibras individuales ó un haz para medir la luz transmitida o reflejada por un objeto. Los sensores basados en intensidad de luz son inherentemente simples y requieren una cantidad mínima de dispositivos electrónicos. Una limitación que es común en la mayoría de los sensores de intensidad de luz, es la falta de una adecuada señal de referencia.

Es por ello que su aplicación tiene ventajas limitadas a pesar de emplear fibra óptica. El mayor desafío es la imposibilidad de distinguir entre la variación de intensidad debida a la perturbación externa de interés y la fluctuación causada por el ruido (fluctuaciones de la intensidad de la fuente, fluctuaciones de la alimentación eléctrica.). En la Fig. 1.4 se muestra el esquema de un sensor basado en intensidad de luz realizado con fibras ópticas, donde se mide la variación de la potencia transmitida de una fibra óptica a otra, esta potencia varía en función de la separación entre facetas de las dos fibras ópticas [18].

El sensor está compuesto de dos fibras ópticas de plástico de índice escalonado separadas por una distancia d_0 y fijadas a los bordes de la grieta. En la Fig. 1.4a se muestra la relación entre el desplazamiento y la intensidad de la señal recibida, la cual tiene un comportamiento no lineal que puede aproximarse a $\frac{1}{d^2}$ para distancias de un par de milímetros, Fig. 1.4b [19].

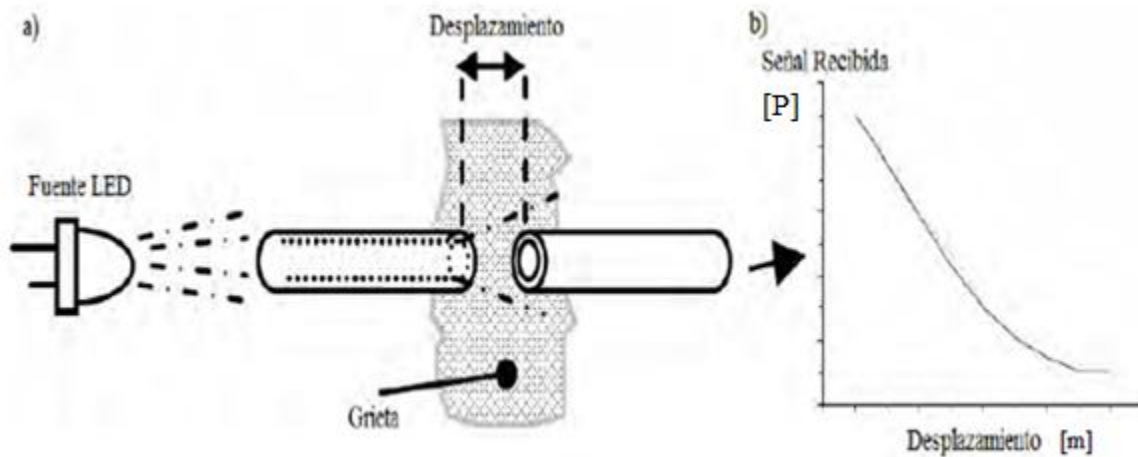


Fig. 1.4. a) Principio de operación del sensor basado en intensidad de luz y b) relación entre la intensidad de luz de la señal recibida y el desplazamiento de la grieta [19]

Las fibras ópticas son de diámetro grande y alta capacidad de recolectar la luz lo que se traduce en bajos costos del sensor, por la posibilidad de utilizar fuentes de luz económicos como los LEDs. Una de las técnicas de modulación de intensidad más populares implica doblar la fibra óptica para inducir pérdidas de radiación. Estos sensores de microcurvaturas se han usado para aplicaciones donde el parámetro sensado (tensión, presión, fuerza, posición, aceleración) pueden ser acoplados mecánicamente a un dispositivo de desplazamiento que deforma la fibra óptica, un sensor de microcurvatura se muestra en la Fig. 1.5 con un deformador las fibras se cierran, aumentan las pérdidas de radiación y hay disminución de la luz transmitida [19].

Se ha comprobado que las fibras ópticas se rompen en ensayos de tracción. Esto normalmente ocurre en el momento cuando se rompe el material en el que son embebidas, pero no antes. Lo que indica que esta técnica es solamente aplicable a daños catastróficos o muy severos.

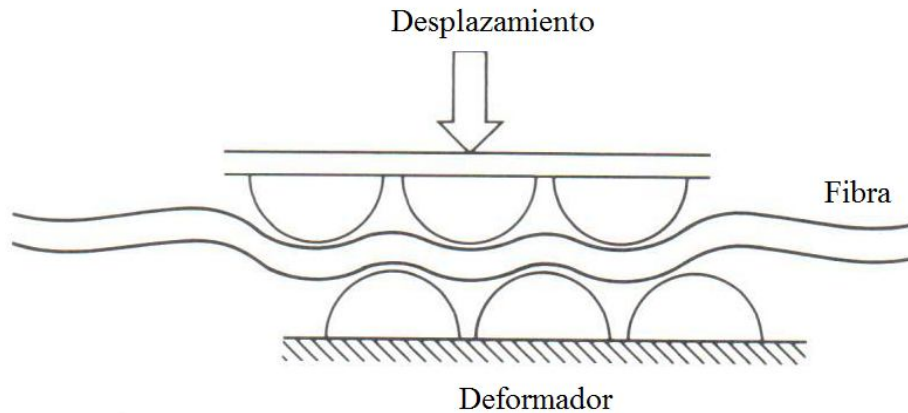


Fig. 1.5. Sensor de microcurvatura con un deformador que aumenta la pérdida de fibra óptica en flexión con un desplazamiento mayor [20]

Además de la técnica anterior, también se ha comprobado que la fibra óptica puede ser utilizada como un sensor para recabar medidas cualitativas de fisuras o deformaciones en materiales. Con esta técnica, se coloca una fibra óptica en las proximidades de un orificio, con lo cual la fibra óptica irá modificando su estructura siguiendo la deformación del material compuesto, esto producirá microflexiones que harán que disminuya la cantidad de luz transmitida. Conforme la deformación va aumentando, se incrementa el número de microflexiones en la fibra óptica y, por tanto, aparecen las microdelaminaciones que preceden al fallo de la unión. Al medir la atenuación de la señal en cada momento, es posible detectar la aparición de daños, si se conoce la relación entre la atenuación y la carga aplicada. En la Fig. 1.6 se muestra un sensor de nivel de líquido, por Snow la luz devuelta en el aire con la refracción total interna de un prisma es de 15 dB por encima del valor del agua [21]-[23].

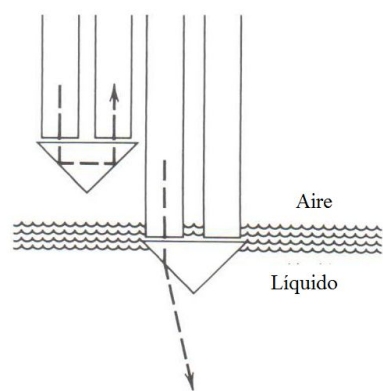


Fig. 1.6. Sensor de nivel de líquido usando refracción total interna en el aire [23]

1.3.2. Sensores espectrales basados en Rejillas de Bragg

Las Rejillas de Bragg en fibras ópticas (*Fiber Bragg Grating*, FBG, por sus siglas del anglosajón) fueron desarrolladas inicialmente en los años 80 para el área de las telecomunicaciones, fueron empleados como filtros espectrales. La Rejilla de Bragg en una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica. Debido a esta modulación, las rejillas son capaces de realizar funciones tales como reflexión, dispersión y filtrado del campo electromagnético de manera eficiente y con baja atenuación.

Este patrón en el núcleo de la fibra óptica se puede crear mediante el uso de un método holográfico o un método de máscara de fase. También es posible combinar ambas técnicas. Otra técnica es la de punto por punto, utilizando un láser de impulsos (donde cada pulso inscribe un período de rejilla) [24].

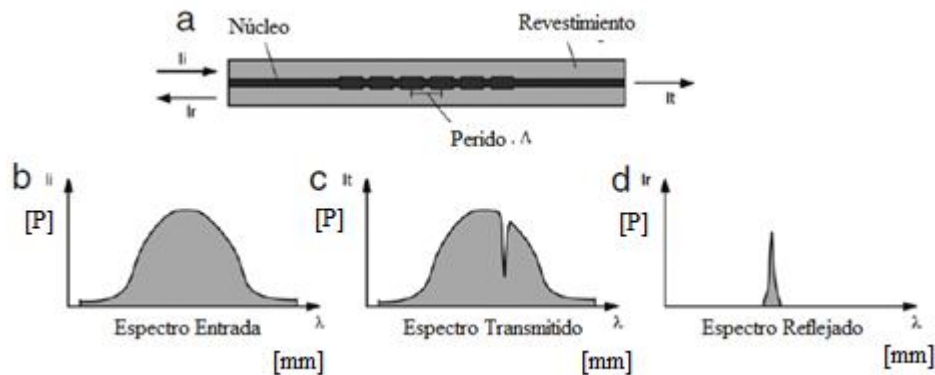


Fig. 1.7. Principio de funcionamiento de las FBG: a) Rejilla de Bragg, b) espectro de luz de entrada, c) espectro de luz transmitido, d) espectro de luz reflejado [24]

Una FBG actúa como un filtro de longitud de onda de reflexión selectiva que refleja solo la parte espectral que satisface la condición de Bragg con la longitud de onda del pico de reflectividad, λ_b , expresada como: $\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda$ donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica a la longitud de onda en el centro del espacio libre, y Λ es el período de división que se muestra en la Fig. 1.7 se muestra la parte restante del espectro de la luz de entrada cruza la FBG con ninguna alteración significativa.

Una FBG puede ser empleada en la medición de deformaciones y temperaturas. Para esto, se toma en cuenta el corrimiento del pico del espectro óptico reflejado en la FBG; el corrimiento del pico puede ser detectado a través de un analizador óptico de espectro y una fuente de luz de banda ancha que ilumine la fibra óptica con el sensor FBG [25].

Las FBG tienen un periodo de modulación de aproximadamente la mitad de la longitud de onda de la señal óptica incidente, esto provoca que exista intercambio de energía o acoplamiento entre modos ópticos del núcleo de la fibra que se propagan en direcciones opuestas. El esquema de fabricación de la FBG se muestra en la Fig. 1.8 [26].

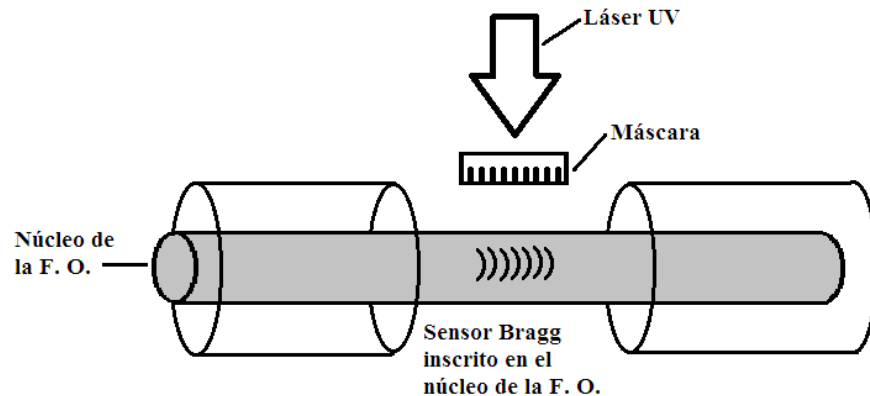


Fig. 1.8. Esquema de fabricación de una Rejilla de Bragg en el núcleo de fibra óptica [26]

Cuando la luz con un espectro de banda ancha, viaja en forma de un sólo modo (SM) de la fibra óptica, ésta interactúa con la FBG y sólo una pequeña parte del espectro de luz se refleja de vuelta. Debido a que la FBG tiene un periodo de modulación menor que la longitud de onda de la señal óptica, la condición de Bragg se satisface para el modo fundamental del núcleo de la fibra (modo incidente) y el mismo modo pero de propagación contraria, es decir, la luz que choca contra los planos de la FBG se refleja y forma un pico de reflexión con una longitud de onda de resonancia (Fig. 1.9). La FBG está siendo reconocida ampliamente para una amplia gama de aplicaciones de monitoreo estructural, y un componente clave en el desarrollo de conceptos inteligentes y sistemas estructurales, tanto para aplicaciones militares como aplicaciones comerciales del sector.

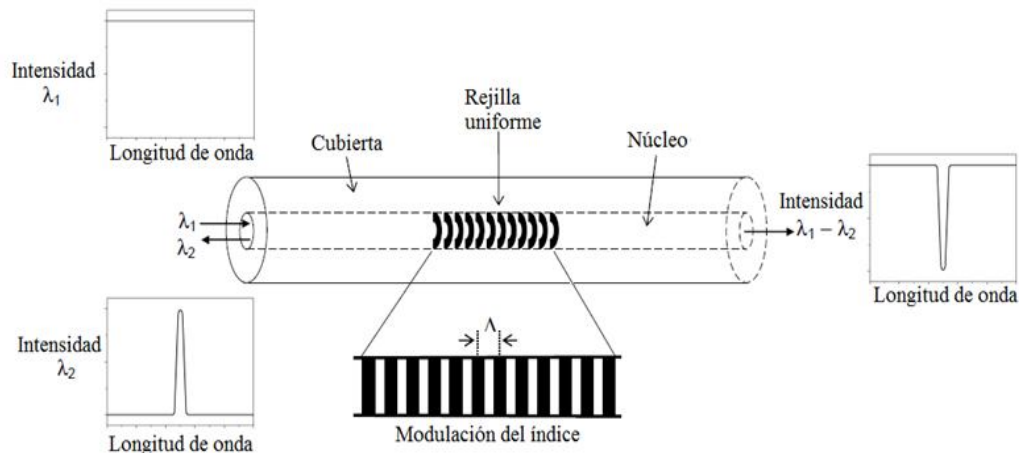


Fig.1.9. Esquema de transmisión y reflexión de la luz en la FBG [26]

Los sensores de fibra óptica de FBG ofrecen una serie de ventajas sobre los sensores alternativos. En general, las ventajas de esta técnica de monitoreo son: a) larga vida útil que tienen y que no necesitan calibración previa, b) poseen una excelente sensibilidad y alta resistencia, c) inmunidad a campos electromagnéticos y a descargas eléctricas.

Finalmente, una ventaja principal de los sensores de fibra óptica basados en FBG es que proporcionan valores absolutos de deformación que, además, no varían con el paso del tiempo. Lo que puede variar con el tiempo son las propiedades del material en el que se encuentra embebida la fibra óptica [27].

1.3.3. Sensores Interferométricos de Fabry-Perot, Mach-Zehnder y Michelson

Sensores interferométricos de Fabry-Perot

La historia de los sensores interferométricos Fabry-Perot empezó en los años 1900s con los desarrollos de un interferómetro de placas paralelas. Los sensores multimodo Fabry-Perot ofrecen una serie de ventajas generales sobre los sensores de un sólo modo, estas ventajas son: (1) la capacidad de acople de manera eficiente de la luz, de las fuentes de bajo costo, LED, (2) uso de conectores comúnmente disponibles y otros componentes de la fibra óptica y (3) la terminación fácil de la fibra óptica.

En el caso de los sensores multimodo Fabry-Perot, éstos muestran un número de ventajas adicionales a la utilización de fibra multimodo: (4) como bajo costo de los elementos del sensado y (5) una gran variedad de tipos de sensores ópticos. Los sensores multimodo interferométricos tienen menos sensibilidad que los de un solo modo, sin embargo, esto no es a menudo un problema para las mediciones industriales.

Principio de Operación

Los sensores interferómetros de Fabry-Perot están compuestos de dos reflectores en cada lado de un medio ópticamente transparente. La teoría de estos dispositivos es revisada por Born y Wolf [28] y Hernández [29]. Con una apropiada separación de los reflectores, la transmitancia de los interferómetros es alta, al cambiar la separación provoca que la transmitancia caiga.

Con reflectores de alta reflectividad, la transmitancia es muy sensible a los cambios en la longitud de onda o a la separación del reflector. El rendimiento general del interferómetro se caracteriza frecuentemente por sutileza como:

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2}$$

donde R es la reflexión de los reflectores. La transmisión como una función del esparcimiento del reflector se muestra en la Fig. 1.10 para varios valores de sutileza.

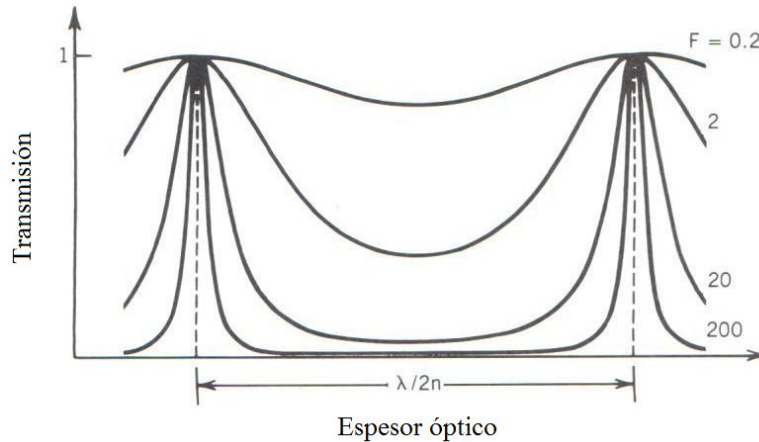


Fig. 1.10. Transmisión de interferómetros Fabry-Perot de varios valores de sutileza [29]

Sensores interferométricos de Mach-Zehnder

Como todos los interferómetros, el interferómetro de Mach Zehnder es un sensor de tipo fase. En algunos de estos sensores la luz tiene que salir de la fibra óptica para interactuar con el transductor óptico externo a la fibra óptica, lo que en muchos casos lleva la pérdida óptica sustancial.

En este tipo de sensores, la fase óptica de la luz que pasa a través de la fibra óptica es modulada por el campo para ser detectado. Esta modulación de fase se detecta entonces interferométricamente mediante la comparación de la fase de la luz en la fibra óptica de la señal con la fase de la luz de una fibra óptica de referencia.

Principio de operación

La interferencia de dos haces permite la medición de fases pequeñas extremadamente diferenciadas por un mesurado desplazamiento de la fibra óptica generada. El retardo de la fase óptica de la luz que pasa a través de una fibra óptica es dada por $\varphi = nkL$, donde n es el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, k es el número de onda óptica en el vacío ($2\pi/\lambda$) y L la longitud física de la fibra óptica. También hay que señalar que la fibra óptica puede soportar dos modos de polarización ortogonales, y que debido a efectos tales como flexión, la fibra óptica se vuelve birrefringente.

Una configuración típica del sensor interferométrico de Mach-Zehnder con fibra óptica se muestra en la Fig. 1.11. Los sensores interferométricos ópticos de Mach-Zehnder se muestran también en la Fig. 1.11.

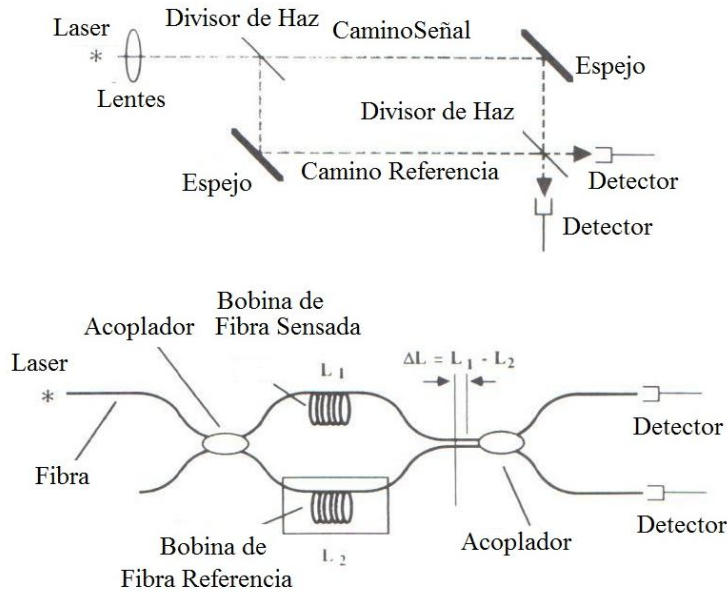


Fig. 1.11. Versiones del interferómetro Mach-Zehnder [29]

La luz es dividida en dos haces de igual intensidad por un divisor de haz de fibra óptica, una parte es enviada a través del brazo de la fibra óptica de detección y el resto a través del brazo de referencia.

Sensores interferométricos de Michelson

El sensor interferométrico de Michelson se muestra en la Fig. 1.12 es otra implementación de un interferómetro clásico con fibra óptica. En este caso existe un divisor de haz único que tanto divide como recombina la luz.

La luz viaja desde la fuente y se divide en dos brazos: uno de medición y otro de referencia. Después de viajar la longitud de los brazos, la luz se refleja y da vuelta atrás en los mismos brazos por los reflectores situados en los extremos.

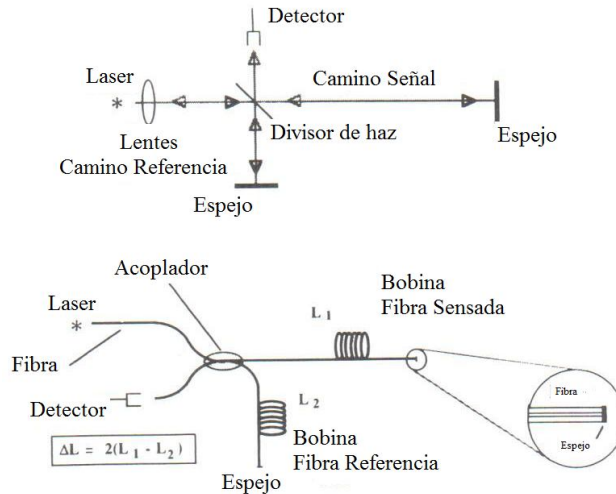


Fig. 1.12. Versiones del interferómetro Michelson [29]

Hay similitudes entre las configuraciones de los interferómetros de Michelson y Mach-Zehnder. Dependiendo del punto de vista, el interferómetro de Michelson es considerado como un plegado de Mach-Zehnder y viceversa.

Las salidas, tienen la misma forma como el de Mach-Zehnder. Las diferencias son las siguientes: a) la configuración Michelson requiere de un solo acoplador de fibra óptica. Debido al hecho de que el haz de luz pasa a través de la fibra de sensado y la fibra óptica de referencia dos veces, el cambio de fase por unidad de longitud de la fibra óptica se dobla [30].

Desde el punto de vista práctico, la configuración física del interferómetro Michelson es a veces algo más fácil de realizar, aunque esto depende de la aplicación. Otra ventaja importante es que el sensor puede ser interrogado por una sola fibra óptica entre el módulo de fuente/detector y el sensor.

Cabe señalar que un acoplador más se requiere para acceder a esta luz, lo que resulta en una pérdida de 12 dB en la señal. Otra desventaja consiste en que los espejos fabricados en el extremo de la fibra óptica no están disponibles en el mercado.

1.4. ARREGLOS (REDES) DE FIBRAS ÓPTICAS EN EL MONITOREO DE SALUD DE ESTRUCTURAS

Recientemente, un grupo de académicos y estudiantes del DIT-DIE-FI de la UNAM encabezado por el Dr. Sergiy Khotyaintsev han desarrollado un nuevo método de monitoreo de salud estructural; este método emplea arreglos (redes) de fibras ópticas embebidas en elementos estructurales que se pretenden monitorear. En trabajos posteriores del mismo grupo de la UNAM se hizo una evaluación más amplia de las características del método [31]-[33].

Las fibras ópticas de la red son de tipo o tipos utilizadas en redes de telecomunicaciones y sin Rejilla de Bragg o cualquier otra estructura o elemento especial de sensado. Estas fibras desempeñan un papel importante en los sensores, se rompen cuando aparece una grieta y se ensancha el elemento estructural.

La transmisión óptica de todas las fibras ópticas en la red es monitoreada. Una marcada disminución en la transmisión óptica de una o más fibras ópticas es un claro indicador del desarrollo de la formación de grietas en el elemento sometido a una carga excesiva. Esto permite no solo la detección de la aparición si no también la propagación de grietas en los elementos estructurales.

El diseño del sistema del sensor propuesto se muestra en la Fig. 1.13 la fuente de luz (1) esta acoplada a través de una lente convexa cilíndrica (2) que sirve como un divisor de haz para el arreglo de fibras ópticas multimodo (3) que están embebidas en el elemento de concreto (4). Las fibras ópticas (3) se extienden a lo largo del elemento de concreto (4) hasta el arreglo de receptores ópticos (5) que a su vez están conectados a un equipo de adquisición de datos y a la unidad de procesamiento (6) [34].

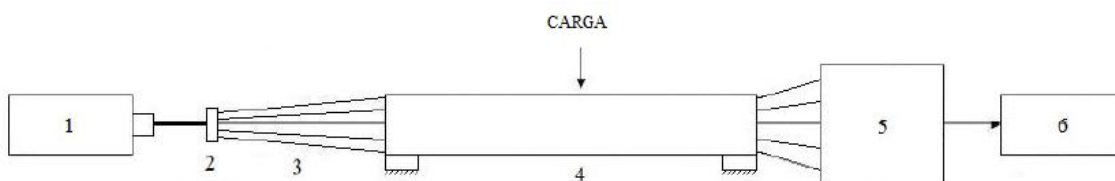


Fig. 1.13. Diseño del sistema del sensor propuesto: (1) Fuente óptica (diodo laser), (2) divisor de haz, (3) fibras ópticas, (4) elemento de concreto, (5) arreglo de receptores ópticos, (6) osciloscopio digital [34]

La fuente de luz (1) es un diodo láser (marca Coherent, modelo VLM2, de 4mW @ 670 nm). El divisor de haz (2) es una única lente biconvexa cilíndrica que expande el haz del láser en una sola dirección. El haz es acoplado a un conjunto de arreglos de fibras ópticas (3). Cada receptor óptico (5) consiste en un fotodiodo p-i-n (Quartz FD-263) y un amplificador de transimpedancia.

Las salidas de los receptores ópticos son multiplexadas en el dominio del tiempo y las respectivas señales eléctricas son almacenadas en un osciloscopio digital. Las amplitudes de las señales son monitoreadas constantemente y una marcada disminución en la transmisión óptica de una o varias fibras ópticas en los arreglos significa la rotura de una fibra y respectivamente, el rompimiento (grieta) del elemento de concreto.

La simplicidad de la operación y el costo relativamente bajo del sistema propuesto lo hace un candidato para aplicaciones en monitoreo de la salud estructural de elementos críticos en la infraestructura civil. El nuevo método todavía se encuentra en las primeras etapas de su desarrollo.

Un problema particular que se presenta en la actualidad es encontrar soluciones óptimas para el subsistema de interrogación de arreglos (redes) de fibras ópticas empleadas como sensores de integridad de elementos estructurales. Uno de los objetivos del presente trabajo es exponer una propuesta para resolver este problema [35].

1.5. CONCLUSIONES

1. Los sensores de fibra óptica empleados en el monitoreo de deformaciones y tensiones de estructuras están basados principalmente en Rejillas de Bragg, cavidad de Fabry-Perot; los cuales son costosos debido a que requieren de equipo de medición complejo y caro como analizadores de espectro óptico. La mayoría de los sistemas ópticos que se utilizan actualmente son útiles y precisos pero de alto costo; y con todas las ventajas que poseen han sustituido a los sistemas electrónicos o mecánicos convencionales.
2. Una alternativa consiste en el empleo de arreglos (redes) de fibras ópticas sencillas (sin rejillas de cualquier tipo) embebidas en elementos estructurales de interés y monitoreo de la ruptura de las fibras ópticas por medio de monitoreo de la transmisión óptica de las fibras del arreglo (red).
3. Las variaciones en la transmisión óptica de las fibras es un fenómeno que se puede utilizar para monitorear la apertura de grietas en elementos estructurales.
4. Considerando todo lo anterior, el sistema de interrogación objeto de este trabajo debe de monitorear de la transmisión óptica de múltiples fibras ópticas: 1. En forma binaria para la detección de ruptura de una o varias fibras del arreglo (red); 2. En forma analógica con precisión y detalle suficiente para relacionar la variación en transmisión óptica con la apertura de la grieta en un elemento estructural.

1.6. REFERENCIAS

- [1] Afzal, Muhammad Hassan Bin; Kabir, Shahid; Sidek, Othman Bin, "Fiber Optic Sensor-based Concrete Structural Health Monitoring," Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC), pp. 1-5, April 23-26, 2011.
- [2] Cusano, Andrea; Breglio, Giovanni; Giordano, Michele; Calabró, Antonio; Nicolais, Luigi and Cutolo, Antonello, "Fiber Optic Sensing System for Smart Materials and Structures," IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, Vol. 1, pp. 401-409, July 8-12, Italy, 2001.
- [3] Bai, Junjie; Zhao, Damei; Zhang, Xiuyan, "Structural health monitoring of smart civil structures based on fiber Bragg grating sensing technology," 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), pp.635-638, August 8-10, Zhengzhou, China, 2011.
- [4] Bravo, M.; Sáenz, J.; Bravo-Navas, M.; López-Amo, M., "Concrete Beam Bending Test Monitorization Using a High Strain Fiber Optic Sensor," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 8, pp. 1085-1089, April 15, 2012.
- [5] Carlos Rodrigues, Carlos Félix, Armindo Lage, Joaquim Figueiras, "Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges," Engineering Structures, Vol. 32, No. 8, pp. 1993-2002, August, 2010.
- [6] Giallorenzi, Thomas G.; Bucaro, Joseph A.; Dandridge, Anthony; Sigel, George H., Jr.; Cole, James H.; Rashleigh, Scott C.; Priest, Richard G., "Optical Fiber Sensor Technology," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 30, No.4, pp. 472-511, April, 1982.
- [7] Li Zhang; Guan-xiong, Qiu, "Application of high performance fiber in intelligent concrete," 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), pp. 183-186, August 8-10, Zhengzhou, China, 2011.
- [8] Measures, Raymond M.; Alavie, A. Tino; Maaskant, R.; Ohn, M.; Lee, R.; Karr, Shawn E.; Coroy, Trent; Huang, S. Y., "Bragg Grating Laser Sensing Systems for Smart Structures," IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, LEOS Conference Proceedings., pp. 137-138, Nov. 15-18, 1993.
- [9] Garcia-Souto, José A.; Rivera, Horatio Lamela, "Multichannel Fiber-Optic Interferometric Sensor for Measurements of Temperature and Vibrations in Composite Materials," IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6 No. 5, pp. 780-787, September/October, 2000.

- [10] Kenny, R. P.; Gutierrez, E.; Lucia, A. C.; Whelan, M. P.; Gaiazzi, F.; Sheridan, John T., "Fibre optic in-fibre Bragg Grating Sensors for use un Composite Material Structures Element Characterization and Structural Monitoring," IEE Colloquium on Optical Techniques for Smart Structures and Structural Monitoring (Digest No. 1997/033), pp. 11/1-11/6, Feb. 17, Savoy Place, London, 1997.
- [11] Spillman, William B Spillman, Jr. "Fiber Sensors for Civil Structures," IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, LEOS Conference Proceedings., pp. 294, Nov. 16-19, 1992.
- [12] Kersey, Alan D., "System Applications for Fiber Bragg Gratings," IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, LEOS, Vol. 1, pp. 234-235, Nov. 18-21, 1996.
- [13] Grattan, Kenneth Thomas Victor; Kerrouche, Abdelfateh; Sun, Tong; Grattan, Simon K T; Taylor, Susan E.; Basheer, P. A Mohammed, "Design and Evaluation of Optical Fibre Sensors in Civil Engineering Applications for Structural Health Monitoring," 14th OECC OptoElectronics and Communications Conference, pp 1-3, July 13-17, 2009.
- [14] Sun Man; Zhi Yong; Lei Yong; Liu Haowu, "Detection of Interface Damage of Composite Structure Using FBG Sensing," Symposium on Photonics and Optoelectronics SOPO, pp. 1-4, May 16-18, Chengdu, China, 2011.
- [15] Wade, Scott A.; Grattan, Kenneth Thomas Victor; McKinley, Brett; Boswell, Lawrance F.; D'Mello, Cedric, "Incorporation of fiber-optic sensors in concrete specimens: Testing and Evaluation," IEEE Sensors Journal, Vol. 4, No. 1, pp. 127-134, Feb., Melbourne, Australia, 2004.
- [16] McPolin, Daniel O.; Basheer, P. A Mohammed; Long, Adrian E.; Xie, Weiguo; Sun, Tong; Grattan, Kenneth Thomas Victor, "Development and Longer Term In Situ Evaluation of Fiber-Optic Sensors for Monitoring of Structural Concrete," IEEE Sensors Journal, Vol. 9, No. 11., pp. 1537-1545, Nov., Belfast, UK, 2009.
- [17] Cusano, Andrea; Breglio, Giovanni; Giordano, Michele; Nicolais, Luigi; Cutolo, Antonello, "Multifunction Fiber Optic Sensing System for Smart Applications," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 9, No. 1., pp. 40-49, March, 2004.
- [18] UDD Eric, "Fiber Optic Sensors An Introduction for Engineers and Scientists," John Wiley & Sons, Inc., 1991, pp. 9-35.
- [19] Perrone, Guido; Olivero, Massimo; Vallan, Alberto; Carullo, Alessio; Neri, Alessandra, "Long term in-situ test of a low-cost fiber-based crack monitoring system," IEEE Sensors, pp. 325-328, Oct. 26-29, Torino, 2008.

- [20] Udd E., "Fiber Optic Sensors. An Introduction for Engineers and Scientists," John Wiley & Sons, Inc., 1991, pp. 9-35.
- [21] Frövel, M., "Sensores de Fibra Óptica Tipo Redes de Bragg embebidos en material compuesto para medir deformaciones y temperaturas criogénicas," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos UPM, 2009.
- [22] Diaz Carrillo S., Menendez J., "Detección de daño en materiales compuestos mediante sensores de fibra óptica," Proceedings del congreso MATCOMP 97, ETSI Aeronáuticos, Madrid, España, 1997.
- [23] Udd E., "Fiber Optic Sensors. An Introduction for Engineers and Scientists," John Wiley & Sons, Inc., 1991, pp. 9-35.
- [24] Carlos Rodrigues, Carlos Félix, Armindo Lage, Joaquim Figueiras, "Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges," Engineering Structures, Vol. 32, No. 8, pp. 1993-2002, August, 2010.
- [25] Frövel, M., "Sensores de Fibra Óptica Tipo Redes de Bragg embebidos en material compuesto para medir deformaciones y temperaturas criogénicas," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos UPM, 2009.
- [26] Luyckx, Geert; Voet, Eli; Lammens, Nicolas; Degrieck, Joris, "Strain Measurements of Composite Laminates with Embedded Fibre Bragg Gratings: Criticism and Opportunities for Research," Sensors, Vol. 11, No. 1, Dec. 31, 2010.
- [27] Frövel, M., "Sensores de Fibra Óptica Tipo Redes de Bragg embebidos en material compuesto para medir deformaciones y temperaturas criogénicas," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos UPM, 2009.
- [28] M. Born, E. Wolf, "Principles of Optics," Pergamon Press, Oxford, 1964.
- [29] G. Hernandez, "Fabry-Perot Interferometers," Cambridge University Press, 1986.
- [30] M. Corke, A.D. Kersey, D.A. Jackson, "All Fibre Michelson Thermometer," Electron. Lett. 471, 1983.
- [31] S. Khotiaintsev, A. Beltrán-Hernández, J.U. Esparza-Villa, R. Hernández-Villeda, "Monitoring of integrity of concrete elements with arrays of optical fibers," Electronics and Communications, Vol. 3, No. 62, pp. 200-204, 2011.
- [32] Esparza, Villa J.U. "Monitorización de estructuras de concreto por fibras ópticas." Tesis de Licenciatura, FI UNAM, 2010.

[32] Hernández, Villeda R. "Arreglos de fibras ópticas para el monitoreo de estructuras de concreto" Tesis de Licenciatura, FI UNAM, 2010.

[34] S. Khotiaintsev, A. Beltrán-Hernández, J.U. Esparza-Villa, R. Hernández-Villeda, "Monitoring of integrity of concrete elements with arrays of optical fibers," Electronics and Nanotechnology, Proceedings of the XXXI International Scientific Conference, April 12-14, Kyiv, Ukraine, 2011.

[35] S. Khotiaintsev, A. Beltrán-Hernández, J. González-Tinoco, H. Guzmán-Olguín, G. Aguilar-Ramos, "Structural Health Monitoring of concrete elements with embedded arrays of optical fibers," SPIE Smart Structures/NDE Health Monitoring of Structural and Biological Systems VII, Optical Techniques for SHM, paper 8695-39, 2013.

CAPÍTULO 2

**PROPUESTA
CONCEPTUAL DEL
SISTEMA DE
INTERROGACIÓN DE
ARREGLOS DE
SENSORES DE FIBRAS
ÓPTICAS**

2.1. INTRODUCCIÓN

El principio de detección de daño estructural que se considera en este trabajo consiste en el análisis del cambio de la forma de onda analógica que se transmite por las fibras ópticas embebidas en los elementos estructurales bajo control. Al existir una disminución de la amplitud de la forma de onda analógica, está indica la aparición de una grieta dentro del elemento de concreto. La iniciación y propagación de grietas se puede monitorear con arreglos de fibras ópticas embebidas en elementos de concreto.

Estas fibras ópticas sirven como sensores de integridad de dicho elemento de concreto, son sensores de tipo intensidad de luz (amplitud), por lo que el presente Sistema tiene que medir la transmisión de una forma de onda analógica óptica, en las fibras ópticas del arreglo.

Considerando todo lo anterior, el Sistema debe ser capaz de monitorear la transmisión óptica de múltiples fibras ópticas, en dos formas: Forma A. Medición de la transmisión óptica con precisión y detalle suficiente para identificar e interpretar los procesos físicos en muestras de concreto, previos a su ruptura: tensiones, deformaciones, inicio de grietas, entre otras. Forma B. Detección de ruptura de las fibras ópticas, esto en forma binaria y sin mayores detalles.

Para la interrogación de conjuntos grandes de sensores (en el presente caso, son arreglos de fibras ópticas) existen dos opciones principales: 1. La interrogación paralela (simultanea) de todos los sensores ópticos; 2. La interrogación secuencial en el dominio de tiempo (multicanalización en el dominio de tiempo, TDM).

Las demás técnicas existentes de multicanalización (FDM, CDMA, etc.) son demasiado complejas para ser consideradas en la presente aplicación. La ventaja principal de TDM consiste en la cantidad mínima de equipo necesario para su implementación. Una desventaja de este método consiste en la dificultad de la obtención de datos detallados sobre procesos rápidos transitorios, tales como el proceso de ruptura de una fibra óptica embebida en un elemento de concreto, bajo una carga excesiva. Por esto, se considera la posibilidad de implementar ambas técnicas: tanto la interrogación paralela como secuencial (TDM), con el presente equipo.

Con cualquiera de las dos técnicas de interrogación, la interpretación de los resultados de medición de la transmisión de las fibras ópticas del arreglo $T=I_2/I_1$, I_1 , I_2 son intensidades de la luz de entrada y salida de la fibra óptica, respectivamente, se puede realizar de dos formas: 1. Forma binaria (la fibra óptica transmite (está intacta) o no transmite (esta rota, supuestamente por la aparición y desarrollo de una grieta); 2. Forma lineal analógica: la señal de salida de sistema de interrogación (voltaje o corriente eléctrica) es proporcional a la transmisión T (ó atenuación total α) de las fibras ópticas.

Las dos formas de interpretación son más fáciles de implementar con una forma de onda analógica de prueba rectangular o cuadrada. Sin embargo, la medición analógica de la transmisión óptica T implica la necesidad de contar con la respuesta altamente lineal del sistema de medición. Por esto, se requiere que el Sistema tenga la capacidad de un diagnóstico interno de la linealidad del mismo, para la cual se prevé el uso de señales de forma de onda senoidal y onda triangular.

En lo relacionado al número de canales, se considera que la cantidad mínima de las fibras ópticas en un arreglo es de cuatro y la máxima de doscientas. Por esto, el Sistema debe ser capaz de trabajar con arreglos de hasta doscientas fibras ópticas. Para cubrir el número tan grande de canales, se considera un diseño modular de equipo TDM con multicanalización en base de 2^n canales. Tomando en cuenta el rango de 2 a 200, el modulo óptimo base es de $2^4=16$ canales.

2.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El principio de operación consiste en el envío de diferentes formas de onda analógicas a través de fuentes de luz, los LEDs, onda senoidal, onda triangular y onda cuadrada, en el rango luz visible. Éstas formas de onda analógicas se propagarán a través de diferentes tipos de fibras ópticas, y serán percibidas por fotodetectores.

Las amplitudes de las formas de ondas analógicas percibidas por los fotodetectores serán almacenadas en una base de datos para su procesamiento e interpretación después de las pruebas experimentales. Esta base de datos puede ser un software programado en algún tipo de código de programación como es C, java, C++, entre otros y almacenado en una hoja de cálculo (Excel).

2.3. ANÁLISIS DE OPCIONES DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA Y JUSTIFICACIÓN DE SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

En esta sección se analiza las opciones existentes para la implementación de todos los subsistemas del equipo transmisor óptico y equipo receptor óptico y se selecciona las variantes óptimas para la presente aplicación.

2.3.1. Generador de Funciones

Para la realización del generador de funciones se analizaron tres opciones de circuitos integrados, los cuales son:

- a) Circuito Integrado marca Intersil modelo ICL8038;
- b) Circuito Integrado marca NTE modelo NTE864;
- c) Circuito Integrado marca Exar Corporation modelo XR2206CP.

Los tres modelos de circuitos integrados a), b) y c) presentan características similares, las diferencias entre ellos son:

- a) Fuente de Alimentación Eléctrica (V_{cc}): a) ± 15 V, b) ± 15 V, c) ± 12 V;
- b) La amplitud de la forma de onda de la señal depende del voltaje de alimentación multiplicado por el coeficiente de salida, con ello obtenemos una infinidad de amplitudes de las distintas formas de onda analógicas. Para cada uno de los casos se tiene:
 - a) Onda Senoidal: 0.22, Onda Triangular: 0.33, Onda Rectangular: $2V_{cc}$;
 - b) Onda Senoidal: 0.22, Onda Triangular: 0.33, Onda Rectangular: $2V_{cc}$;
 - c) Onda Senoidal: 0.20, Onda Triangular: 0.30, Onda Rectangular: V_{cc} ;
- c) El costo del circuito integrado. El costo de los circuitos integrados son:
 - a) \$ 207.00 M.N., b) \$ 910.00 M.N., c) \$ 550.00 M.N.

El circuito integrado marca Intersil modelo ICL8038 tiene algunas ventajas competitivas:

- a) Su costo de \$ 207.00 M.N. es el más bajo comparado con los otros modelos;
- b) Genera las tres formas de onda analógicas requeridas para la presente aplicación: Onda senoidal, Onda triangular y Onda Cuadrada;
- c) Trabaja en el rango necesario de frecuencias en el orden de decenas de kHz.

Se consideran las señales de forma de onda senoidal y onda triangular para el Sistema para un diagnóstico interno de la linealidad del Sistema. Se considera la señal de forma de onda cuadrada para medir la transmisión en modo binario y modo lineal.

Se considera un intervalo de frecuencia de salida del generador de funciones de 1kHz a 5 kHz de la forma de onda analógica. A frecuencias más bajas se puede llegar a confundir con la señal de la Red Eléctrica de 60Hz. A frecuencias más altas alrededor de 10kHz en adelante, los circuitos integrados dejan de tener un funcionamiento adecuado debido: a) la pérdida del sincronismo, b) se produce el efecto de inducción electromagnética, donde se genera un campo capacitivo y éste modifica la relación tensión-corriente.

Por todo lo expuesto anteriormente, el circuito integrado marca Intersil modelo ICL8038 cumple con las exigencias técnicas requeridas para la presente aplicación y tiene un precio de competencia.

2.3.2. Etapa de Multicanalización (Demultiplexor)

Para esta etapa se analizaron tres opciones de circuitos integrados, los cuales son:

- a) Demultiplexor de 3 entradas, 8 salidas digitales con lógica negada marca Hitachi Semiconductor modelo DM74LS138;
- b) Demultiplexor de 4 entradas, 16 salidas digitales con lógica negada marca Hitachi Semiconductor modelo DM74LS154;
- c) Demultiplexor de 4 entradas, 16 salidas analógicas marca Texas Instruments modelo CD4067BE.

Las características comunes entre los circuitos integrados son:

- a) Fuente de Alimentación Eléctrica (V_{cc}): 5V;
- b) Permiten a la entrada cualquier señal acotada con ciertos valores de voltaje para no dañar al circuito integrado como tal;
- c) Costo bajo.

Al realizar diferentes pruebas experimentales con los tres circuitos integrados, se encontró que el más óptimo para la presente aplicación es el circuito integrado marca Texas Instruments modelo CD4067BE. Permite tener la misma forma de onda analógica de entrada a la salida en cualquiera de sus n canales posibles.

2.3.3. Etapa Amplificadora del Transmisor Óptico

La principal característica de la etapa amplificadora es proporcionar las corrientes y voltajes que fluirán a través del transistor y de la fuente de luz, los LEDs; se tiene contemplado en un determinado momento que las fuentes de luz trabajen de un modo pulsátil. Pueden demandar una corriente mayor; se procedió a verificar en el mercado nacional, diferentes modelos de transistores que soporten una mayor potencia de disipación ($P=VI$). Para esta etapa amplificadora se analizaron tres propuestas de amplificadores, los cuales son:

- a) Transistor NPN marca Fairchild Semiconductor modelo BC547;
- b) Transistor NPN marca Philips Semiconductors modelo 2N222;
- c) Transistor NPN Darlington Epitaxial marca Fairchild Semiconductor modelo Tip102.

Analizando las hojas de especificaciones de los diferentes transistores, el transistor con mayor soporte potencia es el Transistor NPN Darlington Epitaxial marca Fairchild Semiconductor modelo Tip102; tiene un valor máximo de 2W de potencia de disipación comparada con los 500mW y 1.2W de los transistores BC547 y 2N2222 respectivamente.

2.3.4. Etapa de Multicanalización (Multiplexor)

Esta etapa tiene la misma función que la etapa de multicanalización del equipo transmisor óptico, el detalle está en que el circuito integrado marca Texas Instruments modelo CD4067BE es configurado del modo multiplexor en lugar de demultiplexor. Los datos se obtendrán en la terminal 1 del circuito integrado configurado del modo multiplexor, estos datos se capturarán a través del equipo de adquisición de datos sofisticado.

2.3.5. Etapa Amplificadora del Receptor Óptico

Se considera la utilización del mismo Transistor NPN Darlington Epitaxial marca Fairchild Semiconductor modelo Tip102; por parte del equipo transmisor óptico, la diferencia será el diagrama eléctrico. No debe de sobrepasar las especificaciones técnicas de entrada de la etapa de multicanalización (multiplexor) del equipo receptor óptico. Se consideran corrientes bajas entre 10 a 15 mA y voltajes de salida acotados a los 2Vpp máximo.

2.3.6. Fuentes de Alimentación Eléctrica

La fuente de alimentación eléctrica deberá de proporcionar el voltaje y la corriente necesaria para cada uno de los subsistemas de los bloques transmisor óptico y receptor óptico. En un principio se puede tener varias fuentes de alimentación eléctrica con diferentes salidas de voltaje. Se tomaron en cuenta salidas de voltaje nominales de: 5V, 12V, 19V, una fuente de alimentación eléctrica variable positiva y una fuente de alimentación eléctrica variable negativa de 1.2V a 22V. Se utilizaron reguladores de salida de voltaje nominal de 5V, 12V. Reguladores de voltaje positivo y negativo, LM317 y LM337 respectivamente. Todos los reguladores son de la marca Fairchild Semiconductor.

2.3.7. Acoplador LED-Fibra Óptica y Fotodetector-Fibra Óptica

Estos acopladores tienen la función principal de mantener unidos y alineados a dos elementos: la fuente de luz, el LED y un extremo de la fibra óptica por parte del equipo transmisor óptico; el otro extremo de la fibra óptica y el fotodetector por parte del equipo receptor óptico.

NOTA: Se hace la observación que a partir de este momento del contenido de la tesis se utilizará las palabras “circuito integrado” haciendo referencia al circuito integrado seleccionado para la presente aplicación.

2.4. ELABORACIÓN DEL ESQUEMA ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE INTERROGACIÓN DE ARREGLOS DE SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS

El diagrama de bloques general del Sistema desarrollado para el monitoreo de la transmisión óptica de grandes arreglos de fibras ópticas se muestra en la Fig. 2.1. El sistema tiene una estructura modular que permite aumentar el número de canales (fibras ópticas), con base a 16. El sistema consta de un modulo de control, n módulos del equipo transmisor óptico de 16 canales de salida cada uno y n módulos del equipo receptor óptico de 16 canales de entrada cada uno.

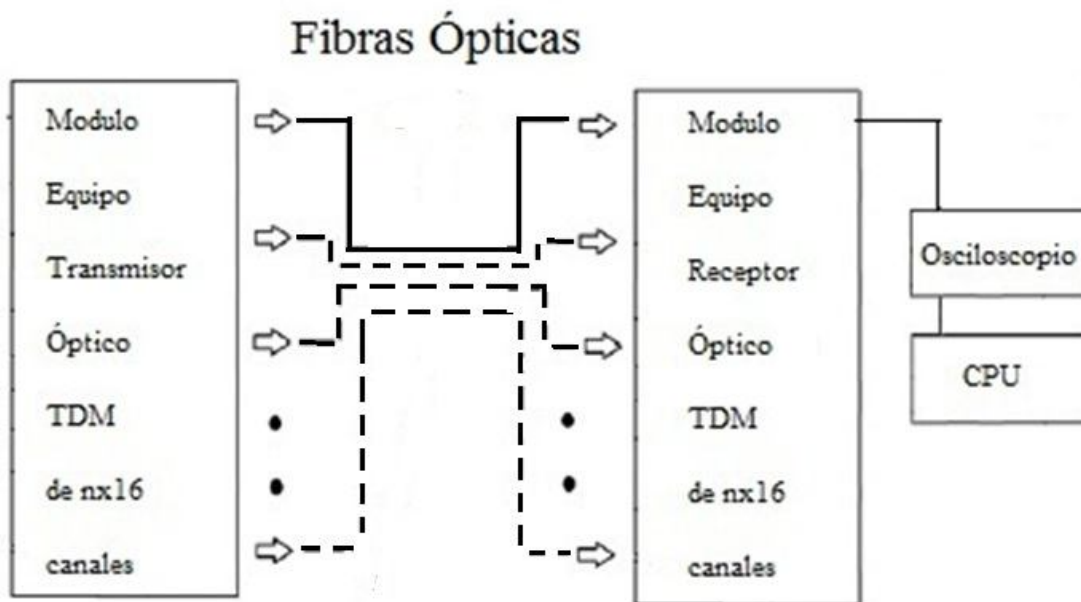


Fig. 2.1. Diagrama de bloques general del sistema Optoelectrónico de monitoreo de arreglos de fibras ópticas embebidas en elementos de concreto

El sistema realiza el monitoreo del arreglo de las fibras ópticas de forma cíclica a frecuencias del orden de decenas de kHz, esto en el modo TDM. El modo TDM permite minimizar la cantidad de equipos necesarios para el monitoreo de grandes arreglos de fibras ópticas.

El diagrama de bloques del equipo transmisor óptico que fue implementado y evaluado experimentalmente se muestra en la Fig. 2.2 y de forma más detallada en la Fig. 2.3.

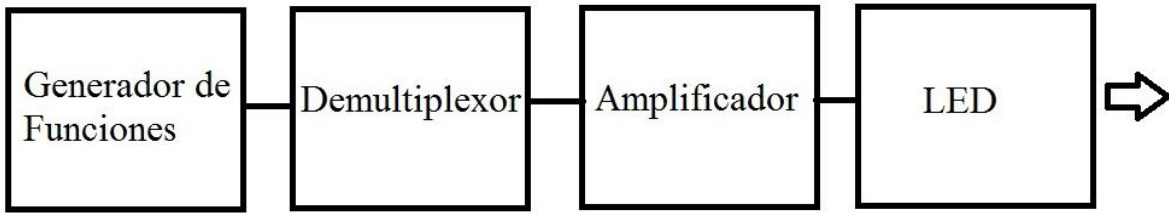


Fig. 2.2. El inicial Diagrama de bloques del Transmisor óptico (forma generalizada)

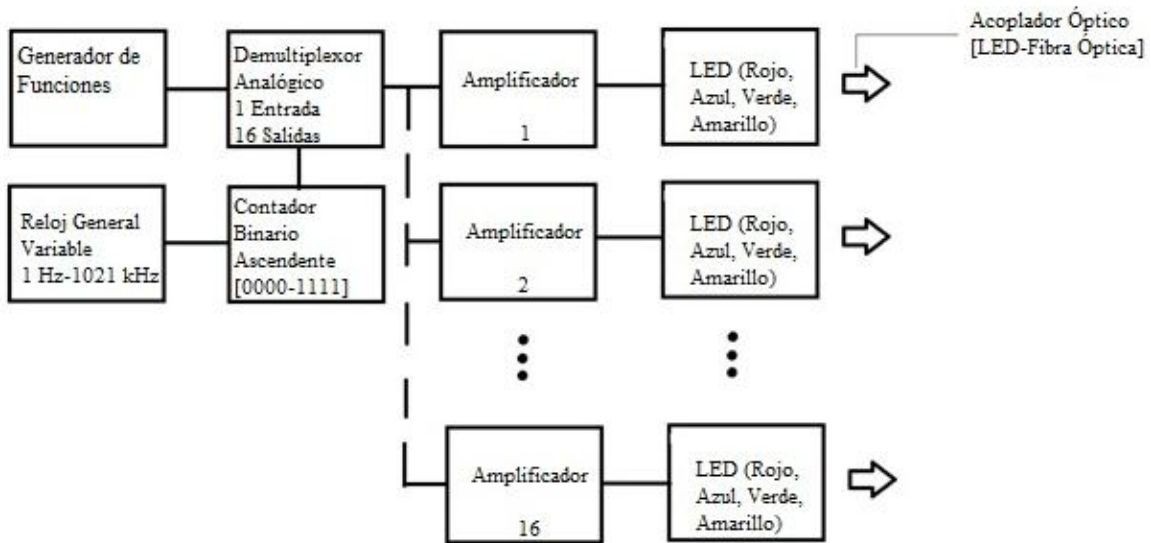


Fig. 2.3. El inicial Diagrama de bloques del Trasmisor óptico (forma detallada)

De manera similar, se describe el diagrama de bloques del equipo receptor óptico que fue implementado y evaluado experimentalmente. Se muestra en la Fig. 2.4 y de forma más detallada en la Fig. 2.5.

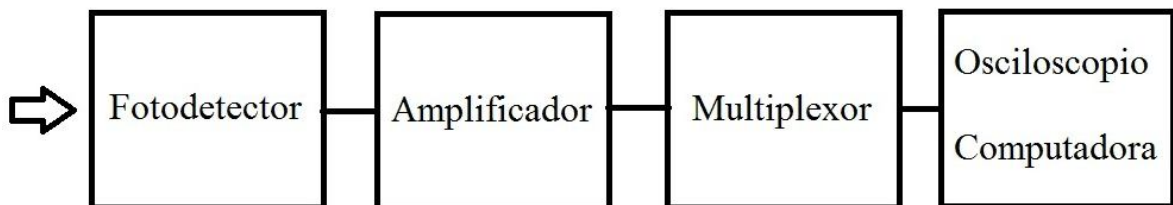


Fig. 2.4. El inicial Diagrama de bloques del Receptor óptico (forma generalizada)

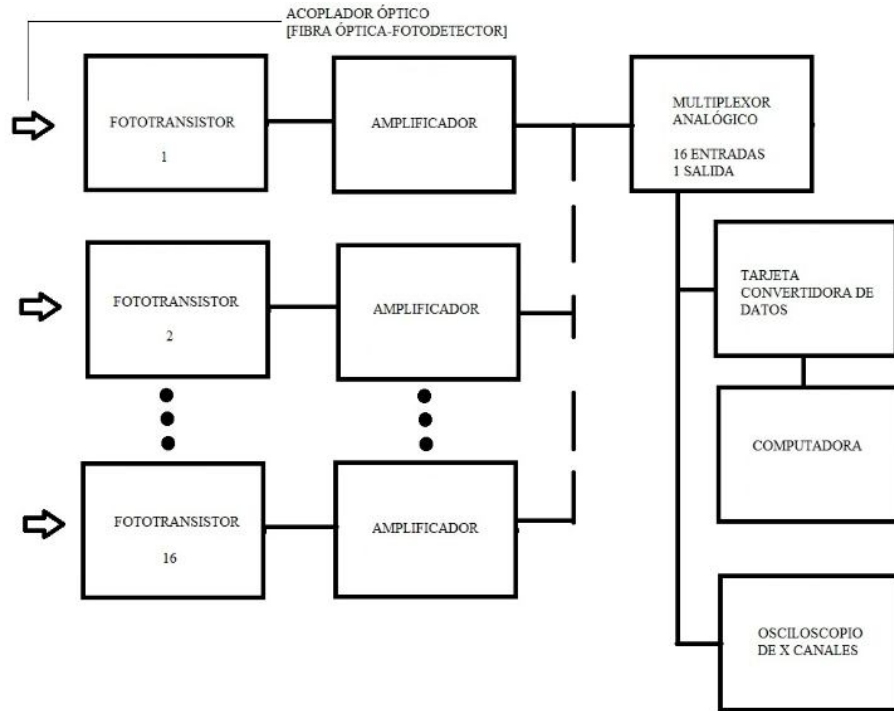


Fig. 2.5. El inicial Diagrama de bloques del Receptor óptico (forma detallada)

En el caso, para la presente aplicación de monitoreo de elementos de concreto, se tiene contemplado el uso de este Sistema y de forma general y detallada se presenta el esquema de diagrama de bloques en la Fig. 2.6 y Fig. 2.7.

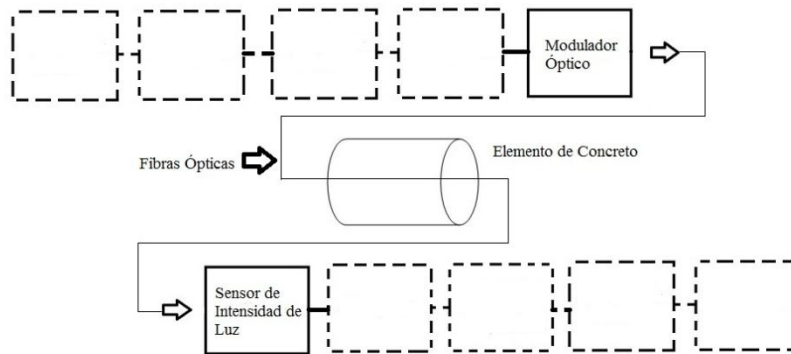


Fig. 2.6. Diagrama de bloques del Sistema de Monitoreo de Arreglos de Fibras Ópticas embebidas en elementos de concreto

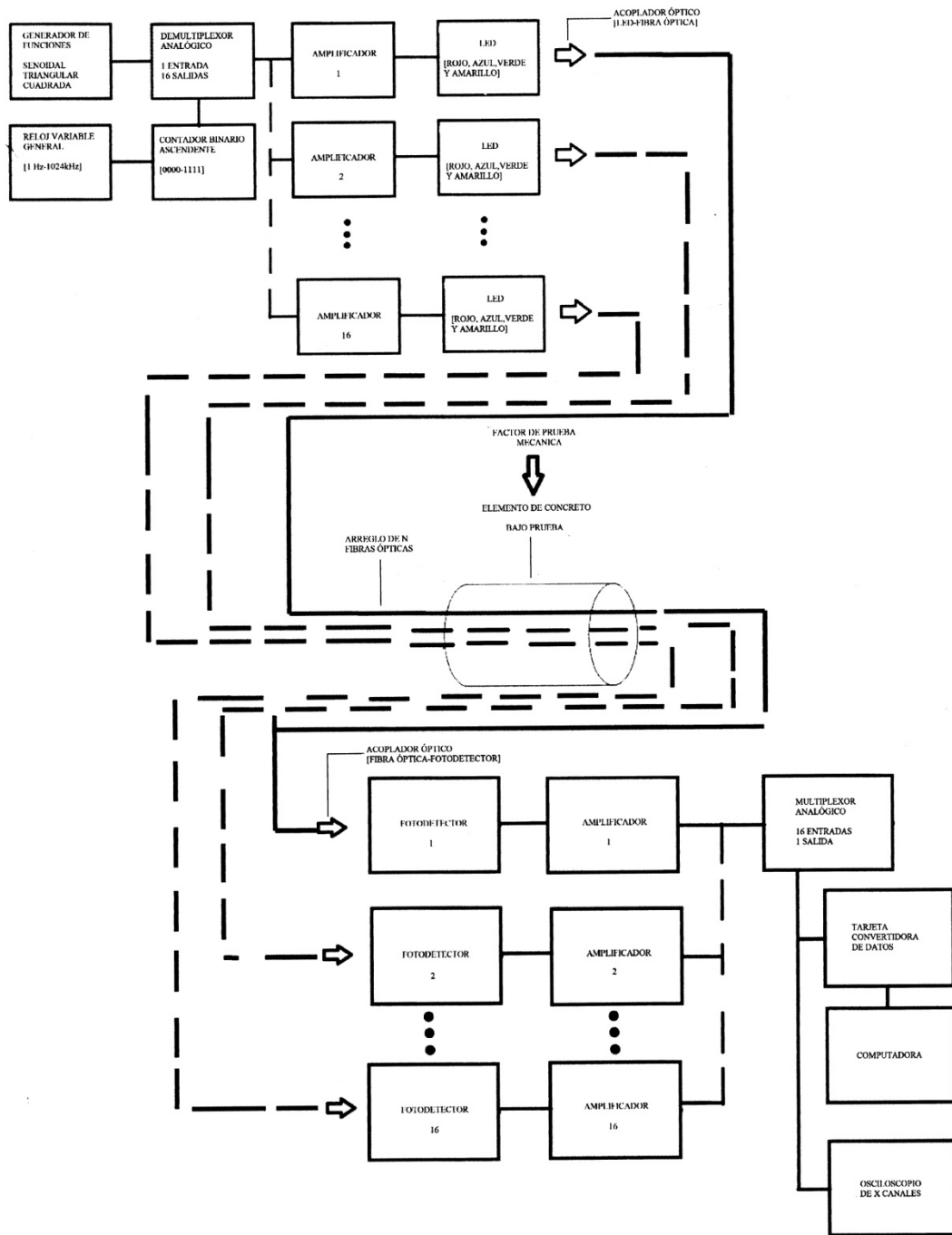


Fig. 2.7. Diagrama de bloques del Sistema de Monitoreo de Arreglos de Fibras Ópticas embebidas en elementos de concreto

2.5. ELABORACIÓN DEL ESQUEMA FUNCIONAL DEL SISTEMA DE INTERROGACIÓN DE ARREGLOS DE SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS

El Sistema consiste de un modulo de control, n módulos de equipo transmisor de 16 canales cada uno, n módulos de equipo receptor de 16 canales cada uno, un multiplexor, un demultiplexor, un osciloscopio de 16 canales digitales ó un equipo de adquisición de datos.

El equipo transmisor óptico que fue desarrollado se describe a continuación: se procedió con el desarrollo del generador de funciones utilizando el circuito integrado seleccionado para éste subsistema. Es capaz de proporcionar tres formas de onda analógica: 1. Onda senoidal, 2. Onda triangular y 3. Onda cuadrada, éste requiere de dos fuentes de alimentación eléctrica: fuente de alimentación eléctrica positiva y fuente de alimentación eléctrica negativa de ± 1.2 a 22 V a 1.2 A [1].

La forma de onda analógica generada es enviada al circuito integrado demultiplexor analógico seleccionado para esta etapa. Permite tener 16 salidas analógicas con una entrada acotada de voltaje; éste depende de un circuito adicional, un contador binario ascendente cíclico 0000 a 1111 [2].

El contador binario ascendente cíclico 0000-1111 depende de una entrada inicial (reloj) para su funcionamiento; éste se implementó con el circuito integrado seleccionado para esta etapa en su configuración astable que proporciona a la salida un tren de impulsos con un ciclo de trabajo del 50 %. Al variar sus componentes pasivos (resistor y condensador), éste proporciona diferentes frecuencias de oscilación de salida. Los circuitos integrados tienen una fuente de alimentación eléctrica con valor nominal de salida de 5 V [3]-[6].

El demultiplexor permite obtener 16 salidas analógicas; las salidas se habilitan por medio del contador binario ascendente cíclico 0000-1111, la entrada de la forma de onda analógica al demultiplexor se multiplexa con la técnica TDM en determinado tiempo canal por canal, éste lo determina el reloj del contador binario ascendente cíclico 0000-1111.

Las salidas son conectadas al resistor de la base de cada uno de los 16 transistores. Se implementó con un diagrama eléctrico del tipo polarización fija, la fuente de luz se encuentra entre el colector del transistor y la resistencia del colector, en este caso LEDs.

Los amplificadores tienen fuentes de alimentación eléctrica con valor nominal de salida de 12 V. En el Sistema, se implementaron LEDs como fuentes de luz de 4 diferentes colores (longitudes de onda): rojo, azul, verde, amarillo. Están ópticamente acoplados a una fibra óptica del arreglo embebido en un elemento de concreto a través de acopladores diseñados para la presente aplicación [7]-[11].

Por parte del equipo receptor óptico, esto se implementó con 16 fotodetectores, éste percibe la forma de onda analógica que se propaga a través de la fibra óptica. Tienen una fuente de alimentación eléctrica con valor nominal de salida de 12 V. La forma de onda analógica recibida se localiza entre el ánodo y el resistor de carga del fototransistor, está entra a una etapa amplificadora implementada con un diagrama eléctrico con una polarización de voltaje, tiene una ganancia de 2, con el fin de no dañar al circuito integrado configurado del modo multiplexor. La forma de onda de salida del amplificador se localiza en el colector, está desfasada 180 grados con respecto a la forma de onda analógica de entrada en la base. Esta etapa amplificadora tiene una fuente de alimentación eléctrica con valor nominal de salida de 19V [12]-[13].

La forma de onda de salida analógica de cada uno de los 16 amplificadores del equipo receptor óptico entran al circuito integrado seleccionado para esta etapa, el mismo circuito integrado que el del equipo transmisor óptico pero ahora configurado del modo multiplexor, las entradas son habilitadas por el mismo contador binario ascendente cíclico 0000-1111 del equipo transmisor óptico, con esto, se tiene el sincronismo entre los canales. Esta etapa tiene una fuente de alimentación eléctrica con valor nominal de salida de 5V [14].

Los valores resultantes de las amplitudes de las diferentes formas de onda analógica se procesan en un equipo de adquisición de datos. Su función es la obtención de todas las muestras posibles de los valores resultantes. Éste debe tener por lo menos 16 canales de entrada analógicos para monitorear cada canal individualmente para una mayor obtención de muestras/segundo por canal.

2.6. SELECCIÓN DE ELEMENTOS CLAVE DEL SISTEMA DE INTERROGACIÓN DE ARREGLOS DE SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS

2.6.1. Tipos de Fibra Óptica

Las fibras ópticas utilizadas como sensores son de tipo multimodo (de un diámetro de núcleo de 50 μm ó más grande) dado que en el mercado nacional e internacional son las más utilizadas en el mercado. Sus precios son relativamente económicos que facilitan su empleo para la presente aplicación.

Se consideran fibras ópticas multimodo con diámetros de núcleo/revestimiento de 50/125 μm , 400/500 μm y 400/900 μm , de diferentes materiales para su análisis y comparación de las mismas fibras ópticas, se prevé diferentes distancias físicas de longitud para cada tipo de fibra óptica alrededor de decenas de metros y diferentes arreglos geométricos como la combinación de 3 ó más arreglos diferentes de tipos de fibras ópticas en un elemento de concreto y materiales compuestos de polímeros.

2.6.2. Tipos de Fuentes de Luz

Se considera utilizar fuentes de luz visibles, por la facilidad de identificar a las fibras ópticas de los distintos canales. En contraste, los LEDs infrarrojos requieren de un equipo adicional (un tipo de “visor nocturno”) para observar la transmisión e identificar los canales ópticos. Se tiene contemplado utilizar diferentes tipos de fibras ópticas (con diferentes longitudes de onda y longitudes físicas), se considera la posibilidad de caracterizar de alguna forma posible si cada una de las fuentes de luz a utilizar sirven para todas las fibras ópticas y cuales fuentes de luz se transmiten mejor a través de éstas.

Su propia geometría física de la fuente de luz, existen de diámetros pequeños o grandes. Se contempla para la presente aplicación LEDs de diámetros de 3mm y 5mm dado que son los más comunes en el mercado nacional e internacional. La apertura del haz debe ser lo más directivo; esto permitirá obtener una mayor directividad en el flujo de fotones de la fuente de luz. Esto permite de una forma más fácil, la introducción de esta energía en la fibra óptica.

El tipo de material de cada LED es:

- 1.- Arseniuro de Galio Aluminio (AlGaAs), Arseniuro de Fosforo de Galio (GaAsP), Fosfato de Aluminio Galio e Indio (AlGaInP) entre otros para el caso de los LEDs de color Rojo [15];
- 2.- Nitruro de Galio e Indio (InGaN), Fosforo de Galio (GaP) ó Nitruro de Galio (GaN), Fosfato de Aluminio Galio e Indio (AlGaInP) entre otros para el caso de los LEDs de color Verde [15];
- 3.- Arseniuro de Fosforo de Galio (GaAsP), Fosfato de Aluminio Galio e Indio (AlGaInP), Fosforo de Galio (GaP), entre otros para el caso de los LEDs de color Amarillo [15];
- 4.- Selenio de Zinc (ZnSe), Nitruro de Galio e Indio (InGaN) y Carburo de Silicio (SiC) entre otros para el caso de los LEDs de color azul [15].

Para cada tipo de LED, se tiene una respectiva longitud de onda, a continuación se mencionan la respectiva longitud de onda.

- LED Rojo de 5 mm. $\lambda = 630\text{nm}$;
- LED Verde de 5mm. $\lambda = 525\text{nm}$;
- LED Azul de 5 mm. $\lambda = 475\text{nm}$;
- LED Amarillo de 5mm $\lambda = 590\text{nm}$;
- LED Rojo de 3mm. $\lambda = 635\text{nm}$;
- LED Verde de 3mm. $\lambda = 520\text{nm}$;
- LED Azul de 3mm. $\lambda = 465\text{nm}$;
- LED Amarillo de 3mm. $\lambda = 600\text{nm}$.

2.6.3. Tipos de Fotodetectores

Se requiere de fotodetectores en el rango de luz visible. Para la determinación de la opción más óptima, se realizaron pruebas con distintos fotodetectores. Como en el caso de los LEDs, los fotodetectores están fabricados de diferentes materiales: silicio (Si) y germanio (Ge). De esto depende la longitud de onda a la cual trabajan. Se probaron diferentes fotodetectores los cuales se describen a continuación:

- a) Fototransistor NPN de silicio, Visible, marca Everlight modelo PT331C;
- b) Fototransistor NPN de silicio, Visible & IR marca NTE Corporation modelo NTE3031;
- c) Fototransistor NPN de silicio, Visible & IR marca NTE Corporation modelo NTE3032;
- d) Fototransistor NPN de silicio, Visible & IR marca NTE Corporation modelo NTE3037.

Estos 4 fototransistores tienen características eléctricas importantes. Dado estas características todos cumplen con las exigencias técnicas requeridas: a) permiten la recepción de la misma forma de onda analógica transmitida, b) fácil implementación del diagrama eléctrico, c) la gran diferencia es el costo del fototransistor: a) \$ 5.00 M.N, b) \$ 135.00 M.N, c) \$ 185.00 M.N y d) \$ 245.00 M.N., respectivamente.

Se eligió el Fototransistor NPN de silicio, para la banda visible, marca Everlight modelo PT331C, su costo oscila entre \$ 5.00 M.N a \$ 7.00 M.N. dependiendo la tienda electrónica. Éste tiene algunas ventajas competitivas:

- 1.- Rango amplio espectral de 400 a 1100 nm;
- 2.- Diámetro relativamente pequeño de 5mm;
- 3.- Angulo de captación pequeño de 32° como máximo;
- 4.- Costo bajo;
- 5.- Fácil implementación del diagrama eléctrico.

2.6.4. Elementos clave del subsistema de adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos

Con el objetivo de tener la mayor cantidad posible de muestras por segundo por canal, las características principales del equipo de adquisición de datos, se requiere de una tasa de muestreo por segundo amplia para que cada canal obtenga la mayor cantidad posible de muestras por segundo.

Debe tener una memoria interna para guardar los datos obtenidos a través de las pruebas experimentales. Ésta debe ser del orden de Gb para poder almacenar una cantidad grande de información. Debe de contener canales de entrada del tipo analógico, del orden de 2^n siendo n el modelo base del numero de fibras ópticas a monitorear.

Se considera como mínimo una n con valor de 2, de tal forma que se requiere por lo menos 4 canales analógicos de entrada en el equipo de adquisición de datos. El procesamiento de los datos se obtendrá en hojas de cálculos (Excel) en forma de listas, estos valores serán representados en gráficas.

2.7. CONCLUSIONES

1. Los dos bloques (transmisor óptico y receptor óptico) forman el Sistema Optoelectrónico de Interrogación de Arreglos de Sensores de Fibras Ópticas, el cuál implementa una interrogación periódica serial de todas las fibras ópticas del arreglo por medio de multicanalización en el dominio del tiempo (TDM). Se contempla tanto una interpretación binaria como analógica de los datos sobre la transmisión óptica de cada fibra óptica.
2. Para detectar alguna anomalía en el Sistema (distorsión de la forma de onda, evento transitorio por ruido de las fuentes de alimentación eléctrica, mal funcionamiento de los circuitos integrados, etc.), se cuenta con una herramienta para un diagnostico interno de la linealidad de señales ópticas analógicas. Son generadores de forma de onda triangular y sinodal que facilitan la detección de distorsiones no lineales del sistema de medición. Además, hay un generador de forma de onda cuadrada. Esto permite la transmisión en modo binario y modo lineal.
3. Se tiene contemplado usar este Sistema en aplicaciones alternativas; interrogación de sensor óptico de nivel de líquidos, entre otros.

2.8. REFERENCIAS

- [1] Intersil, "Hoja de Especificaciones del Circuito Integrado modelo ICL8038," 1-13pp., 2001.
- [2] Philips Semiconductors, "Hoja de Especificación del Circuito Integrado modelo 74HC4067," 1-15pp., 1993.
- [3] Fairchild Semiconductor, "Hoja de Especificación del Circuito Integrado modelo 74LS73," 1-6pp., 2000.
- [4] Fairchild Semiconductor, "Hoja de Especificación del Circuito Integrado modelo 74LS08," 1-6pp., 2000.
- [5] Fairchild Semiconductor, "Hoja de Especificación del Circuito Integrado modelo 74LS711," 1-6pp., 2000.
- [6] Fairchild Semiconductor, "Hoja de Especificación del Circuito Integrado modelo NE555," 1-15pp., 2002.
- [7] Fairchild Semiconductor, "Hoja de Especificación del Circuito Integrado modelo TBJ547," 1-5pp., 2002.
- [8] Nichia Corporation, "Specifications for RED LED mod. NSPR310S," 1-15pp., 2010.
- [9] Nichia Corporation, "Specifications for GREEN LED mod. NSPG300D," 1-15pp., 2010.
- [10] Nichia Corporation, "Specifications for BLUE LED mod. NSPB300B," 1-15pp., 2010.
- [11] Nichia Corporation, "Specifications for YELLOW LED mod. NSPA310S," 1-15pp., 2010.
- [12] Everlight, "Hoja de Especificaciones del Fototransistor modelo PT331C," 1-7pp., 2004.
- [13] Boylestad, Robert L. y Nashelsky, Louis, "Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos," 10ª Ed., México, Pearson Prentice Hall, 435-465pp., 2009.
- [14] Philips Semiconductors, "Hoja de Especificación del Circuito Integrado modelo 74HC4067," 1-15pp., 1993.
- [15] Mesografía, consulta 19/03/2013 http://www.oksolar.com/led/led_color_chart.htm

CAPÍTULO 3

TRANSMISOR ÓPTICO

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen las exigencias técnicas requeridas para el equipo transmisor óptico, y se analizan diferentes opciones de circuitos eléctricos para la elaboración de los diferentes subsistemas que conforman al equipo transmisor óptico.

Se selecciona la variante óptima para la presente aplicación: monitoreo de arreglos de fibras ópticas embebidas en elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros. Se presentan los resultados de implementación y pruebas experimentales.

3.2. ELABORACIÓN DE EXIGENCIAS TÉCNICAS PARA EL EQUIPO TRANSMISOR ÓPTICO

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo anterior, el equipo Transmisor Óptico debe de generar formas de onda senoidal, onda triangular y onda rectangular. Para lograr estas funciones, debe contar con generadores de estas tres formas de onda y con amplificadores de corriente eléctrica capaces de la excitación adecuada de las fuentes de luz - los LEDs.

3.2.1. Generador de Funciones

El Generador de Funciones debe ser capaz de proporcionar las siguientes formas de onda analógicas: 1.Onda senoidal, 2.Onda triangular y 3.Onda cuadrada. La amplitud de las tres formas de onda analógicas debe ser variable. El rango de operación de las frecuencias a las que se tiene contemplado trabajar es en el orden de decenas de kHz.

3.2.2. Etapa de Multicanalización (Demultiplexor)

La etapa de multicanalización convierte la secuencia serial de la forma de onda analógica de entrada a una secuencia paralela de salida, esta secuencia serial será habilitada en diferentes canales (paralelo) de salida; estos canales analógicos del demultiplexor trabajan de la forma TDM y son determinados por un circuito eléctrico adicional (contador binario ascendente cíclico) que proporciona habilitar cada uno de los diferentes canales analógicos de esta etapa de multicanalización.

Se cuenta con n canales de multicanalización, donde n es múltiplo de 16, cada canal cuenta con una codificación binaria la cual permite habilitar cada uno de los diferentes canales con los que cuenta esta etapa de multicanalización.

3.2.3. Etapa Amplificadora

Esta etapa de amplificación tiene que cumplir con lo siguiente: A. Realizar la amplificación del voltaje de la forma de onda analógica, de tal forma, que no exista alguna distorsión ó saturación de su forma, y B. Proporcionar una corriente adecuada para la excitación de las fuentes de luz - los LEDs.

3.2.4. Fuentes de Alimentación Eléctrica

La fuente de alimentación eléctrica deberá de proporcionar el voltaje y la corriente necesaria para cada uno de los subsistemas del equipo transmisor óptico. Se requieren fuentes de alimentación eléctrica con salidas nominales de 5V, 12V y 19V y corrientes alrededor de 500mA -1 A.

3.2.5. Fuentes de Luz (LEDs)

Las fuentes de luz del equipo transmisor óptico deben ser capaces de emitir las tres formas de onda ópticas con una intensidad suficiente para el funcionamiento del Sistema. En el mercado nacional e internacional, existen diferentes marcas y modelos de LEDs que van de la luz azul hasta infrarrojo. Se consideran LEDs en el rango de luz visible para poder identificar visualmente si la fuente de luz funciona o no.

Se contemplan LEDs de diferentes diámetros como son 3mm, 5mm, diferente geometría física y diferente color (longitud de onda). Las empresas contempladas para los LEDs son: a) marca Nichia Corporation, b) marca Siled Corporation.

3.2.6. Acoplador LED-Fibra Óptica

Estos acopladores tienen la función principal de mantener unidos y alineados a dos elementos: la fuente de luz (LED) y un extremo de la fibra óptica por parte del equipo transmisor óptico.

3.2.7. Diseño Físico Estructural del Bloque Transmisor Óptico

La función principal de la estructura es la protección de todos los circuitos eléctricos de los equipos. Se prevé que en el marco del presente trabajo el gabinete consista de material plástico y en un futuro se tiene contemplado gabinetes herméticos de metal.

Para el Sistema completo, se contemplan dos gabinetes, uno para cada equipo: transmisor óptico y receptor óptico de material plástico, con dimensiones de 223x140x92 mm, largo, altura, ancho respectivamente. Se prevé que para una siguiente etapa de desarrollo del Sistema sólo sea un gabinete más amplio para introducir ambos equipos.

3.3. RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES DE SUBSISTEMAS DEL EQUIPO TRANSMISOR ÓPTICO

El equipo transmisor óptico debe ser independiente de los demás módulos. Se procedió a diseñar todos los subsistemas que conforman el equipo transmisor óptico, de manera tal, que se comenzará por la generación de la señal AC a transmitir.

3.3.1. Generador de Funciones: Onda Senoidal, Onda Triangular y Onda Cuadrada

Es necesario que tanto la amplitud como la frecuencia sean lo más estable posible. La onda cuadrada es la más adecuada para utilizarla en el caso de circuitos digitales, o para evaluar retardos de tiempos de subida y bajada de los impulsos (la constante de tiempo de los equipos). Será igualmente necesario tener pulsos de anchura variable.

La onda triangular será un complemento útil para poder comprobar el funcionamiento de comparadores de tensión al tener una señal que varía linealmente con el tiempo. Se estima que el rango de frecuencias debe ser desde 1 Hz hasta 100 kHz.

El generador de funciones es un Generador de Forma de Onda de Precisión/Oscilador Controlado de Voltaje. Es un circuito integrado monolítico capaz de producir onda senoidal, onda triangular, onda cuadrada y pulso de anchura variable con un mínimo de componentes externos [1].

La frecuencia de oscilación de salida puede ser seleccionada externamente desde 0.001 Hz hasta 300 kHz usando resistores y condensadores adecuados con posibilidad de disponer de modulación de frecuencia y barrido de ésta con una tensión externa de control [1].

El diagrama de bloques se muestra en la Fig. 3.1 éste dispone de dos fuentes de corriente independientes, dos comparadores, un multivibrador biestable que conmuta la fuente de corriente # 1 o # 2, dos amplificadores de salida uno para señales cuadrada y otra para señales triangulares y un convertidor de señal triangular a señal senoidal.

El modo de funcionamiento es el siguiente: un condensador externo es cargado y descargado por las fuentes de corriente. La fuente de corriente # 2 es conectada o desconectada por el multivibrador biestable, mientras que la fuente de corriente # 1 está funcionando continuamente.

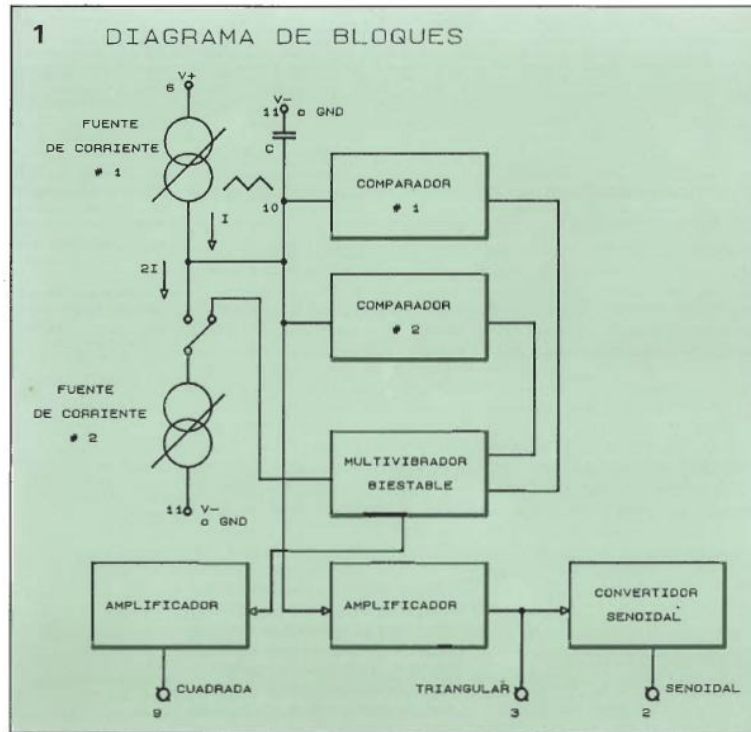


Fig. 3.1. Diagrama de bloques del circuito integrado marca Intersil modelo ICL8038 [1]

Suponiendo que la fuente # 2 esta desconectada mediante el multivibrador biestable, el condensador es cargado con la corriente I procedente del generador de corriente # 1, subiendo la tensión del condensador linealmente con el tiempo. Cuando la tensión alcanza un nivel determinado correspondiente a los $2/3$ de la tensión de alimentación, el comparador # 1 dispara al multivibrador biestable que cambia de estado liberando así el generador de corriente # 2.

Este generador de corriente tiene una capacidad normalmente del doble del generador # 1 es decir $2I$, por lo que el condensador es descargado con una corriente neta de I al estar en oposición, y con ello la tensión en bordes del condensador decrece linealmente con el tiempo. Cuando la tensión alcanza un nivel determinado correspondiente de $1/3$ de la alimentación el comparador # 2 dispara el multivibrador biestable poniéndolo en su estado original, iniciándose así el ciclo de nuevo.

Generación de la forma de onda

Con las fuentes de corriente puestas a I y $2I$ respectivamente los tiempos de carga y descargar del condensador serán iguales, creando una tensión triangular y a la salida del multivibrador biestable una onda cuadrada. Ambas señales son enviadas a sus respectivos amplificadores de salida y están disponibles en las terminales 3 y 9 del circuito integrado respectivamente.

Los niveles de los generadores de corriente pueden ser seleccionados dentro de un amplio rango mediante dos resistores externos. Si éstos se ajustan a valores diferentes de I y $2I$ respectivamente, se obtiene un diente de sierra asimétrico en la terminal 3 y pulsos rectangulares de anchura variable en la terminal 9. La onda senoidal es creada al introducir la señal triangular a la entrada de una red alineal que es un convertidor triangular-senoidal.

Esta red está formada por un conjunto de transistores, que trabajando por segmentos aproxima la señal triangular a la senoidal, funcionando con una gran precisión hasta una frecuencia de 100 kHz. La simetría de todas las formas de onda obtenibles puede ajustarse por medio de dos resistores externos (R_a y R_b). Para la presente aplicación estos valores son: $R_a=R_b=6.8\text{ k}\Omega$ obteniendo la frecuencia de trabajo de 1 kHz para todas las formas de onda analógicas.

R_a controla la porción de subida de la onda triangular y senoidal y el estado 1 de la onda cuadrada. La carga del condensador es igual al producto de la tensión de conmutación del comparador y el valor de capacidad del condensador y se expresa en Culombios. El tiempo para llegar a esa tensión depende de la intensidad de carga y del nivel máximo al que está situado el comparador # 1 que es $1/3$ de la tensión de alimentación [2].

Para el caso más frecuente de dos resistores iguales $R_a=R_b$ la expresión es: $f=0.3/RC$, para éste diseño $R=6.8\text{ k}\Omega$ y $C=47\text{ nF}$, sustituyendo estos valores en la expresión para el cálculo de la frecuencia f , la frecuencia teórica de trabajo es 938.67 Hz, en la práctica la frecuencia de trabajo es 1.14 kHz como se muestra en la Fig. 3.3.

Ni la frecuencia ni los tiempos dependen de la fuente de alimentación eléctrica, ya que las tensiones de conmutación de los comparadores son reguladas en el interior del circuito integrado, pues de hecho, las corrientes y la tensión de detección son funciones lineales de la alimentación y por lo tanto sus efectos son contrarrestados.

Para minimizar la distorsión de la onda senoidal se utilizó un potenciómetro de 100 k Ω en serie con una resistencia de 10k Ω entre la alimentación y los puntos centrales de los potenciómetros a las terminales 1 y 12 respectivamente consiguiéndose niveles de distorsión menores del 0.05 %.

El circuito integrado puede trabajar con dos fuentes de alimentación eléctrica variables, positiva y negativa de 1.2 V a 22 V, con una fuente de alimentación eléctrica los niveles de salida de la onda triangular y onda senoidal son exactamente la mitad de la tensión aplicada, mientras que la onda cuadrada tiene una amplitud que corresponde a la de la fuente de alimentación eléctrica.

Una tensión de alimentación eléctrica dual posee una ventaja de que las señales están referenciadas respecto a tierra, lo que puede ser importante en determinados casos. La onda cuadrada tiene su salida en la terminal 9 y consiste en un colector abierto, por lo que es preciso colocar una resistencia a positivo de la propia fuente de alimentación eléctrica del generador, el valor de la resistencia es de 10k Ω [1].

El circuito integrado seleccionado tiene para cada una de las señales un coeficiente el cual determinará la amplitud de las señales:

- Senoidal: $0.22 \times \text{Voltaje de Alimentación}$;
- Triangular: $0.33 \times \text{Voltaje de Alimentación}$;
- Cuadrada: Voltaje de Alimentación.

Resultados

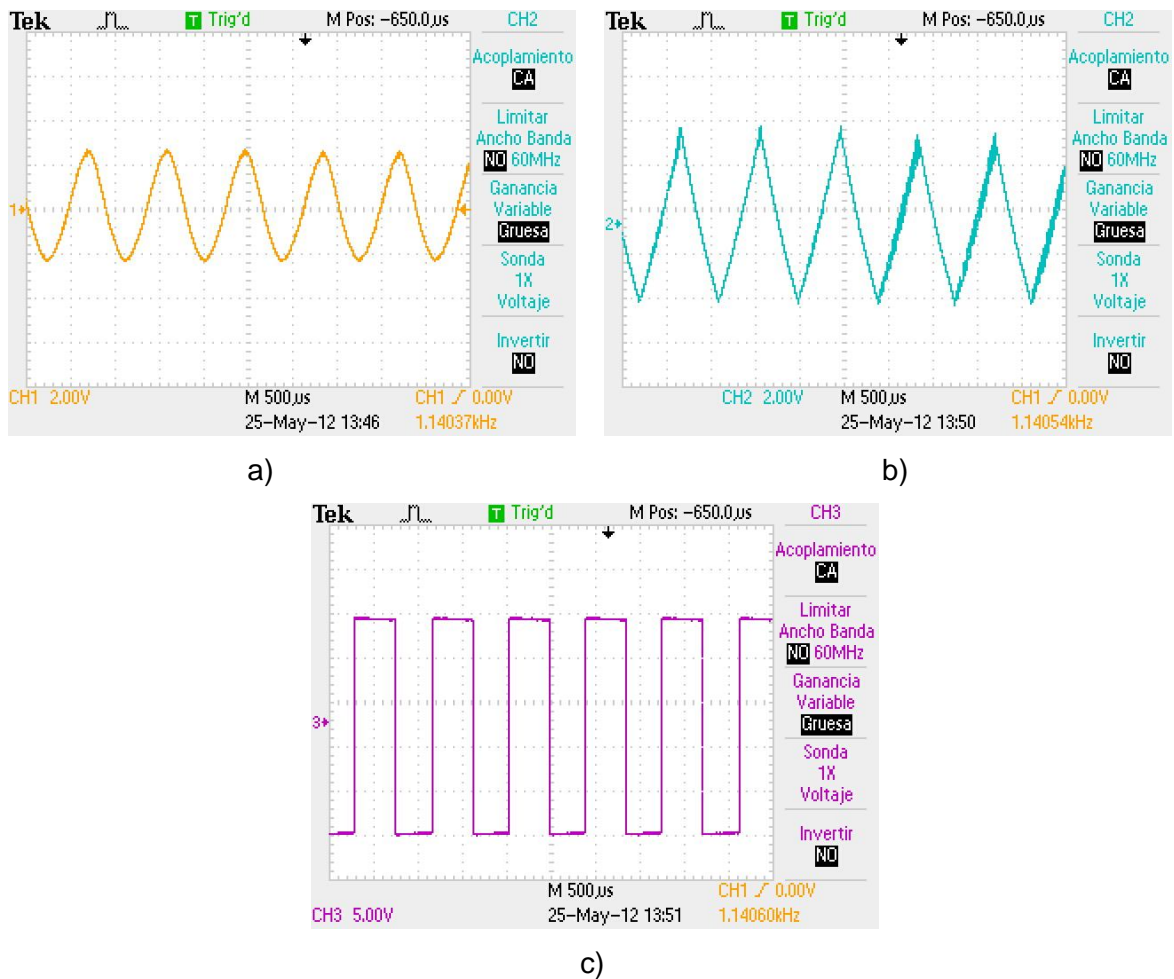


Fig. 3.3. Formas de onda de Salida del Generador de Funciones bajo parámetros: $V = \pm 12V$, $R_a=R_b= 6.8k\Omega$ y $C=47nF$: a) Senoidal, b) Triangular, c) Cuadrada

3.3.2. Etapa de Multicanalización (Multiplexor)

En el mercado nacional se encontraron tres diferentes circuitos integrados con 8 y 16 canales; circuito integrado demultiplexor de 3 entradas y 8 salidas digitales con lógica negada, circuito integrado demultiplexor de 4 entradas y 16 salidas digitales con lógica negada y circuito integrado demultiplexor analógico de 4 entradas y 16 salidas analógicas.

Las principales características de los tres circuitos integrados son:

- Fuente de alimentación eléctrica de 5V;
- Corriente Nominal de 20mA demultiplexor analógico y 15mA para los otros casos;
- Voltaje de Entrada Mínimo: 0.8 V;
- Voltaje de Entrada Máximo: 3.4 V;
- Bajo Costo;

Para los tres circuitos integrados se requieren de 3 entradas:

- Forma de onda analógica de entrada;
- Habilitador de Salida (Contador Binario Ascendente Cíclico);
- Habilitador (Enable) se requiere de un valor bajo de voltaje (0V) para su funcionamiento.

El primer circuito integrado, un demultiplexor digital de 3 entradas, 8 salidas digitales con lógica negada. Éste circuito integrado depende de las entradas descritas con anterioridad. El contador es de forma binaria ascendente cíclica 000-111 que en su similar forma decimal cuenta del 0 al 7.

La salida se habilitará conforme a la entrada, es decir, si se tiene la entrada binaria al demultiplexor 100, se habilitará la salida cuatro del demultiplexor y esta será la señal habilitada para transmitir. Las combinaciones de entrada/salida binarias al demultiplexor digital se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Combinaciones del Circuito Demultiplexor Digital

Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
000	0	010	2	100	4	110	6
001	1	011	3	101	5	111	7

La forma de onda analógica de entrada se coloca en la terminal 1 del circuito integrado y en la salida como se usa un demultiplexor digital se verá la señal de forma de unos y ceros.

Contador Binario Ascendente Cíclico 000-111

La función del contador binario ascendente cíclico 000-111, es habilitar cada uno de los canales en un determinado tiempo. Se implementó el contador binario ascendente cíclico 000-111 con un circuito integrado Flip-Flop tipo J-K, la función principal es guardar el estado anterior hasta llegar al máximo y se reinicia [2].

La salida del contador binario ascendente cíclico 000-111 se representa como un “uno” lógico y un “cero” lógico. Por ejemplo, en la Fig. 3.4 se muestra la salida del contador binario ascendente cíclico 0011 ((J-K1 posición 12(0), 9(0) y J-K2 12(1), 9(1)). Se observa que el bit más significativo es 0 V y el menos significativo es 5 V.

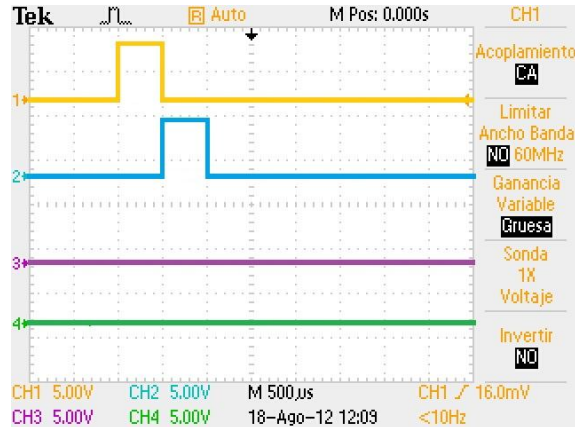


Fig. 3.4. Salida del contador binario ascendente cíclico 000-111, representa la salida 3 del Demultiplexor/Multiplexor Analógico, combinación mostrada 0011

Diseño del Contador Binario Ascendente Cíclico 000-111

Se realizó mediante un diagrama de tiempos, en la Fig. 3.5 se muestra la secuencia de pasos del contador binario ascendente cíclico 000-111.

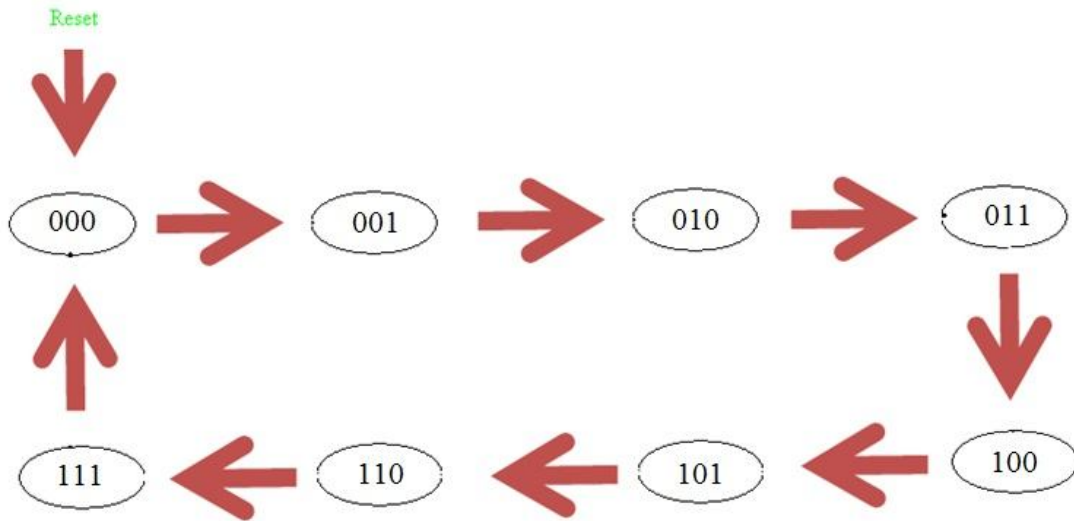


Fig. 3.5. Diagrama de Tiempos del Contador Binario Ascendente Cíclico

Edo P	Edo S	FFJK	FFJK	FFJK
ABC	ABC	J2K2	J1K1	J0K0
000	001	0*	0*	1*
001	010	0*	1*	*1
010	011	0*	*0	1*
011	100	1*	*1	*1
100	101	*0	0*	1*
101	110	*0	1*	*1
110	111	*0	*0	1*
111	000	*1	*1	*1

Tabla 3.3. Asignación de la tabla de verdad a cada estado del contador binario ascendente cíclico de la forma 000-111

En la Tabla 3.3 se observa cada uno de los estados que forman parte del diseño del contador binario ascendente cíclico 000-111, la obtención de cada una de las entradas a los Flip-Flop JK se obtienen a través de la reducción de mapas de Karnaugh Fig. 3.6.

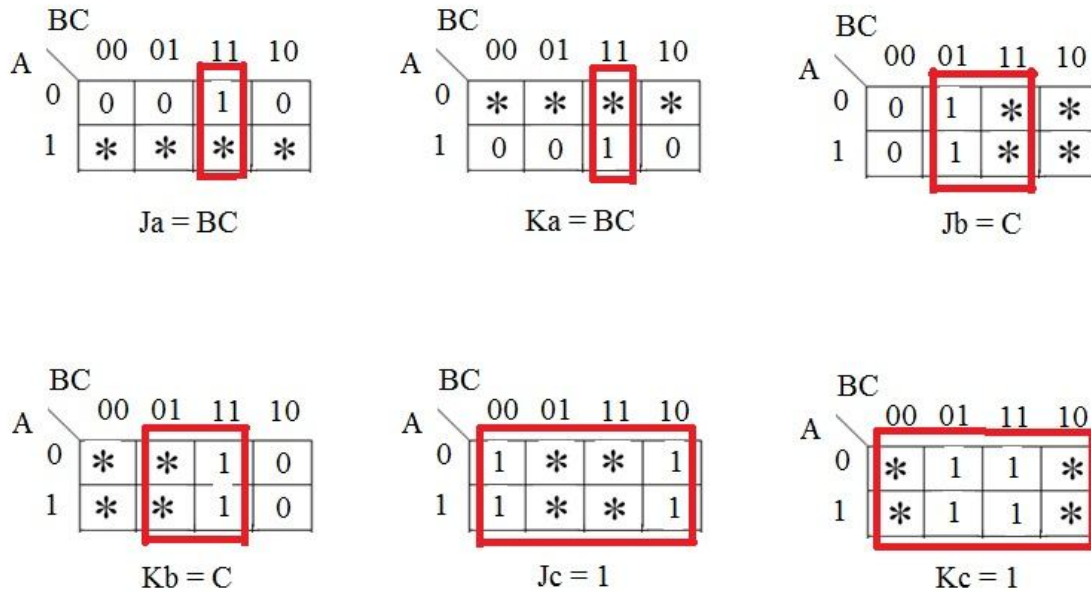


Fig. 3.6. Reducción de las variables de entrada de los Flip-Flop JK mediante mapas de Karnaugh

Descripción del Flip-Flop JK

El circuito integrado consta de dos Flip-Flop JK amo-esclavo con pre-establecimiento y despeje. La asignación de las terminales a cada Flip-Flop se muestra en la Fig. 3.7 la tabla de función especifica el funcionamiento del circuito integrado. Las cuatro primeras columnas de la tabla especifican el funcionamiento de las entradas asincrónicas de pre-establecimiento y despeje.

Estas entradas son independientes del reloj y de las entradas J y K (las X indican condiciones de indiferencia -NO Importa -). Las últimas cuatro columnas de la tabla de función especifican el funcionamiento con reloj cuando ambas entradas, pre-establecimiento y despeje, se mantienen en uno lógico. El valor del reloj se muestra como un solo pulso. La transición negativa del pulso hace que el Flip-Flop esclavo cambie, y la positiva, que cambie el Flip-Flop amo, así como la salida del circuito. Con $J=K=0$, la salida no cambia. El Flip-Flop se invierte o complementa cuando $J=K=1$ se muestra en la Fig. 3.7 [2].

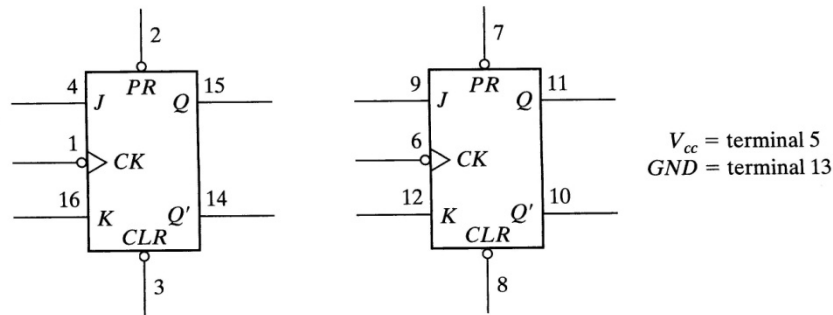


Tabla de función

Entradas					Salidas	
Preestab.	Despeje	Reloj	J	K	Q	Q'
0	1	X	X	X	1	0
1	0	X	X	X	0	1
0	0	X	X	X	1	1
1	1		0	0	Sin cambio	
1	1		0	1	0	1
1	1		1	0	1	0
1	1		1	1	Inversión	

Fig. 3.7. Símbolo gráfico y Tabla de Función [2]

Hay tres operaciones que pueden efectuarse con un Flip-Flop: a) establecerlo en 1. b) restablecerlo a 0 y c) complementar su salida. El Flip-Flop JK realiza las tres operaciones. El símbolo gráfico se muestra en la Fig. 3.7.

La tabla característica define las propiedades lógicas de un Flip-Flop describiendo su funcionamiento en forma tabular. En la Fig. 3.7 se muestra la tabla característica de un Flip-Flop JK. Define el siguiente estado en función de las entradas y del estado actual. $Q(t)$ se refiere al estado actual antes de la aplicación de un ciclo de reloj. $Q(t + 1)$ es el siguiente estado, un periodo de reloj después. Observe que la entrada de un ciclo de reloj no se incluye en la tabla característica, pero se supone implícitamente entre el tiempo t y el tiempo $t+1$. La tabla característica del Flip-Flop JK revela que el siguiente estado es igual al estado actual cuando las entradas J y K son ambas 0. Esto se expresa como $Q(t + 1) = Q(t)$ e indica que el reloj no produce ningún cambio de estado. Cuando $K=1$ y $J=0$, el reloj restablece el Flip-Flop y $Q(t + 1) = 0$. Con $J=1$ y $K=0$, el Flip-Flop se establece y $Q(t + 1) = 1$. En la Fig. 3.8 se muestra el diagrama eléctrico del contador binario ascendente cíclico 000-111 [2].

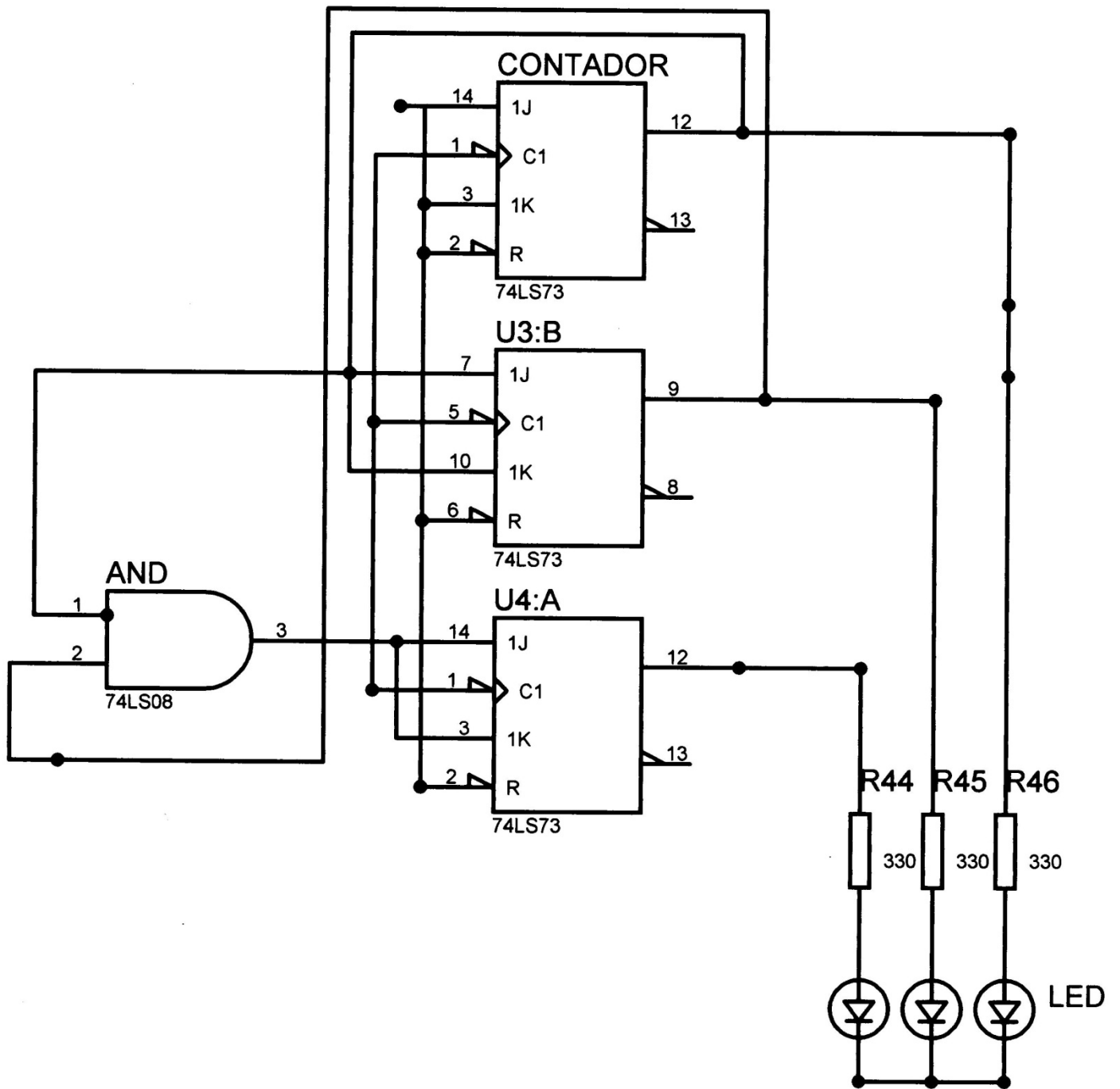


Fig. 3.8. Diagrama Eléctrico del Contador Binario Ascendente Cíclico 000-111

Este contador binario ascendente cíclico 000-111 depende de entradas iniciales:

- Generador de Pulsos (Reloj), permite que el contador binario ascendente cíclico 000-111 tenga una iteración más rápida o más lenta dependiendo de los valores de los resistores y del condensador;
- Habilitador (Enable) que requiere de una entrada con un valor alto (5V) para su funcionamiento.

Generador de Pulsos (Reloj)

El Generador de Pulsos, (reloj) general del Sistema se implementa con un circuito integrado. En el modo de funcionamiento astable, permite tener un pulso cuadrado. Su función es la sincronización del equipo transmisor óptico y equipo receptor óptico, trabaja con un ciclo de trabajo del 50 %, la frecuencia de oscilación de salida de este pulso cuadrado, depende de tres valores: RA ($1k\Omega$), RB (un potenciómetro variable de $100k\Omega$) y C (de 470 pF a $10\text{ }\mu\text{F}$) [3].

Descripción del Circuito Integrado NE555N

Es un circuito temporizador de precisión cuya lógica interna se muestra en la Fig. 3.9 (los resistores Ra y Rb y los dos condensadores no forman parte del circuito integrado). Consiste en dos comparadores de voltaje, un Flip-Flop y un transistor interno. La división de voltaje de $V_{cc}=5V$ a través de los tres resistores internos a tierra produce $2/3$ y $1/3$ de V_{cc} en las entradas fijas de los comparadores. Cuando la entrada de umbral en la terminal 6 rebasa 3.3 V el comparador superior restablece el Flip-Flop y la salida baja aproximadamente a 0 V .

Cuando la entrada de disparo en la terminal 2 baja de 1.7 V , el comparador inferior establece el Flip-Flop y la salida sube aproximadamente a 5 V . Cuando la salida es baja, Q' es alta y la unión base-emisor del transistor está polarizada en directa. Cuando la salida es alta Q' es baja y el transistor está en corte. El circuito temporizador puede generar retardos exactos controlados por un circuito RC externo. En éste diseño el circuito integrado operará en el modo astable para generar pulsos de reloj.

El funcionamiento del circuito integrado es el siguiente: en la Fig. 3.9 se muestra las conexiones externas para el funcionamiento astable. El condensador C se carga a través de los resistores R_a y R_b cuando el transistor está en corte y se descarga a través de R_b cuando el transistor está polarizado en directa y conduce.

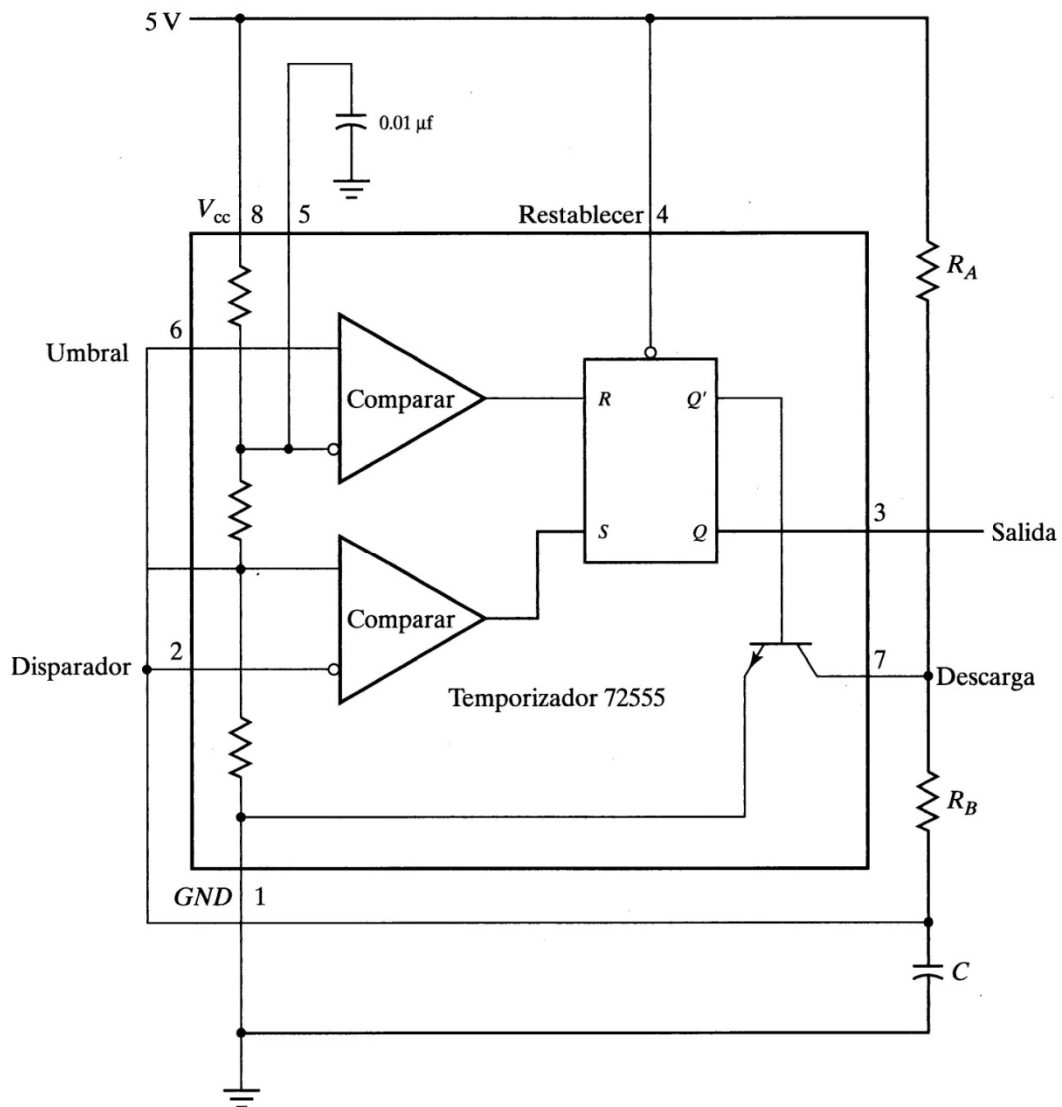


Fig. 3.9. Temporizador conectado como Generador de pulsos de reloj [2]

Cuando el voltaje de carga en el condensador C alcanza los 3.3 V la entrada de umbral en al terminal 6 hace que el Flip-Flop se restablezca y el transistor se encienda. Cuando el voltaje de descarga llega a 1.7 V la entrada de disparo en la terminal 2 hace que el Flip-Flop se establezca y el transistor se apague. Por tanto, la salida alterna continuamente entre dos niveles de voltaje en la salida del Flip-Flop.

La salida se mantiene alta durante un tiempo igual al tiempo de cargado, está duración se determina por la ecuación $t_H = 0.693 (R_a + R_b)C$. La salida se mantiene baja durante un tiempo igual al tiempo de descarga, está duración se determina por la ecuación

$$t_L = 0.693R_B C.$$

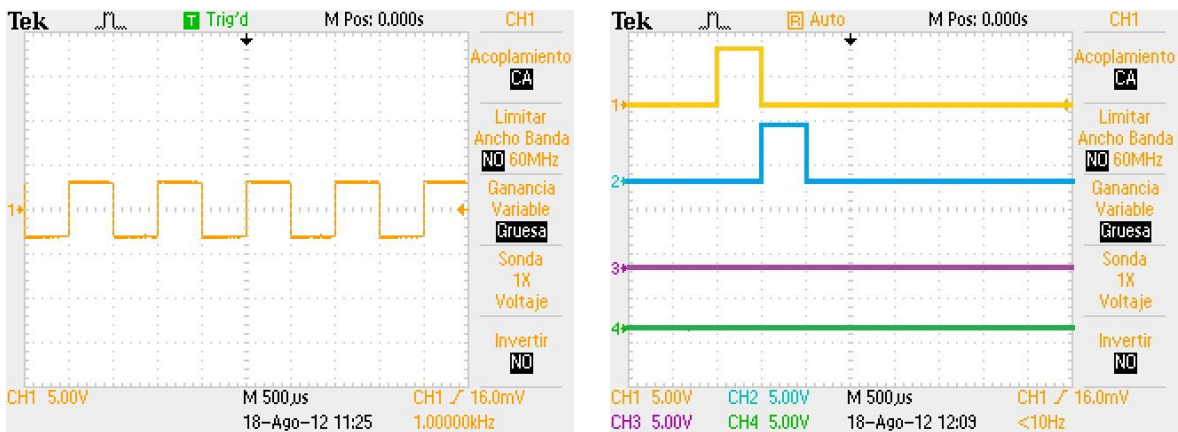
Diseño del Generador de Pulsos (reloj)

Los componentes externos R_a , R_b y C conforman la red de temporización que determina la frecuencia de oscilación de salida. El condensador de 0.01 μF conectado a la entrada de control (terminal 5) sirve únicamente para desacoplar y no afecta en absoluto al funcionamiento del resto del circuito; en algunos casos se puede eliminar.

La frecuencia de oscilación viene dada por la fórmula $f = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C}$

El ciclo de trabajo de salida puede ser ajustado seleccionando R_a y R_b dado que C se carga a través de $R_a + R_b$ y se descarga únicamente a través de R_b , se puede conseguir ciclos de trabajo de un 50 % aproximadamente, si $R_b \gg R_a$, de forma tal, que los tiempos de carga y descarga sean aproximadamente iguales. En la Fig. 3.10 se muestra el diagrama eléctrico general, donde se muestra las debidas conexiones entre los diferentes subsistemas del equipo transmisor óptico. En la Fig. 3.12 se muestra las diferentes formas de onda analógica con un circuito integrado. La forma de onda analógica (morada) es la entrada del circuito integrado en la terminal 1, y la forma de onda analógica (verde) es la salida de cualquiera de las terminales Y_0 - Y_7 . En la Fig. 3.11 se muestra la forma de onda analógica del tren de impulso del generador de pulso (reloj) [2].

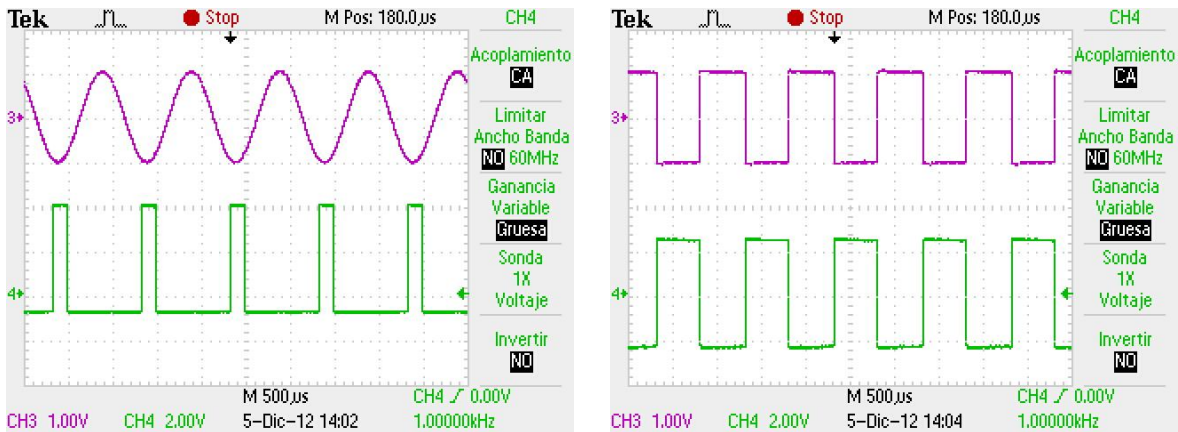
Resultados



a)

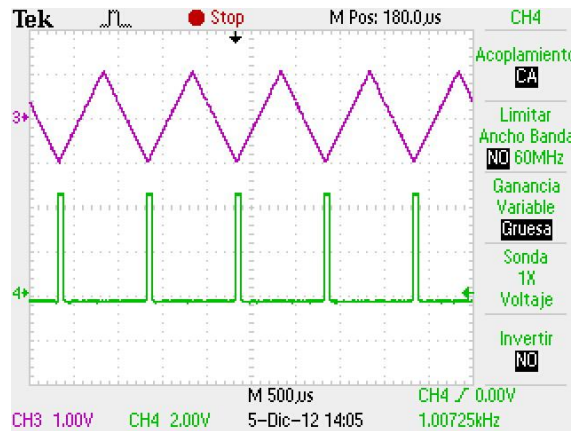
b)

Fig 3.11. Formas de ondas, a) Salida del Generador de Pulsos(Reloj),
b) Combinaciones del Contador, 0011 (Forma de Salida binaria 1- 5V, 0- 0V)



a)

b)



c)

Fig. 3.12. Formas de Onda: Señales de Entrada (Morada) y Salida del Demultiplexor Digital (Verde) 3 Entradas 8 salidas: a) Senoidal, b) Cuadrada, c) Triangular

Características Eléctricas:

- Fuente de Alimentación Eléctrica de 5V;
- Forma de Onda Senoidal, Onda Triangular y Onda Cuadrada a 1 kHz a 1 Vpp;
- Señal de Salida con Lógica Negada, cuando es un nivel alto (señal morada), la salida es un nivel bajo (señal verde) y viceversa;
- Corrientes:
 - ✓ Entrada Demultiplexor: 15 mA;
 - ✓ Salida Demultiplexor: 20 mA.

Las ventajas de este circuito integrado son: a) bajo costo, b) permite cualquier señal de entrada; la desventaja principal no permite la misma forma de onda de la señal de entrada, se muestra en la Fig. 3.12 incisos a y c.

Una segunda opción fue un circuito integrado analógico, el cual permita tener la misma forma de onda a la entrada/salida del circuito integrado configurado como demultiplexor. El circuito integrado demultiplexor analógico de 4 entradas y 16 salidas analógicas. Éste permite tener la misma forma de onda de la entrada y la salida sigue siendo analógica. Las combinaciones de entrada/salida binarias al demultiplexor analógico se muestran en la Tabla 3.4. En la Fig. 3.15 se muestra el diagrama eléctrico con el cambio del circuito integrado. Cabe señalar que los demás subsistemas se muestran en la Fig. 3.15 son los mismos que se probaron para el anterior circuito integrado.

Tabla 3.4. Combinación binaria de entrada/salida del Circuito Demultiplexor Analógico

Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
0000	0	0100	4	1000	8	1100	12
0001	1	0101	5	1001	9	1101	13
0010	2	0110	6	1010	10	1110	14
0011	3	0111	7	1011	11	1111	15

Diseño del Contador Binario Ascendente Cíclico 0000-1111

Se realizó mediante un diagrama de tiempos, en la Fig. 3.13 se muestra la secuencia de pasos del contador binario ascendente cíclico 0000-1111.

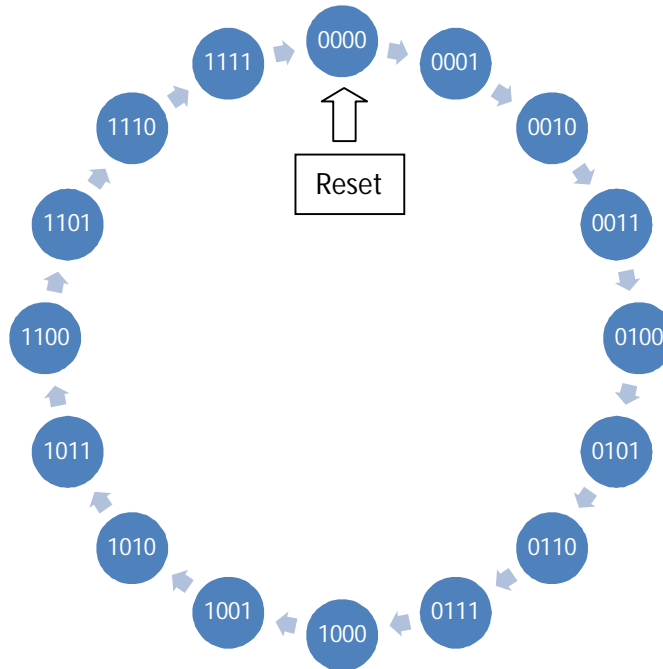


Fig. 3.13. Diagrama de Tiempos del Contador Binario Ascendente Cíclico

Edo P	Edo S	FFJK	FFJK	FFJK	FFJK	Edo P	Edo S	FFJK	FFJK	FFJK	FFJK
ABCD	ABCD	J3K3	J2K2	J1K1	J0K0	ABCD	ABCD	J3K3	J2K2	J1K1	J0K0
0000	0001	0*	0*	0*	1*	1000	1001	*0	0*	0*	1*
0001	0010	0*	0*	1*	*1	1001	1010	*0	0*	1*	*1
0010	0011	0*	0*	*0	1*	1010	1011	*0	0*	*0	1*
0011	0100	0*	1*	*1	*1	1011	1100	*0	1*	*1	*1
0100	0101	0*	*0	0*	1*	1100	1101	*0	*0	0*	1*
0101	0110	0*	*0	1*	*1	1101	1110	*0	*0	1*	*1
0110	0111	0*	*0	*0	1*	1110	1111	*0	*0	*0	1*
0111	1000	1*	*1	*1	*1	1111	0000	*1	*1	*1	*1

Tabla 3.5. Asignación de la tabla de verdad a cada estado del contador binario ascendente cíclico 0000-1111

En la Tabla 3.5 se observa cada uno de los estados que forman parte del diseño del contador binario ascendente cíclico 0000-1111, la obtención de cada una de las entradas a los Flip-Flop JK se obtienen a través de la reducción de mapas de Karnaugh Fig. 3.14.

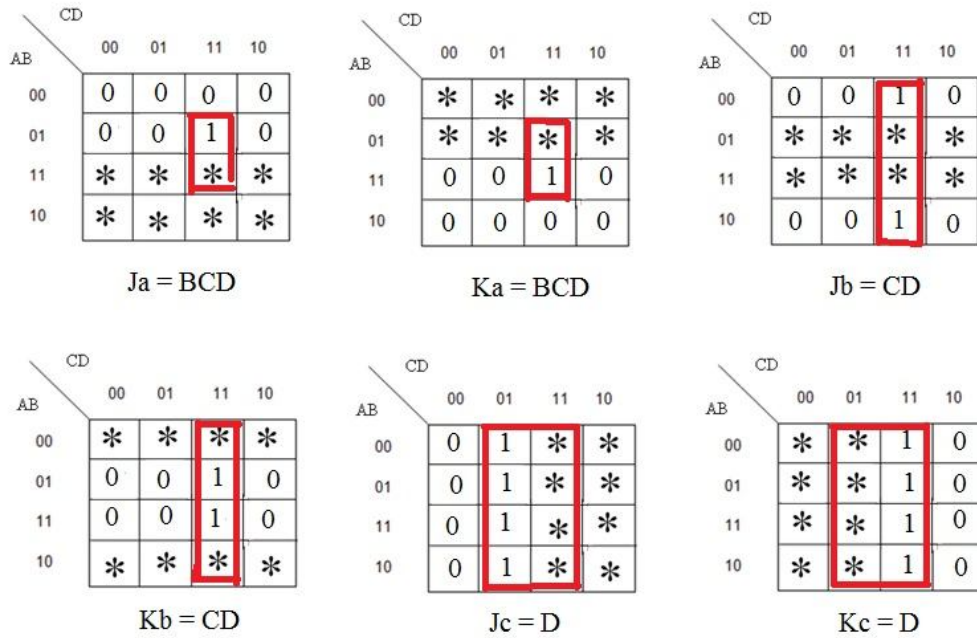


Fig. 3.14. Reducción de las variables de entrada de los Flip-Flop JK mediante mapas de Karnaugh

En las Figuras 3.16 y 3.17 se muestra cada una de las formas de onda analógica de la implementación del diagrama general de la Fig. 3.15.

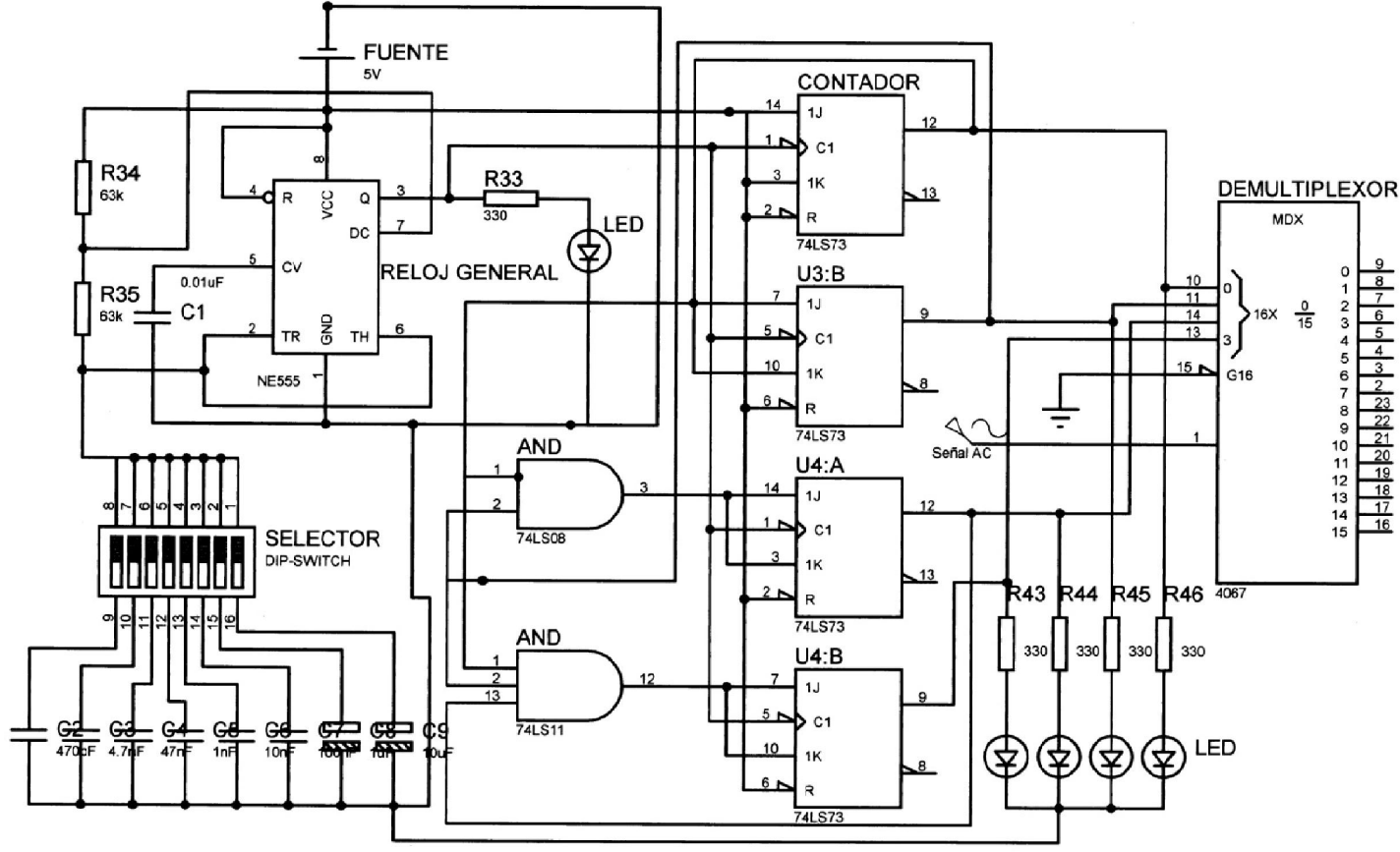


Fig. 3.15. Diagrama Eléctrico: Reloj, Contador y Demultiplexor 4 entradas 16 salidas [2]

Resultados obtenidos con el circuito integrado demultiplexor analogico

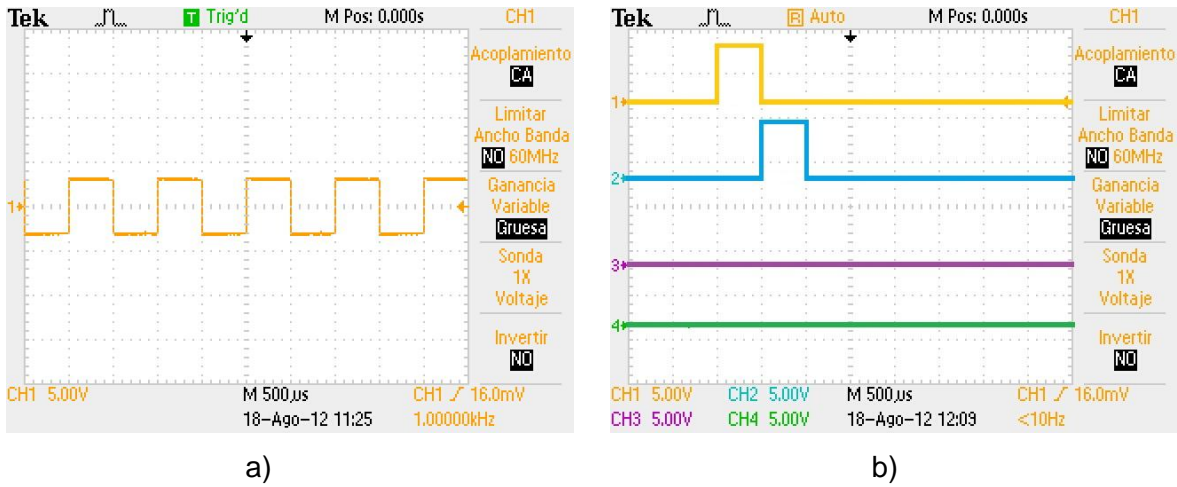


Fig. 3.16. Formas de ondas, a) Salida del Generador de Pulsos(Reloj), b) Combinaciones del Contador, 0011 (Salida 3 del Demultiplexor, Forma de Salida binaria 1- 5V, 0- 0V)

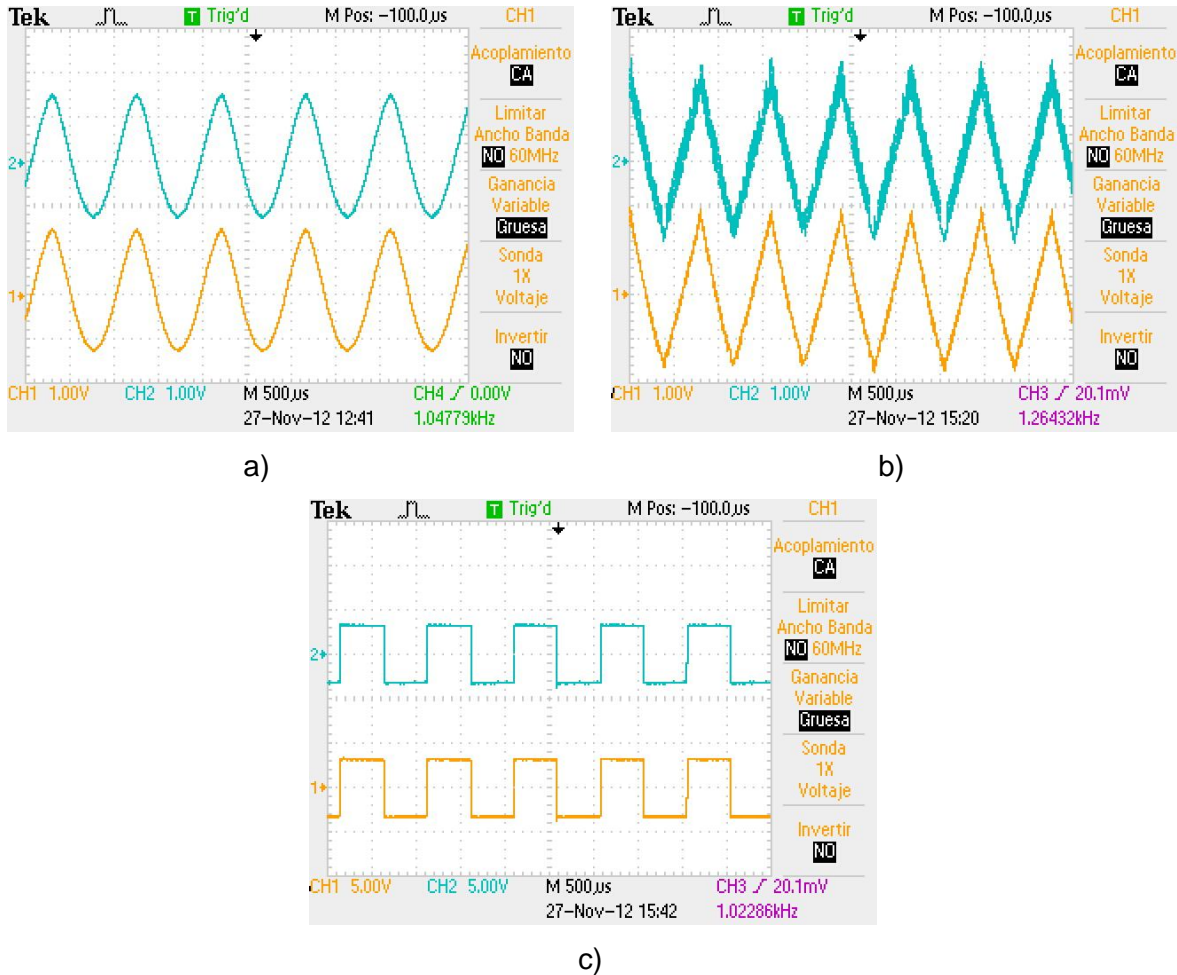


Fig. 3.17. Formas de Onda: Señales de Entrada (Azul) y Salida del Demultiplexor Analógico (Amarilla) 4 Entradas 16 salidas: a) Senoidal, b) Triangular, c) Cuadrada

Características Eléctricas:

- Fuente de Alimentación Eléctrica de 5 V;
- Señal de Entrada Senoidal, Triangular, Cuadrada a 1 kHz;
- Señal de Salida Senoidal, Triangular, Cuadrada a 1 kHz;
- Corrientes:
 - ✓ Entrada Demultiplexor: 15 mA;
 - ✓ Salida Demultiplexor: 25 mA.

3.3.3. Etapa Amplificadora

Para esta etapa amplificadora se probaron diferentes configuraciones de polarización. La mejor opción es la configuración de polarización del modo de polarización fija Fig. 3.18. Permite generar una señal DC para encender el LED y una corriente adecuada para la excitación de las fuentes de luz, los LED [3]-[4].

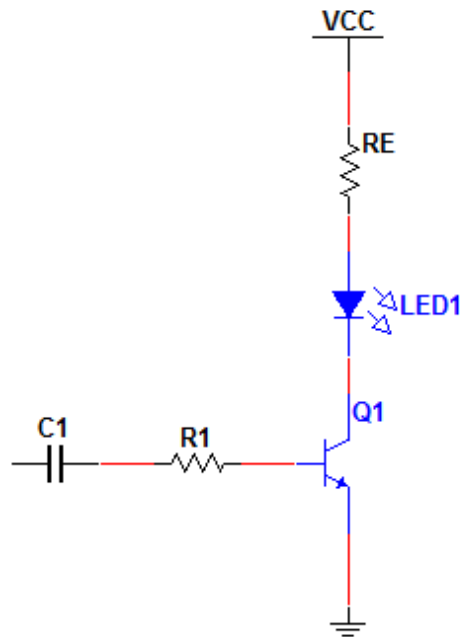
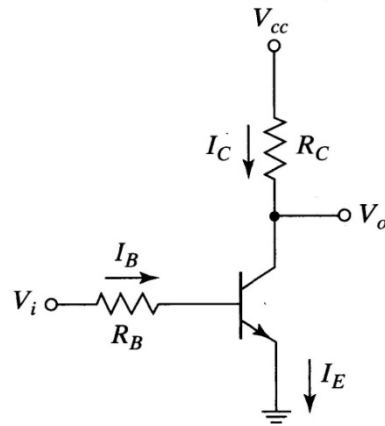
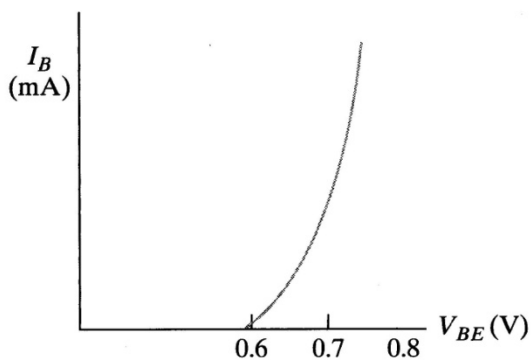


Fig. 3.18. Diagrama Eléctrico del Amplificador: Polarización Fija [3]-[4]

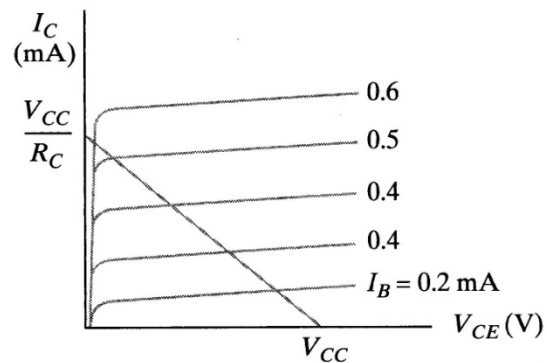
Los datos básicos que se necesitan para realizar circuitos digitales se obtienen de las curvas de características típicas de un transistor de silicio NPN de emisor común, las cuales se muestran en la Fig. 3.19. El circuito es un simple inversor con dos resistores y un transistor NPN. La corriente marcada I_C fluye a través del resistor R_C y el colector del transistor.



a) Circuito inversor



b) Característica de la base del transistor



c) Característica del colector del transistor

Fig. 3.19. Características del Transistor NPN de silicio [3]-[4]

La corriente I_B fluye a través del resistor R_B y la base del transistor. El emisor está conectado a tierra y su corriente es $I_E = I_C + I_B$. El voltaje de alimentación está entre V_{CC} y tierra. La entrada está entre V_i y tierra, y la salida entre V_o y tierra. Se supone una dirección positiva para las corrientes, como se indica. Éstas son las direcciones en que fluyen normalmente las corrientes en un transistor NPN. Las corrientes de colector y de base I_C e I_B , respectivamente, son positivas cuando entran en el transistor.

La corriente de emisor, I_E , es positiva cuando sale del transistor, como indica la flecha en la terminal del emisor. El símbolo V_{CE} representa la caída de potencial del colector al emisor y siempre es positiva. Asimismo, V_{BE} es la caída de potencial en una unión base-emisor. Esta unión tiene polarización directa cuando V_{BE} es positiva, y la polarización inversa cuando V_{BE} es negativa.

La característica gráfica base-emisor se muestra en la Fig. 3.19b se trata de una gráfica de V_{BE} contra I_B . Si el voltaje base-emisor es menor a 0.6 V se dice que el transistor está en corte y no fluye corriente de base. Cuando la unión base-emisor tiene polarización directa con un voltaje de más de 0.6 V, el transistor conduce e I_B comienza a subir con gran rapidez, mientras que V_{BE} casi no cambia.

El voltaje V_{BE} por un transistor conductor raras veces excede de 0.8 V. Las características gráficas de colector-emisor, junto con la línea de carga, se muestran en la Fig. 3.19c. Cuando V_{BE} es menor de 0.6 V, el transistor queda en corte con $I_B = 0$, y la corriente que fluye en el colector es insignificante [3]-[4].

Entonces, el circuito colector-emisor se comporta como un circuito abierto. En la región activa, el voltaje del colector, V_{CE} , puede tener cualquier valor entre 0.8 V y V_{CC} . Se calcula que la corriente de colector I_C en esta región es igual a $h_{FE}I_B$, donde h_{FE} es un parámetro del transistor llamado ganancia de corriente. La corriente máxima del colector no depende de I_B , sino del circuito externo conectado al colector. Ello se debe a que V_{CE} siempre es positivo y su valor más bajo posible es 0 V. El consumo de potencia del equipo transmisor óptico es 1.147 W. En la Tabla 3.6 se muestran los consumos de voltaje y corriente de cada subsistema. En la Fig. 3.20 se muestra el diagrama eléctrico del equipo transmisor óptico. En las Figuras 3.24. y 3.25 se muestra el equipo transmisor óptico implementado.

Tabla 3.6. Características Eléctricas del Equipo Transmisor Óptico

Bloque	Voltaje	Corriente	Potencia
Generador de Funciones	Positiva: 11.50V	11.30 mA	0.13 W
	Negativa: 4.40V	11.27 mA	0.05 W
Generador de Pulsos, Contador, Demultiplexor	5 V	125 mA	0.625 W
Amplificadores (1-8)	19V	9 mA	0.171 W
Amplificadores (9-16)	19V	9 mA	0.171 W

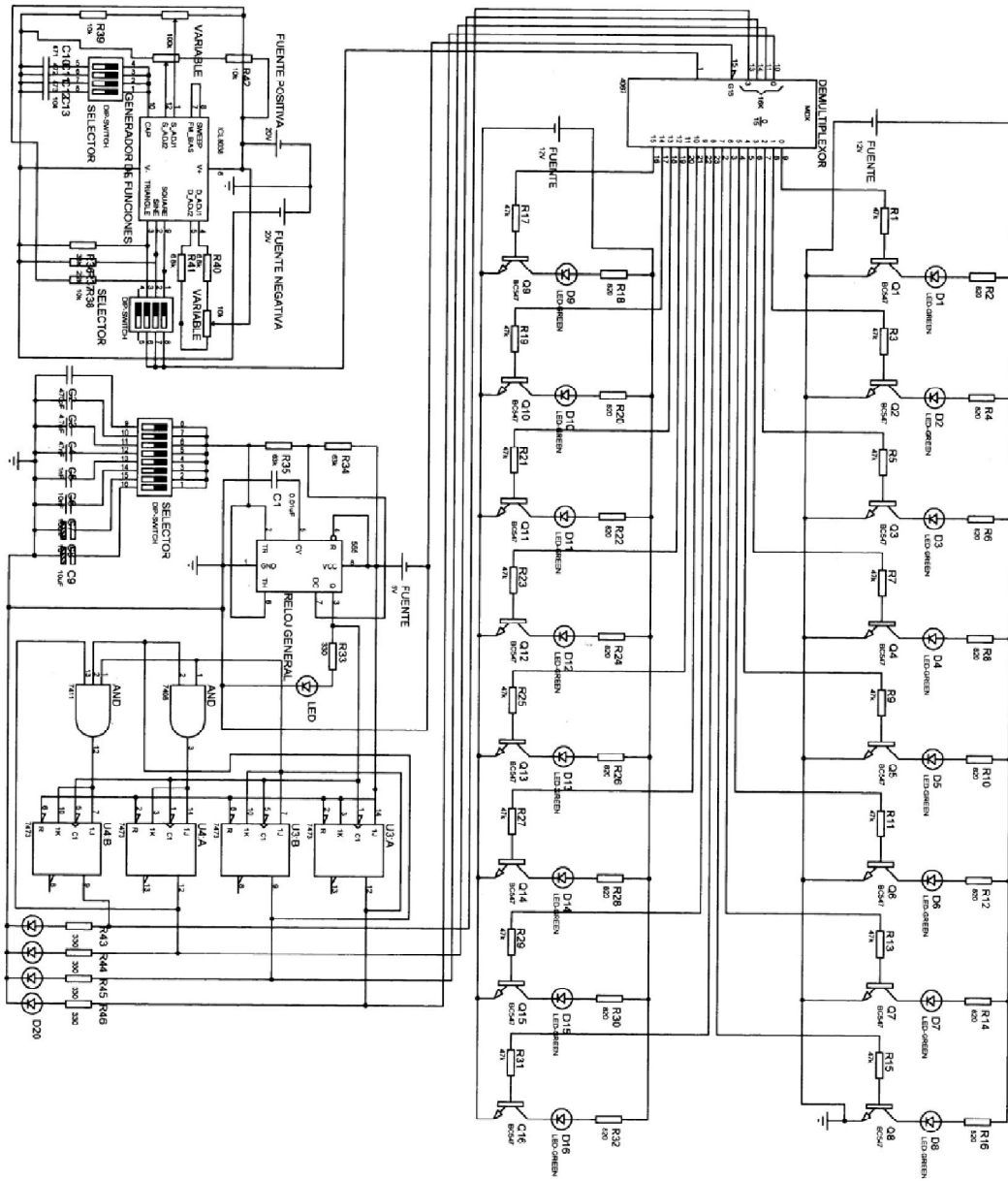


Fig. 3.20. Diagrama Eléctrico General del Transmisor Optoelectrónico [2-4]

3.3.4. Fuentes de Alimentación Eléctrica

Con el propósito de mantener un desempeño óptimo del Sistema, se implementó varias fuentes de alimentación eléctrica. El Equipo Transmisor Óptico, requiere de 5 fuentes de alimentación eléctrica:

- ✓ 2 Fuentes de alimentación eléctrica para el Generador de Funciones Variables: Positiva y Negativa de 1.2V a 22V [5];
- ✓ 1 Fuente de alimentación eléctrica para el contador, demultiplexor y reloj general de 5V[5];
- ✓ 2 Fuentes de alimentación eléctrica de 12V para los 16 amplificadores; una fuente para cada 8 amplificadores [5].

3.3.5. Fuentes de Luz, LEDs

Para éste equipo transmisor óptico se utilizaron diferentes tipos de LEDs (Tabla 3.7), las primeras pruebas experimentales se realizaron con LEDs de 5mm de diámetro, de luz visible, de color: rojo, azul, verde y amarillo y después se contemplaron LEDs de 3mm de diámetro, de luz visible, de color: rojo, azul, verde y amarillo.

Tabla 3.7. a) Tipos de LED y sus colores respectivos

LED 5mm rojo ultra brillante 10900 - 15200 mcd	LED 3mm Rojo NSPR310S
LED 5mm verde súper brillante 10000-12000 mcd	LED 3mm Amarillo NSPA310S
LED 5mm azul ultra brillante 8200-10600 mcd	LED 3mm Verde NSPG300D
LED 5mm amarillo ultra brillante 13500-20000mcd	LED 3mm Azul NSPB300B
	LED 3mm Verde NSPG310B
	LED 3mm Verde Azulado NSPE310S

Características Eléctricas de los LEDs de 5mm

b) Especificaciones de los LEDs de 5mm [6]

Especificaciones													
Tipo de LED: DIP 5mm					Temperatura de operación: - 40 a 70 °C								
Angulo de apertura: 15° a 30°					Corriente nominal: 20mA								
Encapsulado transparente y difuso													
Y	Colores disponibles	Longitud de onda [nm] / TC[K]	Voltaje de Operación [V]		Consumo [mW]	PP Intensidad Luminosa [mcd]							
			Min	Max		AD	AC	B		SB		UB	
						Min	Max	Min	Max	Min	Max		
	R	600-650	1.8	2.2	40	***	***	2200	6000	3100	10000	6300	15 200
	G	490-540	1.8	2.2	40	***	***	-	-	10600	13800	13800	22000
	B	450-500	3.0	3.4	40	-	***	-	-	3700	6000	4900	9000
	Y	550-600	1.8	2.2	40	***	***	2800	3700	4900	6300	6300	21300
	O	600-650	1.8	2.2	40	***	***	-	-	-	-	2800	6000
	W	5000 - 10000 K	3.0	3.4	40	-	***	10500	13800	18000	30000	20000	30000
	PK	430-440	1.8	2.2	40	-	***	-	-	-	-	-	-
	SP	380-420	3.0	3.4	40	-	***	-	-	-	-	-	-
	RG	600-650 490-540	1.8	3.4	42	-	***	-	-	-	-	-	-
	UV	400	3.0	4.5	60	-	***	-	-	-	-	-	-
	RGB	630-525-475	3.0	3.4	60	-	***	-	-	-	-	-	-
	LPK	430-440	3.0	3.4	40	-	***	-	-	-	-	-	-
	LG	490-540	3.0	3.4	40	-	***	-	-	-	-	-	-
	LB	450-500	3.0	3.4	60	-	***	-	-	-	-	-	-
	LW	-	3.0	3.4	40	-	***	-	-	-	-	-	-

Estos LEDs requieren, de una corriente aproximada entre 50 a 100mA dependiendo el color, esto debido a que como son LEDs de 5mm no son directivos (a diferencia de los LEDs de 3mm) requieren de un mayor flujo de corriente para una excitación mayor de las fuentes de luz y con esto los fotodetectores son capaces de percibir la luz emitida por los diferentes LEDs a través de la fibra óptica.

Experimento:

Al iniciar las pruebas, se implementó un diagrama eléctrico básico de alimentación de los LEDs y el fotodetector. Al poner estos dos elementos a una distancia de 10 a 15 cm siendo el medio el aire. En las Figuras 3.21 y 3.22 se muestra el diagrama eléctrico entre las fuentes de luz y el fotodetector.

Las características eléctricas son:

Tx: Generador de Funciones como fuente de alimentación del LED

Rx: Un fotodetector con una resistencia variable como carga en el receptor óptico.

Con esto, se llevó a cabo, el procedimiento similar, pero en este caso utilizando la fibra óptica multimodo a 200cm de longitud física. El problema que se tenía con las características eléctricas anteriores (Corriente entre 15-20mA) el fotodetector no percibía de manera correcta la forma de onda analógica transmitida. La solución que se infirió fue que los LEDs de 5mm requieren mayor corriente para su excitación y con esto el fotodetector percibía la forma de onda emitida por las fuentes de luz, los LEDs.

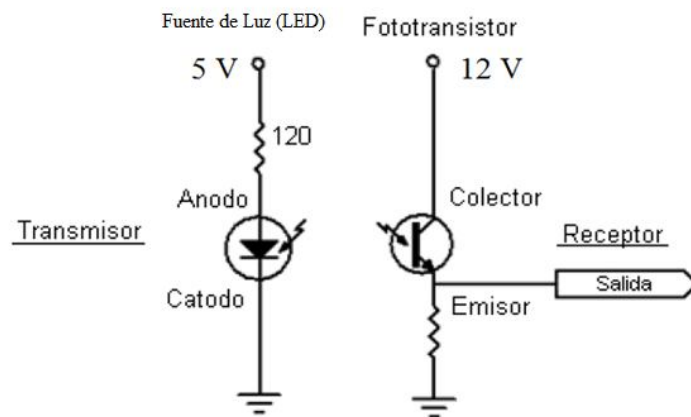


Fig. 3.21. Conexión entre la fuente de luz LED y el fototransistor [4]

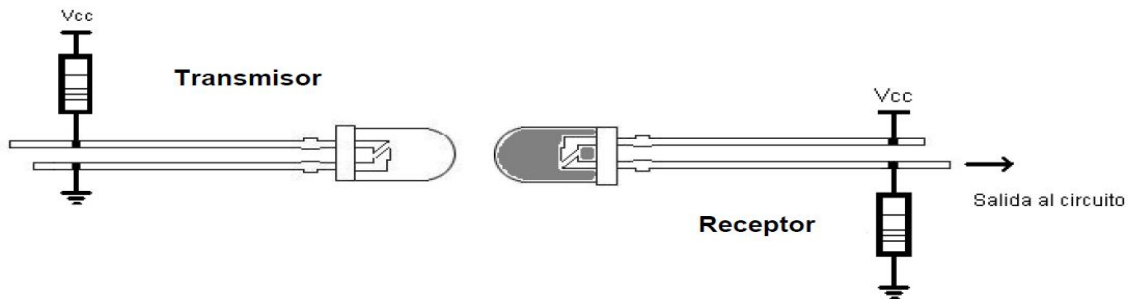
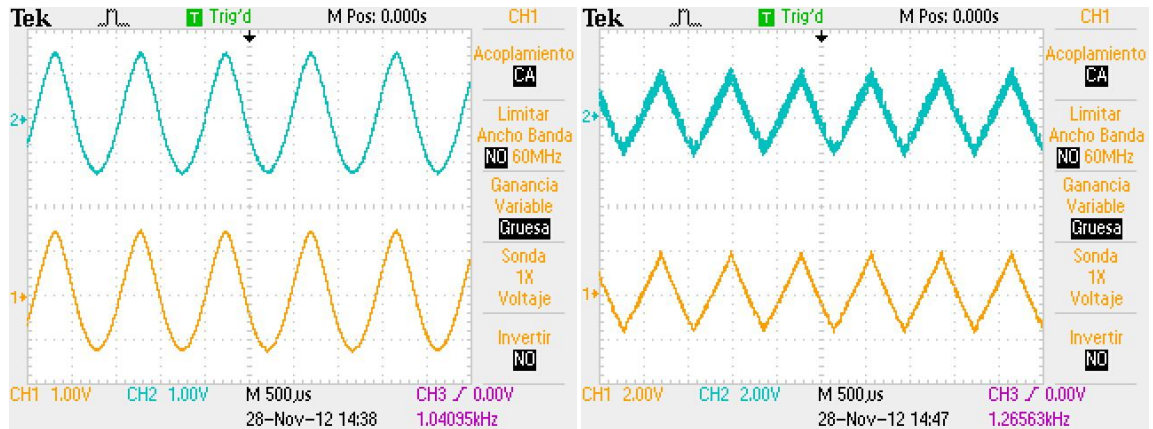


Fig. 3.22. Emparejamiento entre el LED y Fotodetector utilizado [4]

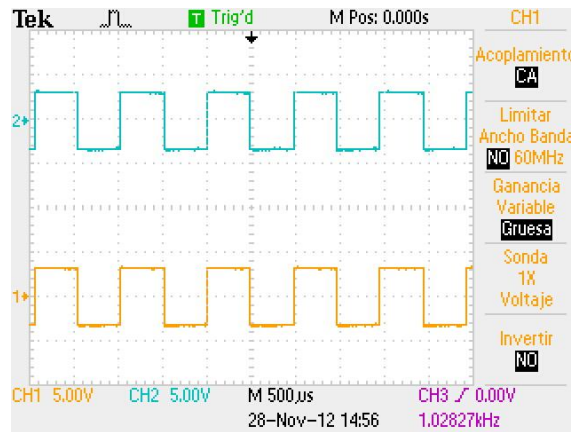
En la Fig. 3.23 se muestra las forma de onda analógica transmitida y recibida a través de la fuente de luz y el fotodetector respectivamente. En la Tabla 3.8 se muestra las características eléctricas técnicas obtenidas en los experimentos realizados.

Resultados:



a)

b)



c)

Fig. 3.23. Forma de onda de la señal de voltaje: (azul) y forma de onda de la señal de voltaje en el fototransistor: (amarilla): a) senoidal b) triangular c) cuadrada

Tabla 3.8. Características Técnicas obtenidas experimentalmente

Características	Experimento 1	Experimento 2
Medio	Aire	Fibra Óptica multimodo
Corriente	10-15 mA	30-35 mA y 50-100mA
Diámetro Fuente de luz	5mm	3mm y 5mm
Distancia entre Tx y Rx	10-15 cm	50cm, 100cm, 200cm, 500cm

Características Eléctricas de los LEDs de 3mm

Estos LEDs requieren una menor corriente comparados con los anteriores, tienen un haz más directivo y con esto el fotodetector es capaz de percibir la forma de onda emitida por las fuentes de luz, los LEDs. Al igual que los anteriores LEDs de 5mm, se probaron primero con la configuración descrita anteriormente y la diferencia que se notó: a la misma distancia 10-15cm en el fotodetector se observa una señal de AC con mayor amplitud con respecto a los anteriores LEDs de 5mm. Cuenta con una corriente entre 10-50mA dependiendo el color, un ángulo de apertura entre 15°-30°, y requieren de un voltaje de alimentación eléctrica entre 1.9 a 3.4V

3.3.6. Diseño Físico Estructural del Bloque Transmisor Óptico

Como se requiere que el transmisor óptico y receptor óptico sean portátiles, se buscaron diferentes tipos de gabinetes: forma, tamaño, tipo de material, costo, entre otros, de tal forma, para la primera etapa de su implementación del Sistema (bloque transmisor óptico y receptor óptico) y fuentes de alimentación eléctrica se utilizaron gabinetes de plástico.

Esto con la finalidad de proteger todos los circuitos eléctricos de los bloques transmisor óptico y receptor óptico, así como, de las fuentes de alimentación eléctrica y así poderlos transportar de un lugar a otro sin dañarlos. Cada fuente de alimentación eléctrica está dentro de un gabinete individual, esto para facilitar la experimentación sobre diferentes configuraciones del sistema.



Fig. 3.24. Equipo transmisor óptico de 16 canales (Fotografía)

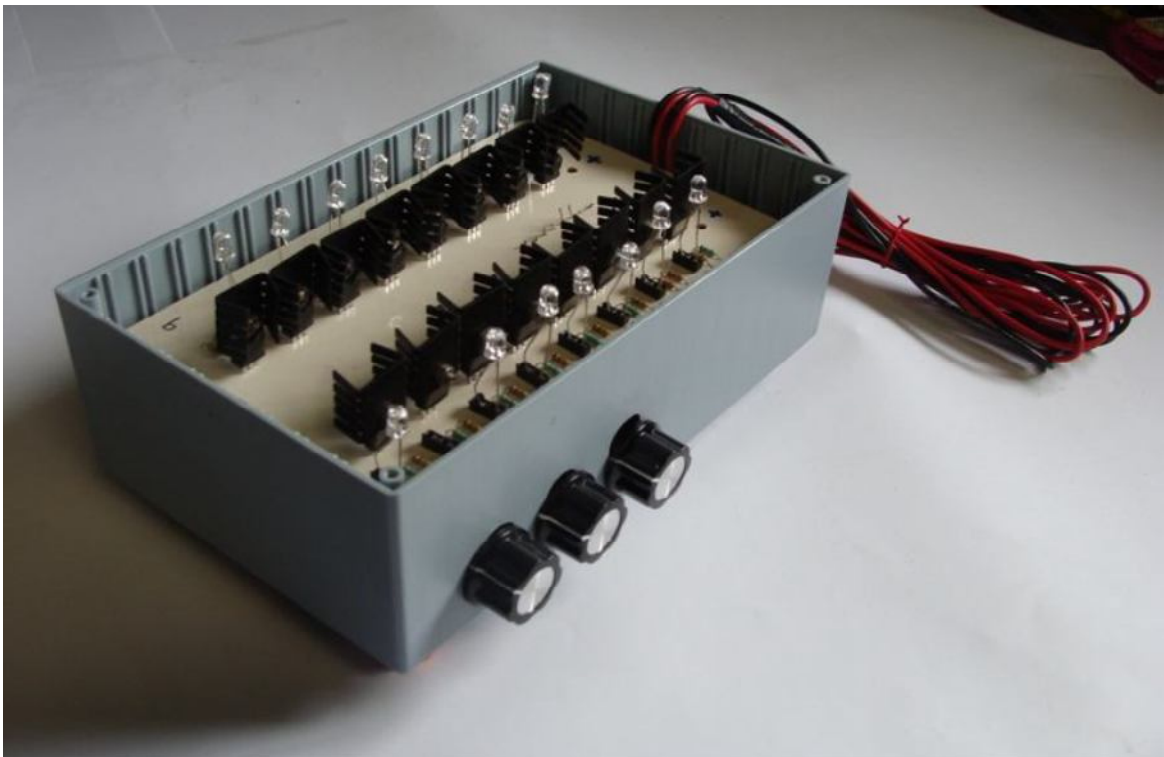


Fig. 3.25. Interior del equipo transmisor óptico (Fotografía)

3.4. CONCLUSIONES

1. El equipo transmisor óptico descrito en este capítulo tiene la capacidad de generar cualquiera de las tres formas de onda analógicas ópticas: onda senoidal, onda triangular y onda cuadrada. Las características de las tres formas de onda óptica son adecuadas para su utilización en el presente Sistema de interrogación de arreglos de fibras ópticas.
2. El equipo transmisor óptico funciona con fuentes de luz, son LEDs de dos diámetros: 3mm y 5mm, cada LED tiene una longitud de onda, el equipo transmisor óptico funciona con ocho longitudes de onda diferentes. Estas son: LED Rojo de 5 mm. $\lambda = 630\text{nm}$; LED Verde de 5mm. $\lambda = 525\text{nm}$; LED Azul de 5 mm. $\lambda = 475\text{nm}$; LED Amarillo de 5mm $\lambda = 590\text{nm}$; LED Rojo de 3mm. $\lambda = 635\text{nm}$; LED Verde de 3mm. $\lambda = 520\text{nm}$; LED Azul de 3mm. $\lambda = 465\text{nm}$; LED Amarillo de 3mm. $\lambda = 600\text{nm}$.
3. El equipo transmisor óptico funciona con diferentes tipos de fibras ópticas multimodo, se realizaron pruebas experimentales con dos tipos de fibras ópticas multimodo (modelo FG-365-LER marca Thorlabs, diámetro núcleo/revestimiento 365/400 μm , 0.22NA, 400-2200nm; modelo FG-200-LCR marca Thorlabs, diámetro núcleo/revestimiento 200/200 μm , 0.22NA, 180-1150nm) para verificar el correcto funcionamiento del propio Sistema, a diferentes distancias físicas como son 50cm, 100cm, 200cm y 500cm.
4. El equipo transmisor óptico proporciona 8 diferentes frecuencias de la forma de onda analógica: 330 Hz, 470 Hz, 490 Hz, 500 Hz, 930 Hz, 950 Hz, 1.1kHz, 7 kHz,
5. El equipo transmisor óptico trabaja en un intervalo de frecuencia de oscilación del barrido de los LEDs desde 1 Hz hasta 240 Hz.
6. El equipo transmisor óptico es portátil, de bajo peso y tiene sus propias fuentes de alimentación eléctrica.
7. Éste equipo transmisor óptico fue implementado y su funcionamiento probado y evaluado en conjunto con el equipo receptor óptico descrito en el siguiente capítulo, en condiciones de nuestro laboratorio.

3.5. REFERENCIAS

- [1] Intersil, "Hoja de Especificaciones del Circuito Integrado ICL8038," 1-13pp., 2001.
- [2] Morris, Mano, M. "Diseño Digital," 3a Ed. México, Pearson Prentice Hall, 217-254pp, 437-481pp., 2003.
- [3] Malvino, A, y J. Bates, D, "Principios de Electrónica," 7ª Ed., España, Mc Graw Hill, 324-399pp., 2007.
- [4] Boylestad, Robert L. y Nashelsky, Louis, "Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos," 10ª Ed., México, Pearson Prentice Hall, 435-465pp., 2009.
- [5] National Semiconductor, "Hoja de Especificación del Circuito Integrado LM317 y LM337," 1-28pp., 2011.

CAPÍTULO 4

RECEPTOR ÓPTICO

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen las exigencias técnicas requeridas para el equipo receptor óptico, y se analizan diferentes opciones de diagramas eléctricos para la elaboración de los diferentes subsistemas que conforman al equipo receptor óptico. Se seleccionan las variantes óptimas para la presente aplicación: monitoreo de arreglos de fibras ópticas embebidas en elementos de concreto y materiales compuestos de polímeros. Se presentan los resultados de implementación y pruebas experimentales.

Una singularidad del presente equipo receptor óptico consiste en que cada LED tiene una intensidad diferente de emisión bajo la misma corriente de excitación. Estas singularidades fueron tomadas en cuenta en el desarrollo e implementación del presente equipo receptor óptico. Más específicamente, la corriente de excitación varía su amplitud dependiendo el tipo de LED. Además, la intensidad de la forma de onda analógica varía en función del tipo de fibra óptica usada.

Se tiene contemplado utilizar fotodetectores de la banda de luz visible. El voltaje de la forma de onda recibida será amplificada utilizando un circuito amplificador eléctrico. Ésta será enviada a una etapa de multicanalización (multiplexor) en donde llegarán todas las formas de onda analógica para su monitoreo, análisis e interpretación de los datos obtenidos. Se realizaron diferentes pruebas experimentales usando distintos fotodetectores (fototransistor) y se eligió la variante óptima para la presente aplicación.

4.2. ELABORACIÓN DE EXIGENCIAS TÉCNICAS PARA EL EQUIPO RECEPTOR ÓPTICO

El equipo receptor óptico debe de ser capaz de percibir las diferentes intensidades de luz de las diferentes formas de onda analógica transmitidas por las fuentes de luz - los LEDs, del equipo transmisor óptico. Ésta etapa será implementada con un fotodetector que percibe la intensidad de los diferentes LEDs. Las diferentes intensidades de voltaje de las formas de onda analógica serán enviadas a una etapa de amplificación de una moderada ganancia, esto para no sobrepasar los límites de voltaje de entrada permitidos del subsistema siguiente.

Las salidas de la etapa amplificadora se introducen a una etapa de multiplexación donde se tiene el mismo número de canales que el equipo transmisor óptico. La forma de onda analógica a analizar se visualiza en la terminal 1 del circuito integrado configurado del modo multiplexor. Los resultados obtenidos a través del equipo de adquisición de datos serán analizados para su interpretación.

4.2.1. Fotodetector

Es el bloque más importante del equipo receptor óptico. Responsable de percibir las diferentes intensidades de voltaje de las diferentes formas de onda analógica que se propagan a través de las diferentes fibras ópticas utilizadas.

Se analizarán diferentes fotodetectores (fototransistor, fotodiodo ó fotorresistencia) y se elegirá el más adecuado para la presente aplicación; estos fotodetectores deben de trabajar en el rango de luz visible.

4.2.2. Etapa Amplificadora

Esta etapa amplificadora tiene que cumplir con lo siguiente: A. Realizar la amplificación del voltaje de la forma de onda analógica recibida, de tal forma, que no exista alguna distorsión o saturación de la forma, y B. Proporcionar una corriente de 10-20 mA, de tal forma, de no dañar el siguiente subsistema del equipo receptor óptico.

4.2.3. Etapa de Multicanalización (Multiplexor)

La etapa de multicanalización convierte la secuencia paralela de la forma de onda analógica de entrada a una secuencia serial de salida, esta secuencia serial será habilitada en diferentes canales (paralelo) de entrada. Estos canales analógicos del multiplexor trabajan de la forma TDM y son determinados por un circuito eléctrico adicional (contador binario ascendente cíclico) que habilita cada uno de los diferentes canales analógicos. Se cuenta con n canales de multicanalización, donde n es múltiplo de 16, cada canal cuenta con una codificación binaria la cual permite habilitar cada uno de los diferentes canales.

Los voltajes de las diferentes formas de onda analógica serán visualizados en la terminal 1 del circuito integrado configurado del modo multiplexor; estos voltajes serán los resultados a analizar y se obtendrán a partir del equipo de adquisición de datos sofisticado.

4.2.4. Fuentes de Alimentación Eléctrica

La fuente de alimentación eléctrica deberá de proporcionar el voltaje y la corriente necesaria para cada uno de los subsistemas del equipo transmisor óptico. Se requieren fuentes de alimentación eléctrica con salidas nominales de 5V, 12V y 19V y corrientes alrededor de 500mA -1 A.

4.2.5. Acoplador Fotodetector-Fibra Óptica

Estos acopladores tienen la función principal de mantener unidos y alineados a dos elementos: el otro extremo de la fibra óptica y el fotodetector por parte del equipo receptor óptico.

4.2.6. Diseño Físico Estructural del Bloque Receptor Óptico

La función principal de la estructura es la protección de todos los circuitos eléctricos de los equipos. Se prevé que en el marco del presente trabajo el gabinete consista de material plástico y en un futuro se tiene contemplado gabinetes herméticos de metal.

Para el Sistema completo, se contemplan dos gabinetes, uno para cada equipo: transmisor óptico y receptor óptico de material plástico, con dimensiones de 223x140x92 mm, largo, altura, ancho respectivamente. Se prevé que para una siguiente etapa de desarrollo del Sistema sólo sea un gabinete más amplio para introducir ambos equipos.

4.3. RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES DE SUBSISTEMAS DEL EQUIPO RECEPTOR ÓPTICO

El equipo receptor óptico debe ser independiente de los demás módulos. Se procedió a diseñar todos los subsistemas que conforman el equipo receptor óptico. Se comenzará por algunas pruebas con los diferentes fototransistores obtenidos.

4.3.1. Fotodetector #1: Fototransistor NPN

El fototransistor tiene un diámetro de 5mm y requiere de una fuente de alimentación eléctrica de 12V. La salida del fototransistor es tomada entre el emisor y la resistencia de carga y el colector va directo a la fuente de alimentación eléctrica (Fig. 3.21).

La sensibilidad del fototransistor depende del resistor de carga, a cortas distancias el resistor de carga es menor ya que la intensidad que percibe el fototransistor es demasiada grande y entre más lejos la separación entre ambos el resistor es mayor. Con esto, se llevó a cabo, el procedimiento similar, pero en este caso utilizando la fibra óptica multimodo a 200cm [1].

Se utilizaron 3 tipos de fibras ópticas multimodo: dos de dióxido de silicio y una de plástico. Las pruebas experimentales se realizaron a longitudes físicas de 50cm, 100cm, 200cm y 500cm para el caso de las fibras ópticas multimodo y para la fibra óptica de plástico longitudes físicas de 20cm, 30cm y 45cm.

A continuación se describen y se muestran las diferentes formas de onda analógica percibidas por los fotodetectores, los inconvenientes que se tuvieron y cuáles fueron las soluciones implementadas para que se tuviera la misma forma de la onda analógica transmitida.

Experimento:

En la Fig. 4.1 se muestra las diferentes formas de onda analógica percibidas por el Fotodetector seleccionado. Las características eléctricas implementadas son: Medio: Aire; Distancia: 10-15cm; Fuente: LED de 5mm con el generador de funciones del laboratorio como alimentador del LED; Fotodetector: Fototransistor NPN, Señal AC 2Vpp, Señal DC, 3V.

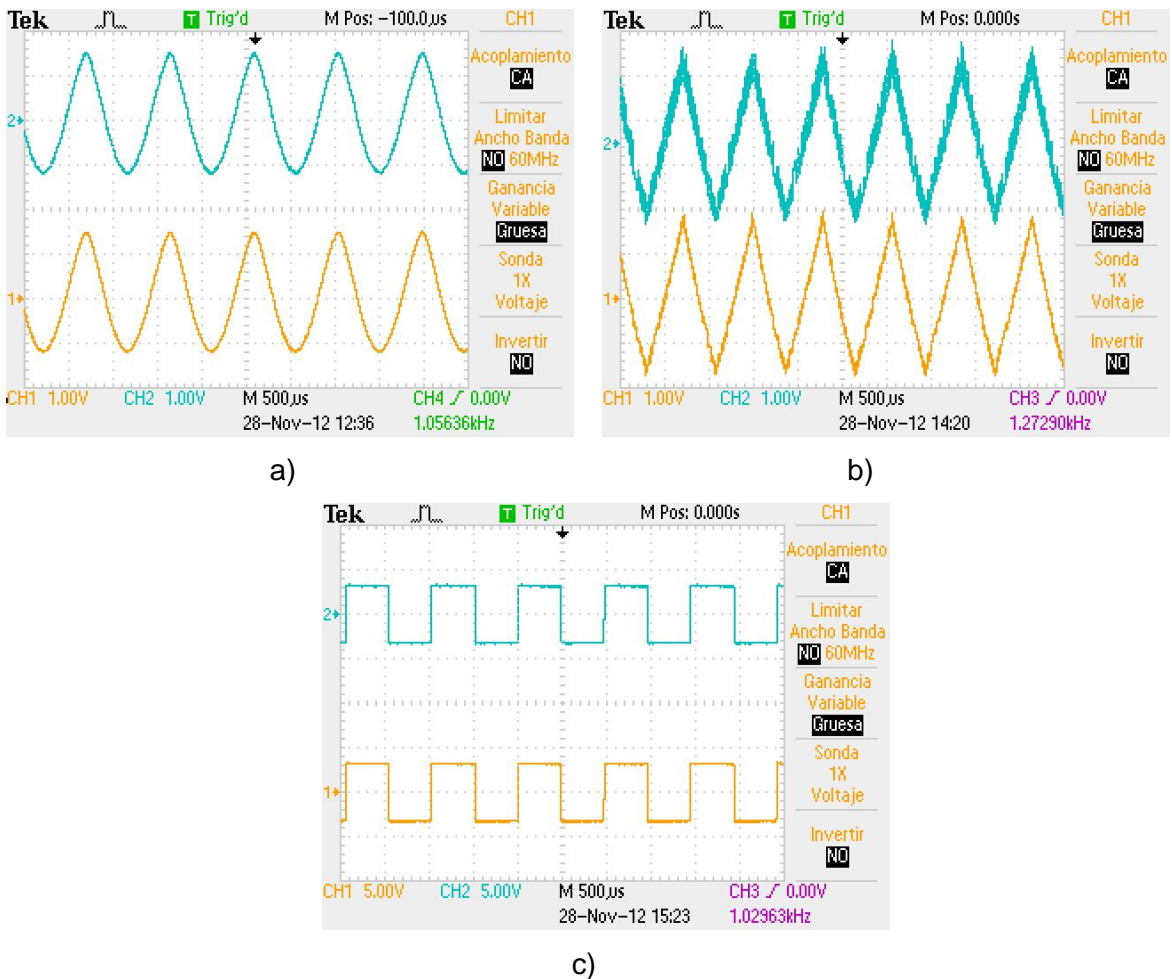


Fig. 4.1. Formas de onda del voltaje de la señal Transmitidas (Azul) y Recibidas por el fototransistor (Amarillo): a) LED Rojo, b) LED Azul, c) LED Amarillo

Con esto, se llevó a cabo, el procedimiento similar, utilizando una de dos fibras ópticas multimodo de longitud física de 200cm con el equipo transmisor óptico diseñado.

Experimento:

En la Fig. 4.2 se muestra las diferentes formas de onda analógicas percibidas por el Fotodetector (Fototransistor NPN). Las características eléctricas implementadas son: Medio de transmisión: Fibra Óptica multimodo; Longitud: 200cm; Fuente: LED de 5mm con el equipo transmisor óptico diseñado como fuente alimentador del LED; Fotodetector: Fototransistor NPN, Señal AC 3.5Vpp a 5Vpp.

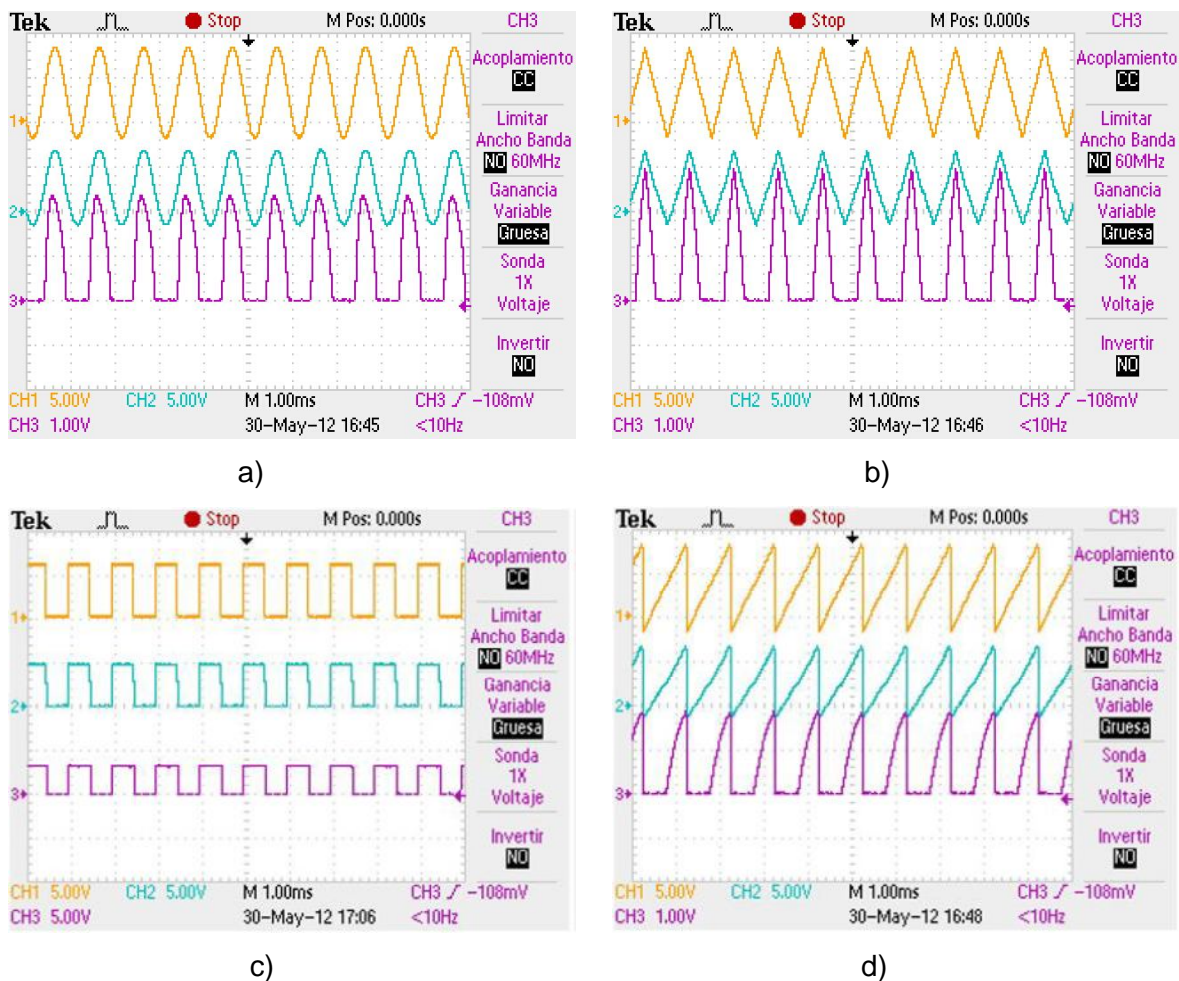


Fig. 4.2. Formas de onda: Entrada al Demultiplexor (Amarilla), Salida del Demultiplexor-Entrada a la base del Amplificador (Azul), Señal Recibida en el Receptor (Morada):

a) LED Amarillo, b) LED Verde, c) LED Rojo, d) LED Azul

La forma de onda analógica percibida por el Fototransistor se muestra en la Fig. 4.2. Sólo se percibe una amplitud de media onda, a diferencia del caso anterior, esto se debe a que en el primer caso se tiene una señal de directa DC alrededor de 3V, pero en este caso la señal de directa es menor que no es capaz de encender el LED.

Por esta razón se envía una forma de onda analógica con mayor amplitud entre 3.5Vpp a 5Vpp y con esto se logra encenderlo, el problema está en que el voltaje de la forma de onda analógica esta encendiendo el LED. Debido a éstos resultados se utilizó otra alternativa. La variante utilizada fue aumentar la carga del fotodetector y disminuir la intensidad del LED con esto se logró mejorar la forma de onda analógica AC senoidal, no así con la forma de onda analógica AC triangular (Fig. 4.4).

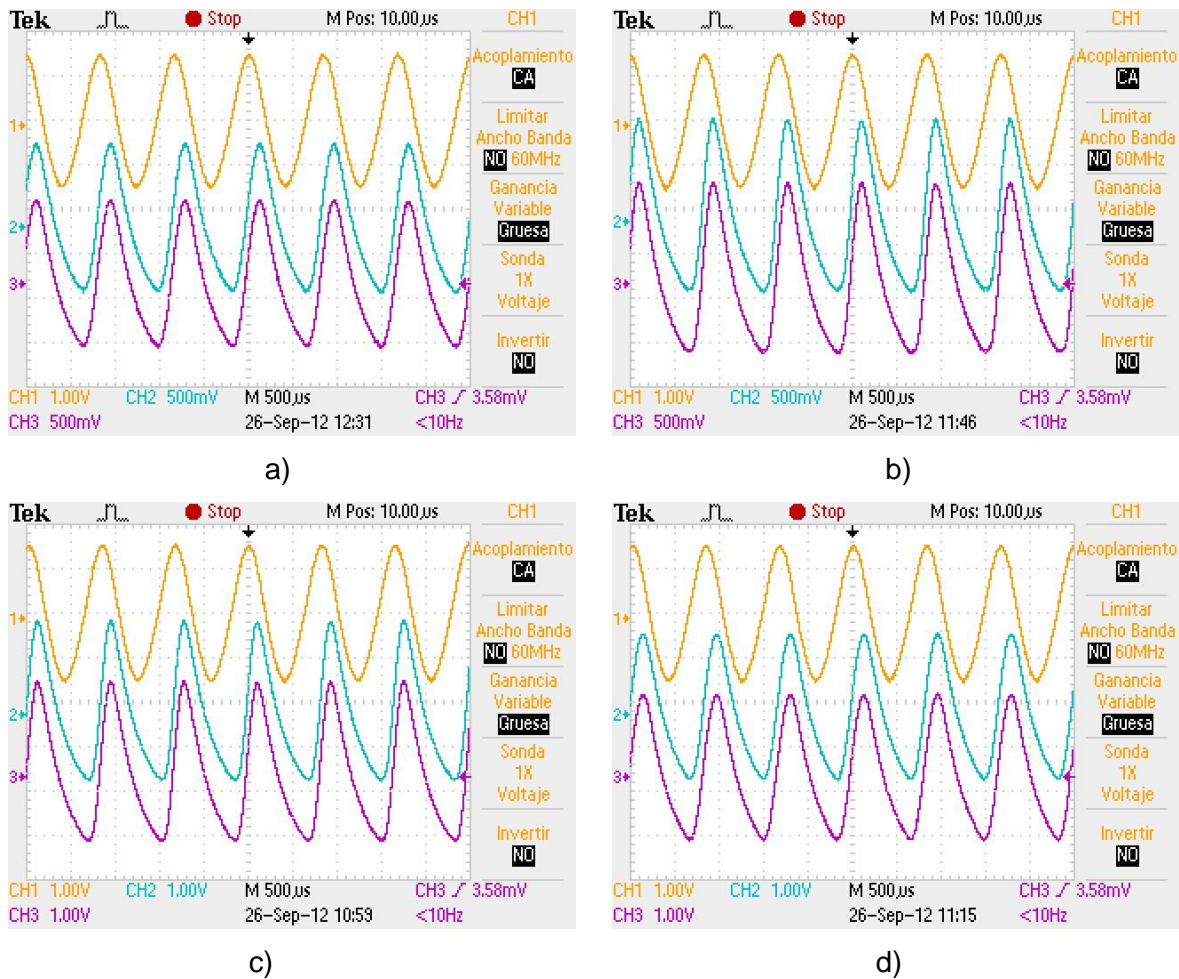


Fig. 4.3. Formas de Onda: Entrada al Demultiplexor (Amarilla), Señal Recibida en el Fotodetector (Azul), Señal Recibida en el Multiplexor (Morada): a) LED Amarillo, b) LED Verde, c) LED Rojo, d) LED Azul

Como se muestra en la Fig. 4.3 a y b tienen una menor amplitud respecto a los incisos c y d. Esto se debe al tipo de LED; tienen diferentes características eléctricas (descritas en el capítulo 3), como se muestra los LEDs rojo y azul proporcionan una mayor amplitud con respecto a los LEDs amarillo y verde; y sucede lo mismo con la forma de onda triangular que sólo se percibe la amplitud de media onda.

En las Figuras 4.4 y 4.5 se muestra las diferentes amplitudes de las formas de onda analógica triangular y cuadrada respectivamente, con el Fototransistor.

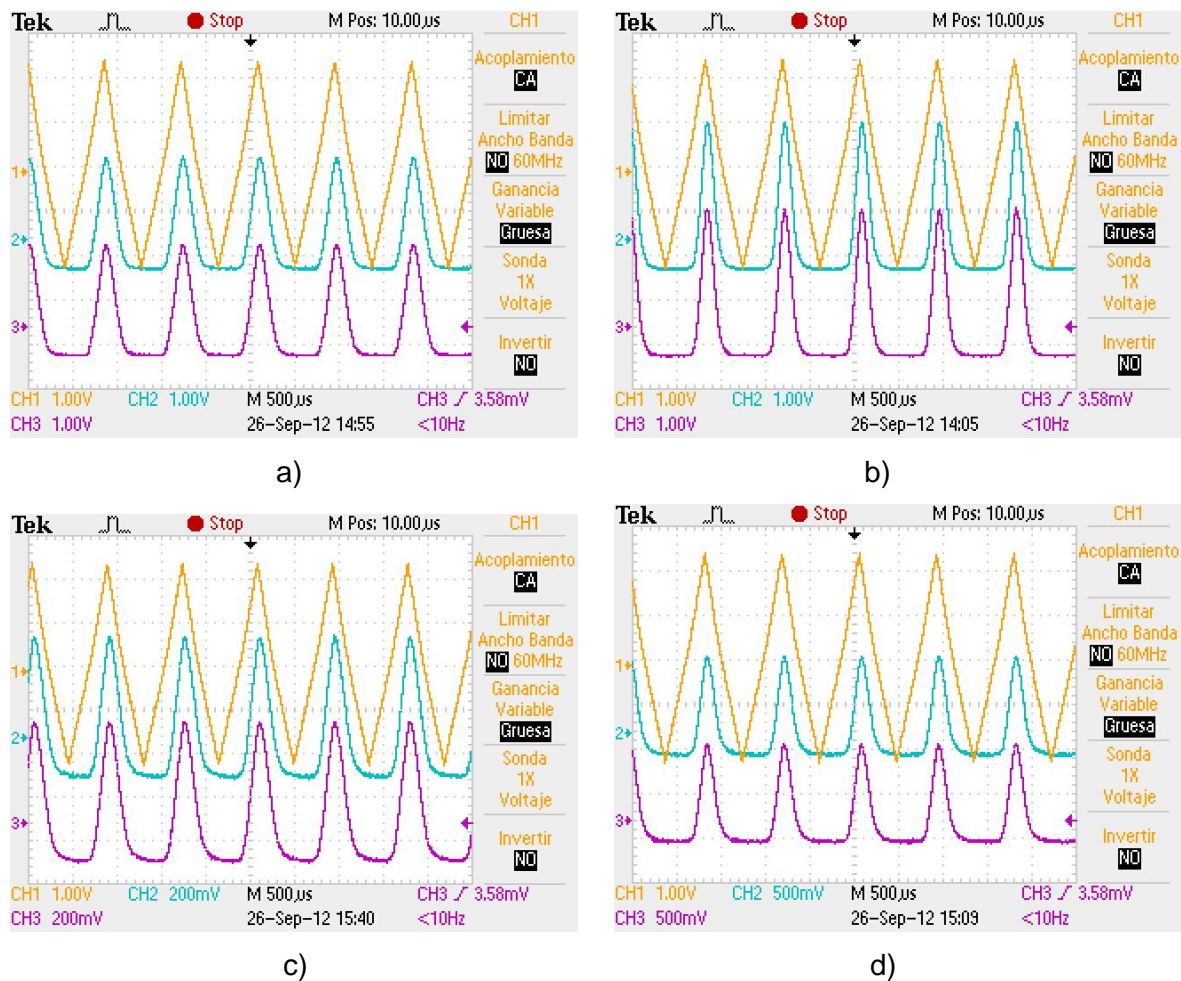


Fig. 4.4. Formas de Onda: Entrada al Demultiplexor (Amarilla), Señal Recibida en el Fotodetector (Azul), Señal Recibida en el Multiplexor (Morada): a) LED Rojo, b) LED Azul, c) LED Amarillo, d) LED Verde

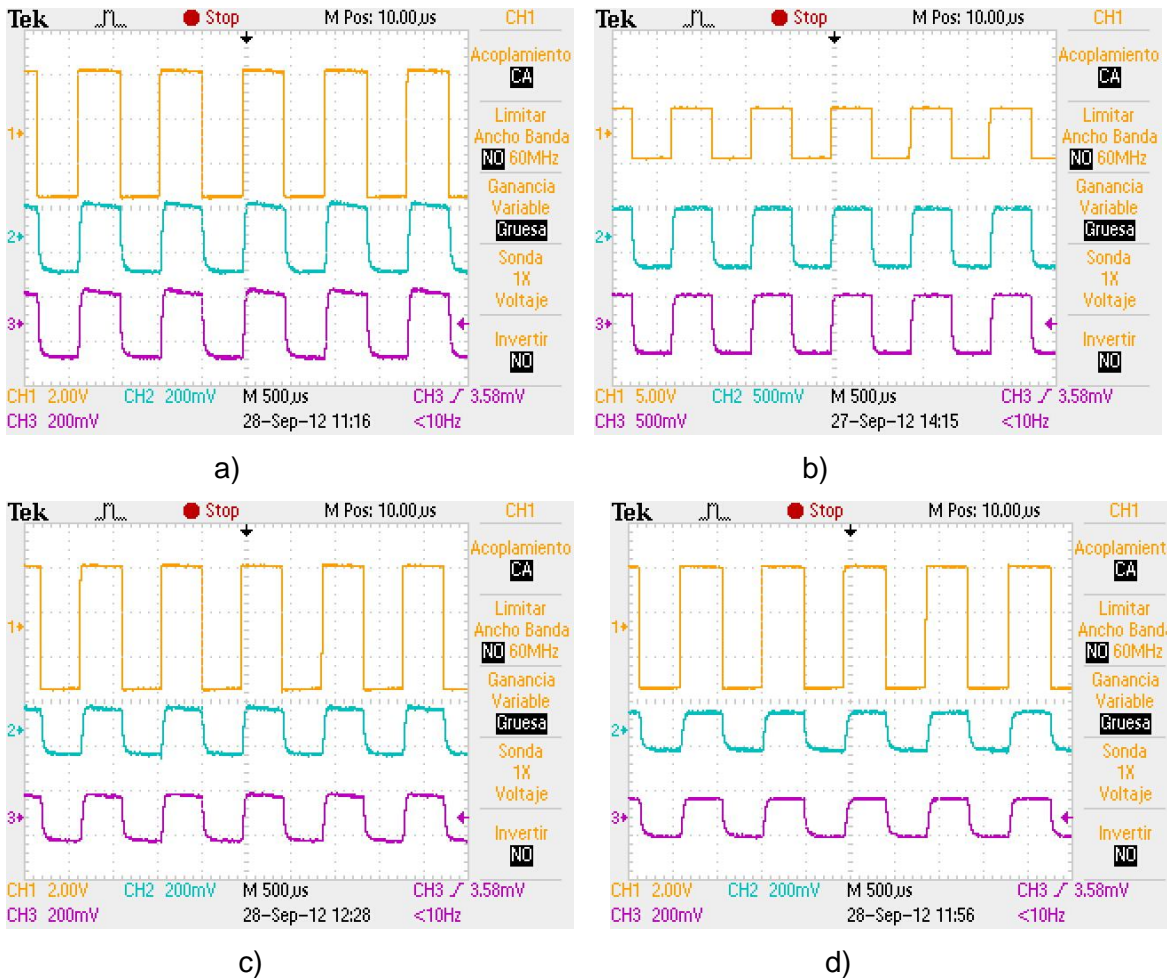


Fig. 4.5. Formas de Onda. Entrada al Demultiplexor (Amarilla), Señal Recibida en el Fotodetector (Azul), Señal Recibida en el Multiplexor (Morada): a) LED Amarillo, b) LED Verde, c) LED Rojo, d) LED Azul

Al notar esto, se probaron otros fototransistores, de tal forma, se permita mostrar la forma de onda analógica senoidal y triangular. Se optó por modificar el equipo receptor óptico ya que éste estaba siendo desarrollado en su fase inicial y el equipo transmisor óptico ya se encontraba armado completamente. Se realizaron pruebas con fototransistores marca NTE: a) modelo NTE3031, b) modelo NTE3032 y c) modelo NTE3037. En la Tabla 4.1 se muestran sus características eléctricas.

Tabla 4.1. Características Eléctricas de los Fototransistores marca NTE

NTE 3031	NTE 3032	NTE 3037
NPN, SI, Visible e IR	NPN, SI, Visible e IR	NPN, SI, Visible e IR
$P_D = 150\text{mW}$	$P_D = 200\text{mW}$	$P_D = 150\text{mW}$
$I_C = 40\text{mA}$ $V_{CE} = 10\text{V}$	$I_C = 40\text{mA}$ $V_{CE} = 5\text{V}$	$I_C = 50\text{mA}$ $V_{CE} = 30\text{V}$
Tiempo de Respuesta $6\mu\text{s}$	Tiempo de Respuesta $2\mu\text{s}$	Tiempo de Respuesta $2\mu\text{s}$

Experimento #2 Fototransistor NTE modelo NTE3031

Características Eléctricas Implementadas

- Generador de Funciones como fuente alimentador de los LEDs;
- Señal de AC de 1 Vpp a 2Vpp con señal de directa DC 3V;
- Señal de AC de 3Vpp a 5Vpp sin señal de directa DC 0V (Transmisor Diseñado);
- Fototransistor con $R_B = 96\text{k}\Omega$, $V_{CC} = 12\text{V}$, $R_C = 165\text{k}\Omega$;
- Medio: Aire, Fibra óptica de Plástico.
- Distancia: 10-15cm (Aire) y 30cm (Fibra óptica de plástico)

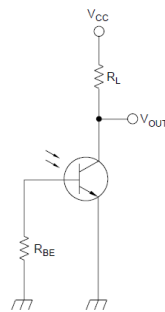


Fig. 4.6. Diagrama Eléctrico [2]

En la Fig. 4.6 se muestra el diagrama eléctrico implementado para los diferentes experimentos con los fototransistores. El diagrama eléctrico de la Fig. 4.6 usa un fototransistor con terminal de base. El resistor R_{BE} conectado entre la base y el emisor alivia la influencia de una corriente de oscuridad cuando se opera en una temperatura alta. El voltaje de la forma de onda analógica se obtiene entre el resistor R_L y el colector del fototransistor. En la Fig. 4.7 se muestran la forma de onda analógica senoidal, transmitida (azul) y recibida (amarilla), como se muestra hay una recepción de la forma de onda analógica transmitida con el medio aire.

Resultados: Formas de Onda

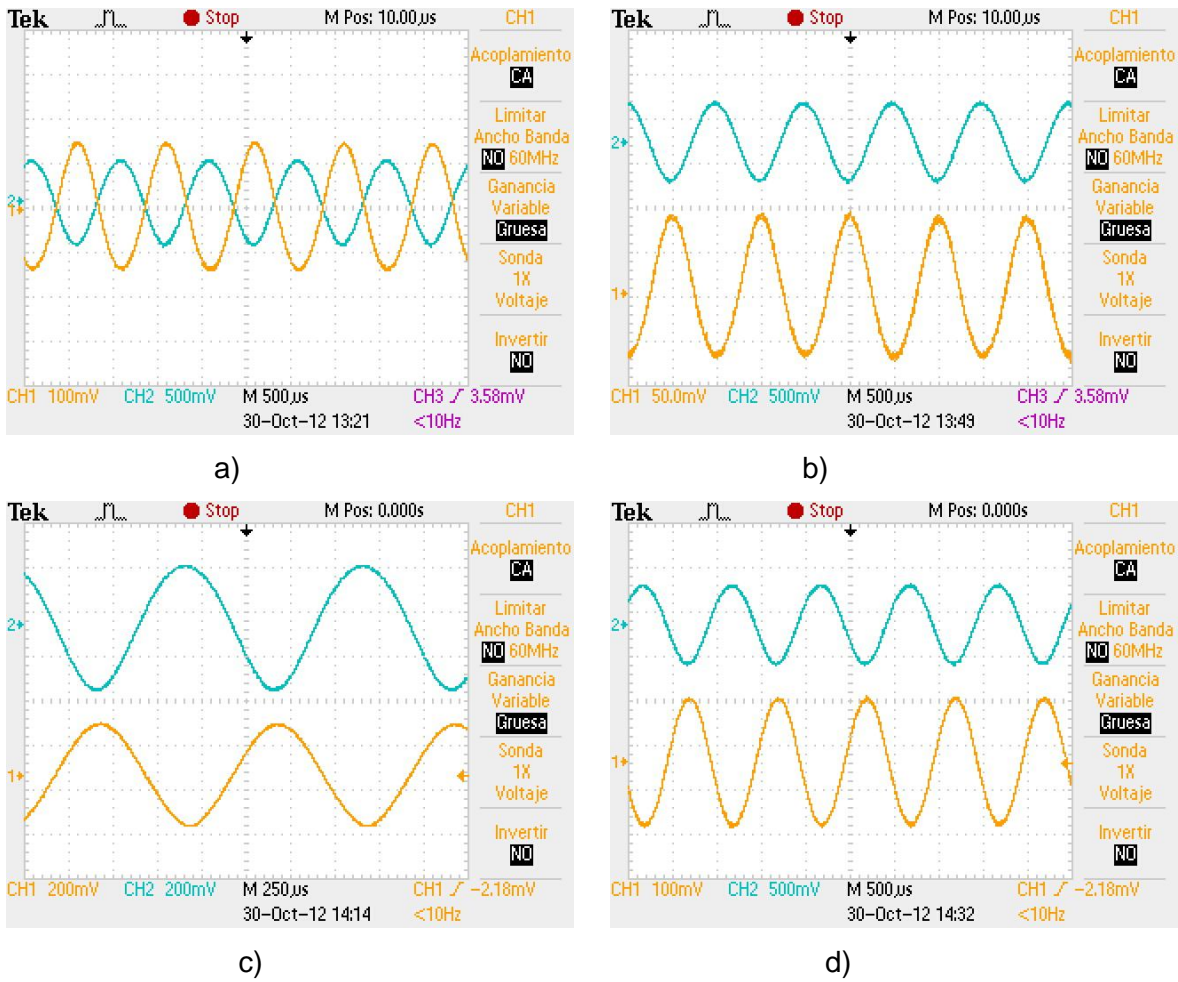


Fig. 4.7. Formas de Onda: Señal Enviada(Azul), Señal Recibida(Amarilla), Medio Aire: a) LED Rojo, b) LED Verde, c) LED Azul, d) LED Amarillo

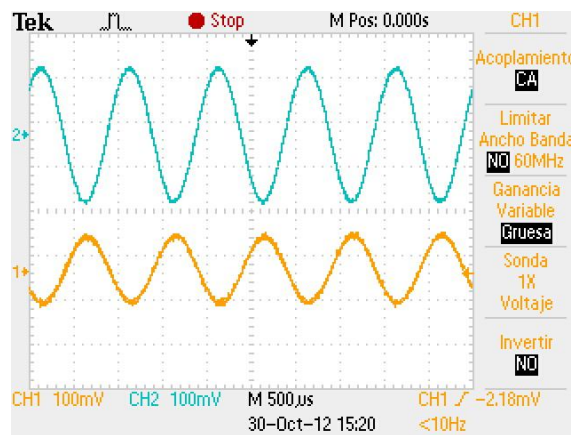


Fig. 4.8. Señal Enviada con DC (Azul), Señal Recibida (Amarilla): LED Rojo

Con esto, se llevó a cabo, el procedimiento similar, utilizando la fibra óptica de plástico de 900 μ m de longitud de onda (Fig. 4.8), con longitud física de 30 cm, y se muestra la misma forma de onda analógica transmitida.

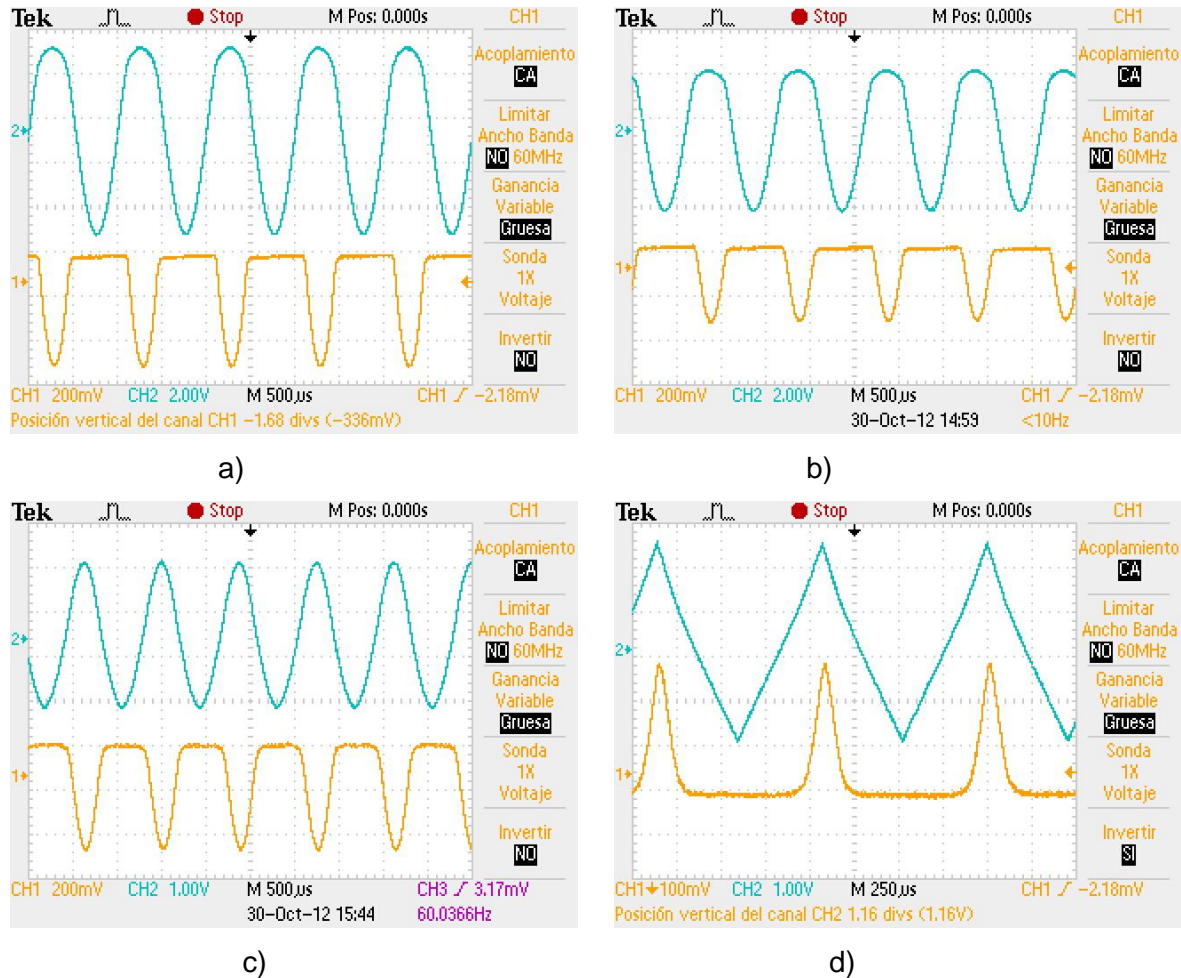


Fig. 4.9. Forma de Onda: Señal Enviada sin DC (Azul), Señal Recibida (Amarilla): a) LED Verde, b) LED Amarillo. c) LED Azul d) LED Rojo usando el equipo transmisor óptico diseñado

Éste comportamiento se muestra de manera similar con los otros fototransistores de la misma marca y para el caso de la forma de onda analógica triangular sucede lo mismo. Cuando se tiene la componente de directa DC se muestra la misma forma de onda analógica transmitida y en ausencia de ella el comportamiento es similar a las formas de onda analógicas mostradas en la Fig. 4.9.

Fotodetector #3 Fototransistor NTE modelo NTE3032

Pruebas: Formas de Onda

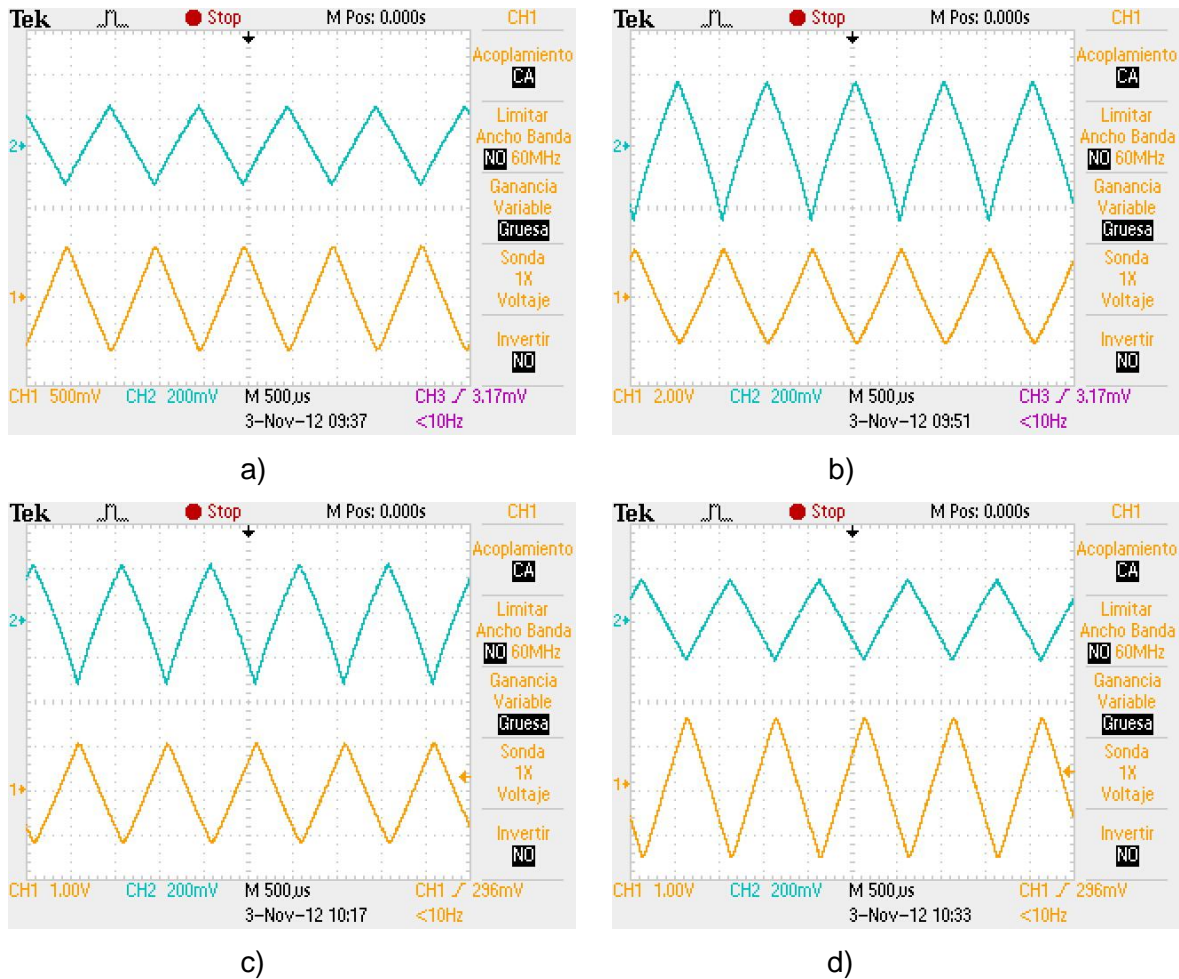
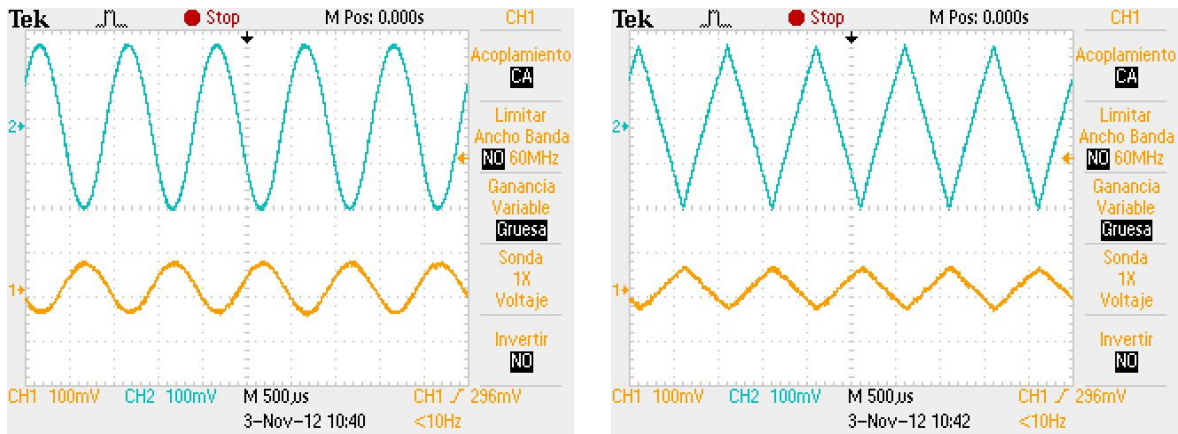


Fig. 4.10. Forma de Onda: Señal Enviada con DC(Azul), Señal Recibida(Amarilla): a) LED Rojo, b) LED Verde, c) LED Azul, d) LED Amarillo

En la Fig. 4.10 se muestra la forma de onda analógica triangular con el fototransistor seleccionado, con las mismas características técnicas eléctricas implementadas para el fototransistor anterior.

Cuando se cambia de medio por la fibra óptica de plástico (Fig. 4.11) a una distancia de 30cm de longitud física, se muestra un comportamiento similar en la forma de onda analógica con respecto al experimento anterior.



a)

b)

Fig. 4.11. Forma de Onda: Señal Enviada con DC (Azul), Señal Recibida (Amarilla): LED Amarillo

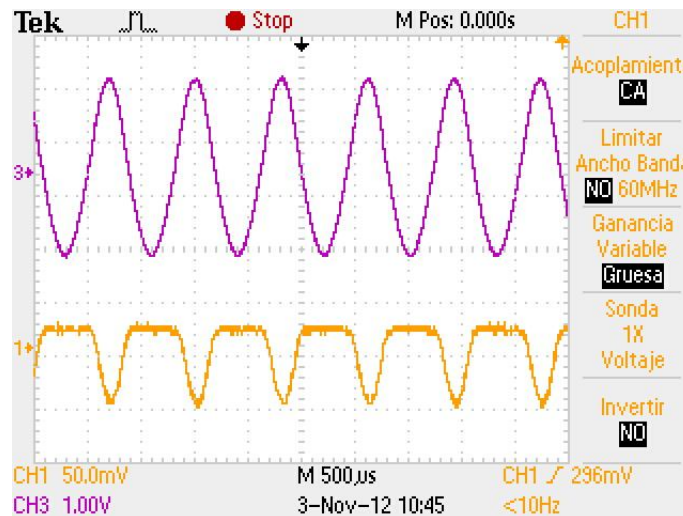


Fig. 4.12. Forma de Onda: Señal Enviada sin DC (Morada), Señal Recibida (Amarilla): LED Azul usando el equipo transmisor óptico diseñado

Se llevó a cabo, el procedimiento similar con el equipo transmisor óptico. Se muestra en la Fig. 4.12 la forma de onda analógica percibida por el fototransistor. El problema principal se debe a que la etapa amplificadora del equipo transmisor óptico no genera una componente de corriente DC suficiente, de tal forma, está sea la que encienda al LED y no el voltaje de la forma de onda analógica AC. Se cambió el diagrama eléctrico de la etapa amplificadora del equipo transmisor óptico (descrito en el capítulo 3) y se encontró la solución satisfactoria usando un amplificador con un diagrama eléctrico con una polarización del modo polarización fija.

Características Eléctricas Implementadas LEDs de 5mm LED Rojo:

- Señal de AC de 1Vpp con componente de DC de 3 a 4 V dependiendo el LED;
- Amplificador Polarización Fija y Fototransistor Inicial 5mm ambos con 12V;
- Fibra Óptica Multimodo de longitud física de 200cm.

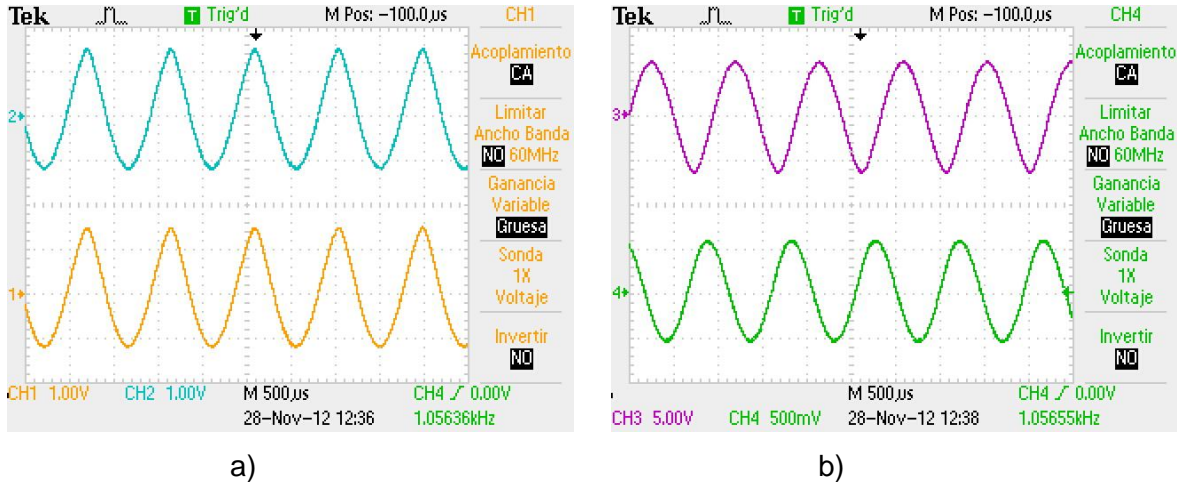


Fig. 4.13. a) Señal Salida del Generador de Funciones (Azul), Señal a la Salida del Demultiplexor entrada al Amplificador (Amarilla), b) Señal entre la RC y LED en el Amplificador (Morado), Señal Recibida en el Multiplexor Receptor (Verde)

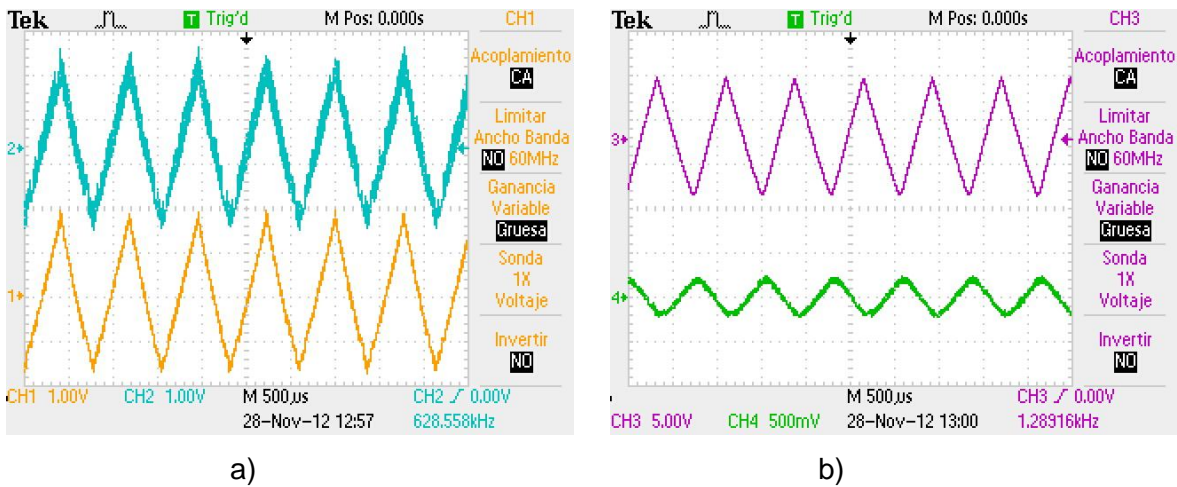
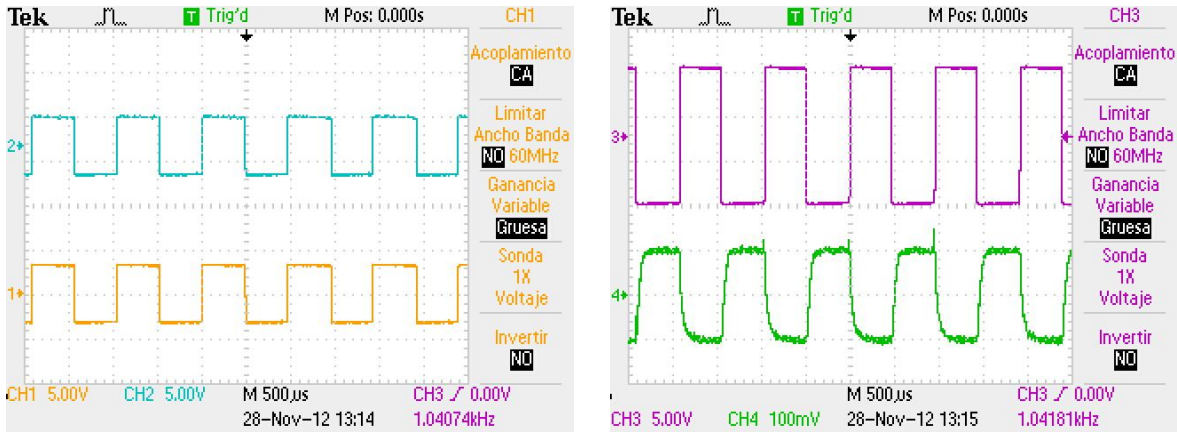


Fig. 4.14. a) Señal Salida del Generador de Funciones (Azul), Señal a la Salida del Demultiplexor entrada al Amplificador (Amarilla), b) Señal entre la RC y LED en el Amplificador (Morado), Señal Recibida en el Multiplexor Receptor (Verde)



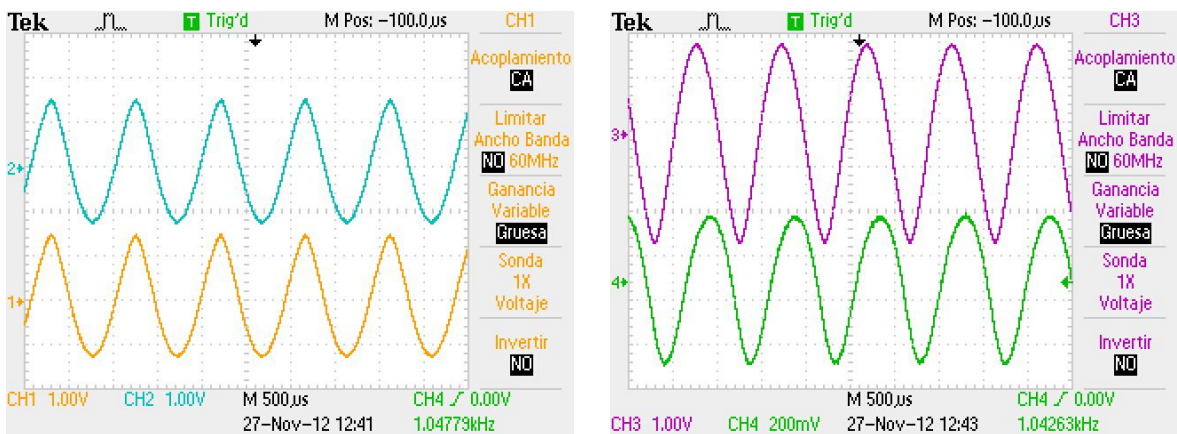
a)

b)

Fig. 4.15. a) Señal Salida del Generador de Funciones (Azul), Señal a la Salida del Demultiplexor entrada al Amplificador (Amarilla), b) Señal entre la RC y LED en el Amplificador (Morado), Señal Recibida en el Multiplexor Receptor (Verde)

Se muestra en las Figuras 4.13 - 4.15 las tres formas de onda analógicas con las que trabaja el Sistema. Al realizar el cambio del diagrama eléctrico de la etapa amplificadora del equipo transmisor óptico, el fototransistor NPN es capaz de percibir la misma forma de onda analógica transmitida por los LEDs. Con esto, se llevó a cabo, el procedimiento similar, con los LEDs de 3mm.

Formas de Onda: LEDs de 3mm LED Rojo



a)

b)

Fig. 4.16. a) Señal Salida del Generador de Funciones (Azul), Señal a la Salida del Demultiplexor entrada al Amplificador (Amarilla), b) Señal entre la RC y LED en el Amplificador (Morado), Señal Recibida en el Multiplexor Receptor (Verde)

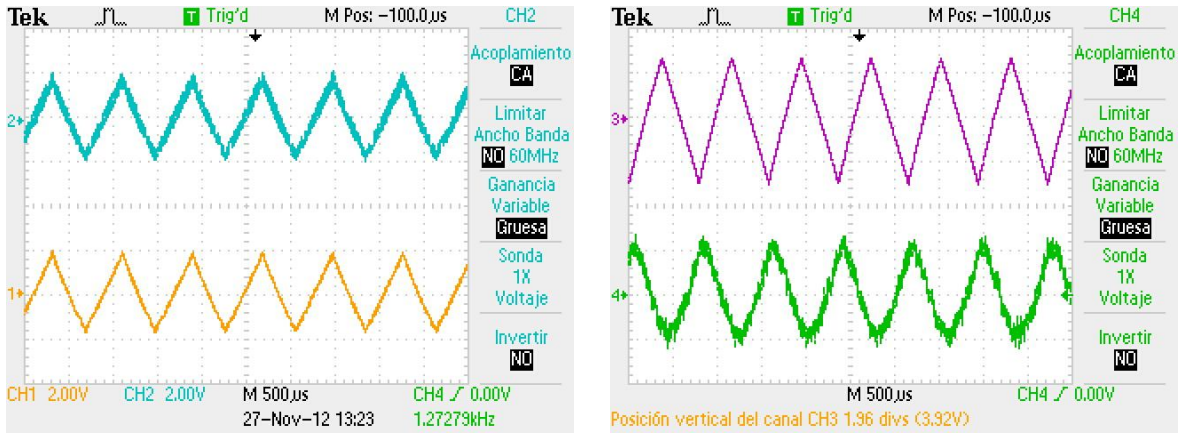


Fig. 4.17. a) Señal Salida del Generador de Funciones (Azul), Señal a la Salida del Demultiplexor entrada al Amplificador (Amarilla), b) Señal entre la RC y LED en el Amplificador (Morado), Señal Recibida en el Multiplexor Receptor (Verde)

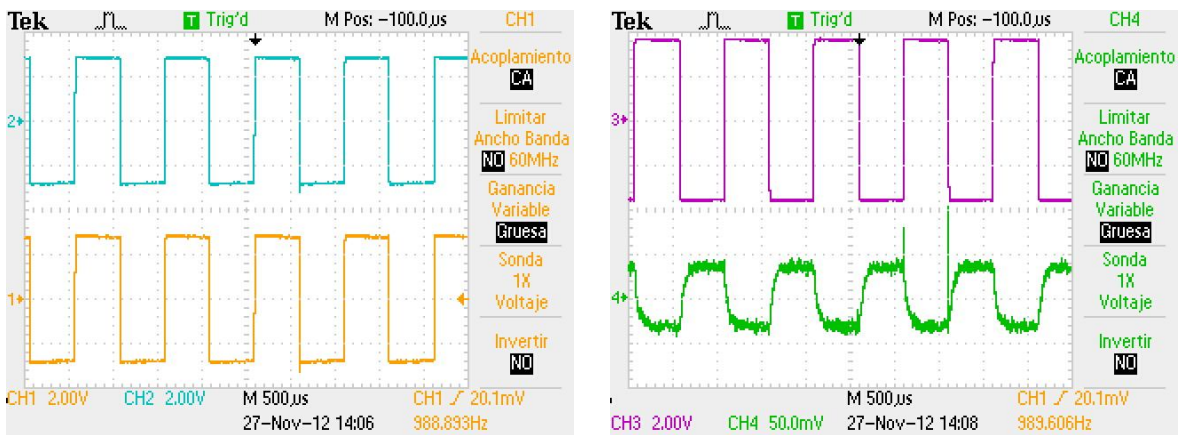


Fig. 4.18. a) Señal Salida del Generador de Funciones (Azul), Señal a la Salida del Demultiplexor entrada al Amplificador (Amarilla), b) Señal entre la RC y LED en el Amplificador (Morado), Señal Recibida en el Multiplexor Receptor (Verde)

Se muestra en las Figuras 4.16 - 4.18 las tres formas de onda analógicas con las que trabaja el Sistema. Sin importar el diámetro de la fuente de luz, el diagrama eléctrico implementado en el equipo transmisor óptico es el apropiado para ambos tipos de LEDs. Los valores del resistor de carga para los LEDs se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores de la Resistencia de Carga del Fototransistor

LED 5mm	LED 3mm
Senoidal: 56kΩ	Senoidal: 56kΩ
Triangular: 9.1kΩ	Triangular: 9.1kΩ
Cuadrada: 3.3kΩ	Cuadrada: 3.3kΩ

4.3.2. Etapa de Multicanalización (Multiplexor) [3]

En esta etapa el circuito integrado analógico implementado es el mismo del equipo transmisor óptico; el cual permitirá tener la misma forma de onda analógica a la entrada/salida del circuito integrado configurado del modo multiplexor; como se describió anteriormente (capítulo 3).

Las salidas del demultiplexor son las entradas al multiplexor y la entrada del demultiplexor es la salida del multiplexor. Las combinaciones de entrada/salida binarias al multiplexor analógico se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Combinaciones de entrada/salida del Circuito Demultiplexor Analógico

Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
0000	0	0100	4	1000	8	1100	12
0001	1	0101	5	1001	9	1101	13
0010	2	0110	6	1010	10	1110	14
0011	3	0111	7	1011	11	1111	15

4.3.3. Etapa Amplificadora

Se implementó un amplificador con un diagrama eléctrico del modo polarización por Divisor de Voltaje [4] y sus características son:

- ✓ Fuente de Alimentación Eléctrica de 19V;
- ✓ La ganancia de voltaje es de 2, es decir si en la base entran 100mV, la salida en el colector será de 200mV y con desfasamiento de fase;
- ✓ Amplitud de la señal de 50mV a 1 V (barrido);
- ✓ $Q1= \text{TBJ } 547C, R1=86.7k\Omega, R2=18k\Omega, RC=2.8k\Omega, RE=1.2k\Omega \text{ y } C1=C2=10\mu F.$

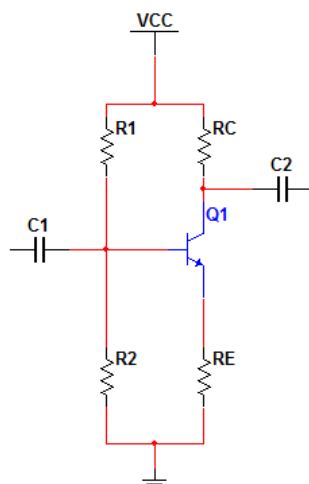


Fig. 4.19. Diagrama Eléctrico del Amplificador del Receptor [4]

El diagrama eléctrico para la etapa amplificadora del equipo receptor óptico se muestra en la Fig. 4.19., tiene una corriente de $I_C=2\text{mA}$, de tal forma, que no dañe el siguiente subsistema (multiplexor), tiene una corriente nominal de 15mA , un $V_B=3.1\text{V}$, $V_E=2.4\text{V}$, $V_{CE}=10\text{V}$, $V_C=12.4\text{V}$.

El consumo de potencia del equipo receptor óptico es 0.56 W . En la Tabla 4.4 se muestra los consumos de voltaje y corriente de cada subsistema. En la Fig. 4.20 se muestra el diagrama eléctrico general del equipo receptor óptico. En las Figuras 4.21 y 4.22 se muestra el equipo transmisor óptico implementado.

Tabla 4.4. Características Eléctricas del Equipo Receptor Óptico

Bloque	Voltaje	Corriente	Potencia
Fotodetectores (1-8)	12 V	7 mA	0.084 W
Fotodetectores (9-16)	12 V	7 mA	0.084 W
Multiplexor	5 V	10 mA	0.05 W
Amplificadores (1-8)	19 V	9 mA	0.171 W
Amplificadores (9-16)	19 V	9 mA	0.171 W

4.3.4. Fuentes de Alimentación Eléctrica

El procedimiento de diseño se explico en el capítulo 3 (sección 3.2.4. y 3.3.4.), se utilizaron las mismas fuentes del equipo transmisor óptico, tienen la misma salida nominal de alimentación eléctrica para los diagramas eléctricos utilizados para el equipo receptor óptico.

4.3.5. Diseño Físico Estructural para el Bloque Receptor Óptico

Como se requiere que el transmisor óptico y receptor óptico sean portátiles, se buscaron diferentes tipos de gabinetes: forma, tamaño, tipo de material, costo, entre otros, de tal forma, para la primera etapa de su implementación del Sistema (bloque transmisor óptico y receptor óptico) y fuentes de alimentación eléctrica se utilizaron gabinetes de plástico.

Esto con la finalidad de proteger todos los circuitos eléctricos de los bloques transmisor óptico y receptor óptico, así como, de las fuentes de alimentación eléctrica y así poderlos transportar de un lugar a otro sin dañarlos. Cada fuente de alimentación eléctrica está dentro de un gabinete individual, esto para facilitar la experimentación sobre diferentes configuraciones del sistema.

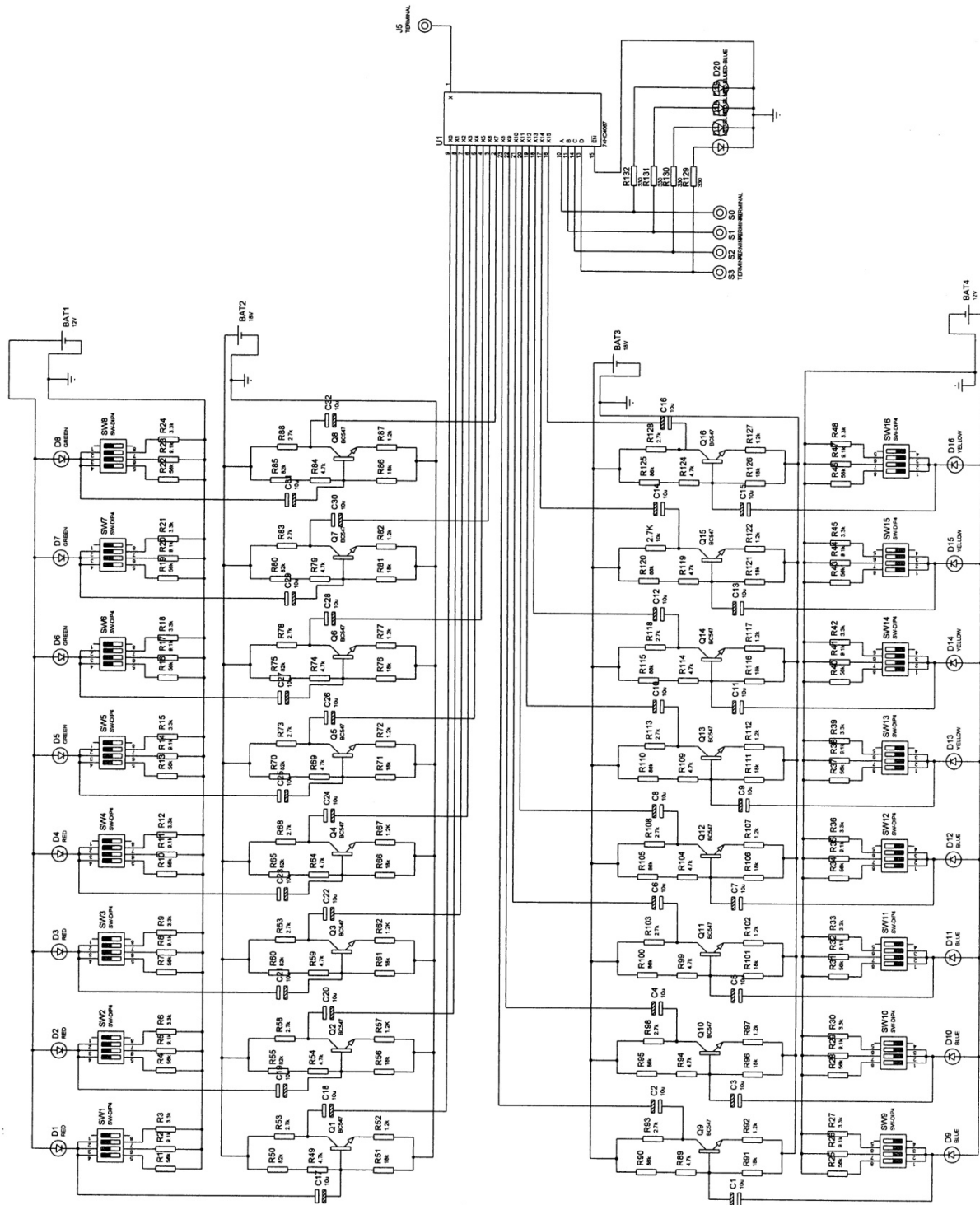


Fig. 4.20. Diagrama Eléctrico General del Receptor Optoelectrónico [4]

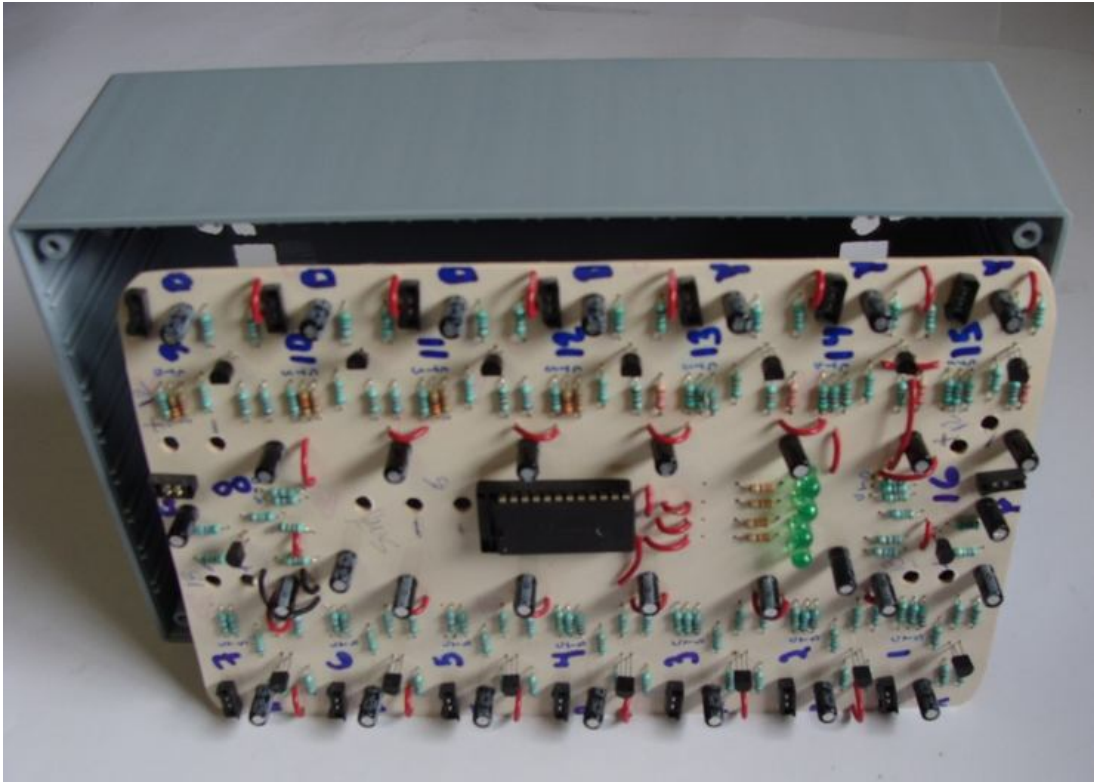


Fig. 4.21. Interior del modulo transmisor de 16 canales (Fotografía)

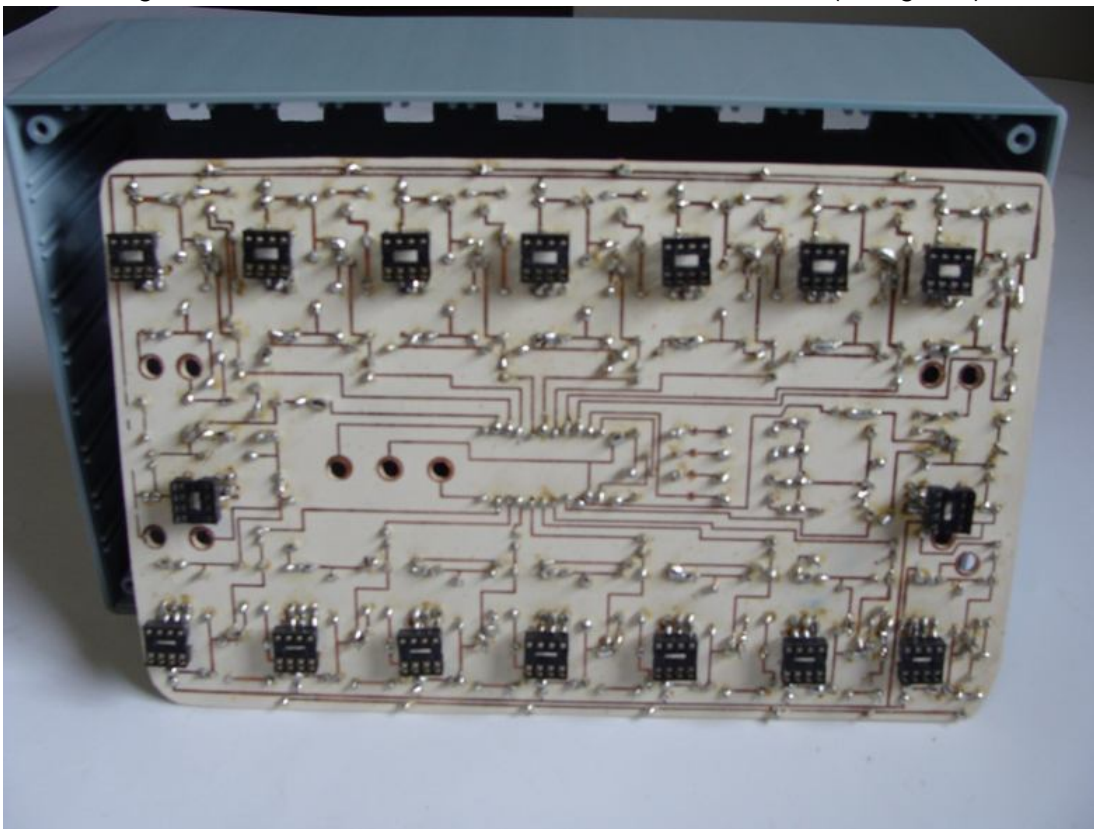


Fig. 4.22. Interior del equipo receptor óptico de 16 canales (Fotografía)

4.4. CONCLUSIONES

1. El receptor óptico descrito en este capítulo es capaz de percibir tres formas de onda analógicas ópticas: onda senoidal, onda triangular y onda cuadrada. Los fotodetectores están dentro del rango de luz visible, con un rango espectral de 400-1100nm y diámetro de 5mm. Las características de las tres formas de onda óptica son adecuadas para su utilización en el presente Sistema de interrogación de arreglos de fibras ópticas.
2. El equipo receptor óptico funciona con diferentes tipos de fibras ópticas multimodo. Se realizaron experimentos con dos tipos de fibras ópticas multimodo (modelo FG-365-LER marca Thorlabs, diámetro núcleo/revestimiento 365/400 μ m, 0.22NA, 400-2200nm; modelo FG-200-LCR marca Thorlabs, diámetro núcleo/revestimiento 200/200 μ m, 0.22NA, 180-1150nm) para verificar el correcto funcionamiento del propio sistema, a diferentes longitudes físicas: 50cm, 100cm, 200cm y 500cm, esto para verificar el correcto funcionamiento del Sistema.
3. Este Receptor óptico fue implementado y su funcionamiento probado y evaluado en conjunto con el equipo Transmisor óptico descrito en el anterior capítulo, en condiciones de nuestro laboratorio.

4.5. REFERENCIAS

- [1] Everlight, "Hoja de Especificaciones del Fototransistor modelo PT331C," Taiwán 1-7pp., 2004.
- [2] Application Note SHARP, "Photodiode/Phototransistor Application Circuit," USA, 1-7pp., 1999.
- [3] Morris, Mano, M., "Diseño Digital," 3a Ed. México, Pearson Prentice Hall, 217-254pp, 437-481pp., 2003.
- [4] Boylestad, Robert L. y Nashelsky, Louis, "Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos," 10ª Ed., México, Pearson Prentice Hall, 155-188pp., 2009.
- [5] National Semiconductor, "Hoja de Especificación del Circuito Integrado LM317 y LM337," 1-28pp., 2011.
- [6] Malvino, A, y J. Bates, D, "Principios de Electrónica," 7ª Ed., España, Mc Graw Hill, 324-399pp., 2007.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

5.1. CONSIDERACIONES SOBRE LA VARIANTE ÓPTIMA DE TRANSMISOR ÓPTICO EN CONDICIONES ESPECÍFICAS DE LA PRESENTE APLICACIÓN

En esta sección se contemplan diferentes opciones de equipos transmisores ópticos para la presente aplicación, se analiza la variante del transmisor óptico propuesto y otras variantes.

Como primer escenario, se tiene un equipo transmisor óptico, que es capaz de generar tres formas de onda analógica, onda senoidal, onda triangular y onda cuadrada; se implementa una multicanalización en el dominio del tiempo (TDM) con 16 canales analógicos con una tasa de repetición en el orden de decenas de kHz. Se conforma con fuentes de luz (LED) en el rango de luz visible, cada uno con diferente longitud de onda, diámetro, apertura del haz, entre otras. Se elaboraron acopladores para mantener unidos: la fuente de luz y un extremo de la fibra óptica.

VENTAJAS

- ✓ El costo de inversión en su desarrollo es bajo; se requirió de una inversión inicial de \$ 4000.00 M.N. para su elaboración considerando compras al menudeo;
- ✓ La elaboración de cada uno de los subsistemas fueron realizados con diagramas eléctricos fáciles de analizar e implementar, y en caso de detectar alguna anomalía, está pudiera ser resuelta sin complejidad alguna;
- ✓ La interrogación secuencial en el dominio del tiempo (TDM) involucra una cantidad mínima de equipo necesario para su implementación;
- ✓ Las fuentes de luz (LEDs) prevén una reducción en los costos del equipo de laboratorio, en contraste, los LEDs infrarrojos requieren de un equipo adicional (un tipo de “visor nocturno”) para observar la transmisión e identificar los canales ópticos.
- ✓ Es independiente de cualquier equipo de laboratorio, tiene sus propias fuentes de alimentación eléctrica y son ligeras y portátiles;
- ✓ Genera su propia forma de onda analógica, sólo requiere de un osciloscopio para la observación de la forma de onda analógica;
- ✓ De bajo peso y portátil, esto representa que puede ser llevado a cualquier lugar para su uso, además tiene caja protectora para salvaguardar la integridad de los circuitos integrados en caso de eventos no previstos.

DESVENTAJAS

- ✓ La técnica implementada para mantener alineados la fuente de luz y un extremo de la fibra óptica a través de los acopladores diseñados no es la más adecuada;
- ✓ La multiplexación en el dominio del tiempo (TDM) tiene algunas deficiencias. En particular, la dificultad de la obtención de datos detallados sobre procesos rápidos transitorios, tales como el proceso de ruptura de una fibra embebida en un elemento de concreto, bajo una carga excesiva.

Como un segundo escenario, se contempla la implementación de un equipo transmisor óptico con una transmisión de forma paralela, esto permitirá que la transmisión sea constante e interrumpida en todo momento para cada uno de los canales.

Este escenario prevé que al estar transmitiendo de forma continua, se puede detectar un efecto transitorio: el rompimiento de las fibras ópticas. Esta técnica y la anterior son complementarias y pueden ayudar a detectar con mayor exactitud no sólo la iniciación sino también el ensanchamiento de la grieta. Se prevé que cualquiera de los anteriores escenarios pueda implementarse en otras aplicaciones tales como medidores de nivel de líquidos.

5.2. CONSIDERACIONES SOBRE LA VARIANTE ÓPTIMA DE RECEPTOR ÓPTICO EN CONDICIONES ESPECÍFICAS DE LA PRESENTE APLICACIÓN

En esta sección se contemplan diferentes opciones de equipos receptores ópticos para la presente aplicación, se analiza la variante del receptor óptico propuesto y otras variantes.

Como primer escenario, se tiene un equipo receptor óptico, que es capaz de percibir diferentes intensidades de luz proveniente de diferentes tipos de fibras ópticas. Se implementa una multicanalización en el dominio del tiempo (TDM) con 16 canales analógicos con una tasa de repetición del orden de decenas de kHz. Se conforma de fotodetectores (fototransistores) en el rango de luz visible. Se elaboraron acopladores para mantener unidos a los fotodetectores y un extremo de la fibra óptica.

VENTAJAS

- ✓ El costo de inversión en su desarrollo es bajo; se requirió de una inversión inicial de \$ 4000.00 M.N. para su elaboración considerando compras al menudeo;
- ✓ El receptor óptico es capaz de percibir la forma de onda analógica emitida por las fuentes de luz, los LEDs, del equipo transmisor óptico. El equipo receptor óptico tiene una respuesta lineal a las formas de onda senoidal y onda triangular;
- ✓ Los fototransistores tienen una mayor sensibilidad que los fotodiodos ya que la pequeña corriente foto-generada es multiplicada por la ganancia del amplificador;
- ✓ Los fototransistores requieren de amplificadores de menor ganancia, en cambio los fotodiodos requieren de un amplificador de mayor ganancia;
- ✓ De bajo peso y portátil, y puede ser llevado a cualquier lugar para su uso, además tiene caja protectora para salvaguardar la integridad de los circuitos integrados en caso de eventos no previstos;
- ✓ Es independiente de cualquier equipo de laboratorio, tiene su propia fuente de alimentación eléctrica ligera y portátil.

DESVENTAJAS

- ✓ La técnica implementada para mantener alineados la fuente de luz y un extremo de la fibra óptica a través de los acopladores diseñados no es la más adecuada;
- ✓ La multiplexación en el dominio del tiempo (TDM) tiene algunas deficiencias, éstas consisten. En particular, la dificultad de la obtención de datos detallados sobre procesos rápidos transitorios, tales como el proceso de ruptura de una fibra embebida en un elemento de concreto, bajo una carga excesiva;

Como un segundo escenario, se contempla la implementación de un equipo receptor óptico con una transmisión de forma paralela. Esto permite que todos los fotodetectores estén percibiendo la forma de onda analógica emitida por las fuentes de luz del equipo transmisor óptico en cada instante sin ser interrumpida en todo momento para cada uno de los canales. Se contempla que el equipo receptor óptico tenga una señalización de una forma básica, de manera sencilla nos indique si la fibra óptica sigue transmitiendo, ésta señalización sea a base del encendido/pagado del LED, y que represente el encendido como la transmisión de la forma de onda analógica y el apagado como el rompimiento de la fibra óptica. Se prevé que cualquiera de los anteriores escenarios pueda implementarse en otras aplicaciones tales como medidores de nivel de líquidos.

5.3. OPCIONES EXISTENTES PARA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y REGISTRO DE DATOS

Se tiene contemplado el utilizar un equipo profesional de adquisición y registro de datos que se obtiene por Sistema Optoelectrónico de Interrogación de Arreglos de Sensores de Fibras Ópticas.

Los equipos existentes de adquisición de datos DAQ (*Data Acquisition*, DAQ por sus siglas del anglosajón) cuentan con características que varían en un gran rango de modelo a modelo:

- Tazas de adquisición de datos desde 10 kS/s hasta 1 MS/s;
- Número de canales analógicos desde 4 hasta 240;
- Conectividad con otros dispositivos mediante USB, Ethernet, Wireless, entre otros;
- Diferentes rangos de medición de voltajes +/- 5 +/- 10 +/- 30 entre otros.

Para seleccionar el equipo o equipos más adecuados para la presente aplicación se realizó un análisis de equipos de adquisición y registro de datos de las siguientes empresas: Measurement Computing, Adlink, Advantech, National Instruments, Agilent Technologies, Dataq Instruments, MicroDAQ. Las especificaciones técnicas eléctricas requeridas son

- ✓ 16 canales analógicos de entrada, como mínimo, con capacidad de monitorear cada canal independientemente;
- ✓ Taza de datos de adquisición de 100 KS/s (S=Sampling=lecturas) para al menos 6250 muestras por segundo, por canal;
- ✓ Rango de voltaje alrededor de +/- 10 V con una resolución de 16 bits por muestra;
- ✓ Conexión entre los diferentes dispositivos de tipo USB, Ethernet, Wireless, o RS-232.

A continuación se presente características generales de equipos DAQ de distintas marcas:

Measurement Computing cuenta con equipos con las especificaciones técnicas requeridas, además estos equipos proveen la opción de almacenamiento sin la necesidad de una computadora, ya que contienen una memoria interna de 4 Gb hasta 32 Gb. El costo de los equipos es menor, en comparación con otras marcas.

Agilent Technologies tiene equipos con las especificaciones técnicas requeridas. A diferencia de la empresa anterior, sus equipos no proveen de alguna unidad de almacenamiento interno de datos y requieren de un equipo externo de almacenamiento (por ejemplo, una computadora). Una ventaja de Agilent Technologies consiste en la fácil disponibilidad de soporte técnico, por parte de la empresa.

National Instruments cuenta con una cantidad de equipos muy grande con diferentes especificaciones y formas de comunicación entre la computadora y el equipo que ofrecen una amplia gama de velocidades de transmisión. El modelo NI USB 6351, por ejemplo, tiene una velocidad de muestreo de 1MS/s, aproximadamente 6250 muestras por segundo por canal, a un precio de \$1499 USD. Existen otros modelos con velocidades de transmisión más altas, éstos requieren de una tarjeta instalada en la computadora, como por ejemplo PCI express, que hace que el equipo sea incompatible con la mayoría de las computadoras.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES GENERALES

CONCLUSIONES GENERALES

1. El estudio de estado del arte reveló que los sensores de fibras ópticas hoy en día son ampliamente utilizados en diferentes aplicaciones en la industria moderna. En lo relacionado al monitoreo de salud de estructuras de concreto y materiales compuestos de polímeros los principales sensores que se implementan son de tipo espectral basados en Rejilla de Bragg y los sensores interferométricos Fabry-Perot, Mach Zehnder y Michelson. Estos sensores y respectivos equipos de su interrogación son caros y complejos. Por esto, en el presente trabajo se considera una alternativa: el empleo de redes de fibras ópticas sencillas como sensores (indicadores) de la integridad de estructuras en cuestión.
2. Se propone un Sistema Optoelectrónico de Interrogación de dichas redes que contemple una multicanalización en el dominio del tiempo (TDM) la cual permite realizar una interrogación periódica serial de las fibras de la red con una tasa de interrogación desde 1 Hz hasta 240 Hz: de un arreglo de las fibras ópticas utilizadas como sensores de la integridad de una estructura bajo control.
3. Se implementaron los equipos transmisor óptico y receptor óptico con las especificaciones técnicas requeridas para cada uno de los subsistemas que constituyen al Sistema para un desempeño óptimo.
4. El Sistema trabaja con 8 diferentes longitudes de onda, que representan a cuatro colores; rojo (630nm y 635nm), verde (525nm y 520nm), azul (475nm y 465nm) y amarillo (590nm y 600nm) con fuentes de luz con diámetro de 5mm y 3mm respectivamente.
5. Se realizaron pruebas experimentales con dos diferentes fibras ópticas multimodo de longitudes físicas de 50cm, 100cm, 200cm y 500cm y fibras ópticas plástico de longitudes físicas de 20cm, 30cm y 45cm.
6. Se realizó un análisis comparativo de los posibles equipos de adquisición de datos, y se hizo respectiva propuesta, la cual consiste en utilizar el equipo marca Agilent Technologies modelo U2331A, esto por cumplir con los requerimientos técnicos descritos en el capítulo 5 y tener un conjunto de ventajas competitivas frente equipos de otras marcas y modelos.
7. Se contempla usar el Sistema propuesto en diferentes aplicaciones tanto en el monitoreo de estructuras de distintos materiales con fibras ópticas embebidas, como en sensores de nivel de líquidos, entre otros.

APÉNDICES: PUBLICACIONES DERIVADAS DEL PRESENTE TRABAJO

1.

LV Congreso Nacional de Física, XXVII Encuentro Nacional de Divulgación Científica, Sociedad Mexicana de Física, presentado en la Sesión Mural 1MD05 Lunes 8 de Octubre 2012, Centro de Convenciones de Morelia Michoacán.

1MD05 DETECCIÓN DE GRIETAS EN ELEMENTOS DE CONCRETO MEDIANTE ARREGLOS DE FIBRAS ÓPTICAS Alfredo Beltrán Hernández, alfbelher@gmail.com, Programa de Doctorado en Ingeniería Eléctrica, UNAM; Juan Emmanuel González Tinoco, telerin10@hotmail.com, Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica, UNAM; Sergei Khotiaintsev, sergeikh01@yahoo.com.mx, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Se presenta una técnica de detección de grietas en elementos de concreto basada en arreglos embebidos de fibras ópticas. Una o varias fibras de arreglo se rompen cuando una grieta la atraviesa, este evento es detectado por un Sistema Optoelectrónico especializado. Se analizó una gama de 10 tipos de fibra óptica, con parámetros mecánicos y ópticos distintos. Se identificaron las mejores fibras ópticas en función de la tasa de sobrevivencia en la etapa de su embebido en elementos de concreto durante la fabricación de estos, así como su capacidad de ruptura a la formación y evolución de grietas. Se verificó la viabilidad de la técnica de embebido obteniendo incrementos en la tasa de sobrevivencia de un 50 % a un 90 %, respecto al embebido de fibras ópticas sin protección alguna. Se encontró que las fibras ópticas con un diámetro mayor del núcleo y cubierta, de 400/730 μm , cumplieron de forma satisfactoria con las exigencias ópticas y estructurales necesarias.

El experimento respectivo demostró la viabilidad de este método que representa una alternativa sencilla y de bajo costo para el monitoreo estructural, respecto a las técnicas utilizadas actualmente.



DETECCIÓN DE GRIETAS EN ELEMENTOS DE CONCRETO MEDIANTE ARREGLOS DE FIBRAS ÓPTICAS

A. Beltrán Hernández, J. E. González Tinoco, S. Khotiaintsev

Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
E-mail: alfbelher@gmail.com, telerin10@hotmail.com, sergeikh@hotmail.com



Introducción

Se presenta un método de detección de grietas en elementos de concreto basado en arreglos de fibras ópticas sencillas que sirven como sensores del daño.

La detección de grietas desde su inicio y el monitoreo de su extensión dentro de elementos estructurales de edificaciones es importante en zonas sísmicas, para evaluar el daño causado por temblores y cualquier tipo de evento catastrófico. Por lo anterior, se desarrolló una técnica de embebido de arreglos de fibras ópticas en elementos de concreto durante su proceso de fabricación, así como instrumentos para la interrogación óptica de dichos arreglos.

Con los arreglos e instrumentos implementados, fue posible detectar el inicio de grietas, monitorear su propagación y evaluar su extensión en diversos elementos de concreto sujetos a pruebas mecánicas, en condiciones de laboratorio.

Concepto de la detección

La fibra óptica embebida en un elemento de concreto se rompe en la zona donde se abre una grieta. Esto resulta en una disminución de la transmisión óptica que, a su vez, indica la aparición de la grieta.

El cambio en la transmisión óptica se interpreta de una manera discreta (binaria). Con arreglos grandes de fibras ópticas embebidas en elementos de concreto se monitorea la aparición y extensión del daño en dichos elementos.

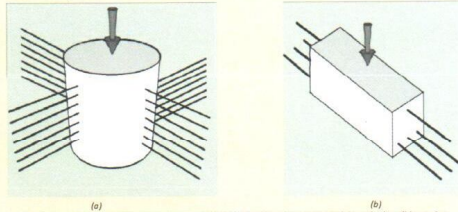


Fig. 1. Esquemas de elementos de concreto con arreglos de fibras ópticas embebidas: (a) un cilindro y (b) una viga.

Problemática del método

El proceso de fabricación de elementos de concreto involucra varios factores que pueden dañar las fibras ópticas:

- Los agregados, como la grava, pueden romper las fibras ópticas al llenar el molde con la mezcla de concreto fresco.
- Las técnicas de embebido son agresivas en el proceso de retirar la protección.
- Los arreglos de fibras ópticas, debido a los múltiples esquemas existentes, suelen dañar las fibras debido a la ubicación específica de cada fibra óptica.

En trabajos existentes se ha utilizado algún tipo de protección, como tubos plásticos o de metal y algunos recubrimientos para proteger las fibras ópticas durante la fabricación de los elementos [1, 2].

Tal protección puede enmascarar el efecto de la presencia de una grieta [3], por lo que fue necesario investigar las características de embebido directo (sin protección) de las fibras ópticas en la mezcla de concreto fresca, así como el efecto de los procesos de solidificación y curado de mezcla sobre las fibras embebidas.

Se probaron varias técnicas de protección temporal, en particular el uso de tubos de plástico retirados después de llenar el molde, llenando de forma completa el espacio alrededor de la fibra.

Se fabricaron cilindros y vigas rectangulares de concreto de dimensiones estándar; la mezcla de concreto fue: cemento, grava de ¾", arena y agua. La relación entre estos componentes fue 1:2.35:2.86:0.96.

Las fibras ópticas del arreglo fueron interrogadas secuencialmente utilizando el método de Multiplexación por División de Tiempo (TDM). Cada fibra óptica del arreglo fue acoplada con su propia fuente de luz (LED) y las salidas de todas las fibras ópticas fueron acopladas a un solo receptor óptico.

La señal multiplexada en el dominio de tiempo fue observada mediante un osciloscopio; se almacenó y procesó la información con ayuda de un sistema computacional implementado para esta aplicación particular.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Ingeniería y a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en forma del proyecto de investigación "Monitoreo de daño en elementos de concreto con arreglos de fibras ópticas" y el apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), UNAM, en forma del proyecto IN117512. A.B.H. agradece a la Coordinación de Estudios de Posgrado (CEP), UNAM, por las becas otorgadas.

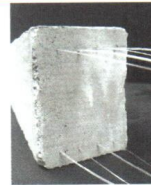


Fig. 2. Arreglo de fibras ópticas embebidas en una viga de concreto.



Fig. 3. Viga de concreto, con fibras ópticas embebidas, posterior a la carga excesiva aplicada.

Resultados

Se evaluaron 10 tipos de fibras ópticas con parámetros físicos y ópticos distintos identificando las mejores, en función de la tasa de sobrevivencia del proceso de embebido y capacidad de ruptura en la formación y evolución de grietas.

Se observó una tasa de sobrevivencia, de entre 10% y 90%, en diferentes fibras ópticas sin y con protección, respectivamente (Tabla).

Las fibras ópticas con un diámetro mayor del núcleo y cubierta, 400/730 µm, cumplieron de forma satisfactoria con los requisitos ópticos y estructurales necesarios.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de este método, el cual presenta una alternativa de bajo costo respecto a las técnicas ópticas existentes de monitoreo de "salud" de estructuras [1, 2].

Tabla. Tasa de sobrevivencia de las fibras ópticas utilizadas.

Fibra óptica	Cilindro con protección	Cilindro sin protección
# 1	Entre 60 %	Entre 75 %
# 2	Entre 60 %	Entre 75 %
# 3	Entre 30 %	Entre 10 %
# 4	Entre 20 %	Entre 10 %
# 5	Entre 70 %	Entre 80 %
# 6	Entre 60 %	Entre 70 %
# 7	Entre 90 %	Entre 80 %
# 8	Entre 40 %	Entre 20 %
# 9	Entre 50 %	Entre 20 %
# 10	Entre 40 %	Entre 10 %

Conclusiones

- Se observó que algunos tipos de fibras ópticas sobrevivieron suficientemente bien al proceso de embebido en los elementos de concreto sin ningún elemento de protección.
- Se demostró que arreglos de fibras ópticas sencillas permiten monitorear el inicio y propagación de grietas dentro de elementos de concreto sometidos a carga.
- El presente principio binario de detección de daño en elementos de concreto es sencillo en su implementación y en el procesamiento e interpretación de los datos, dando como resultado un bajo costo y un fácil manejo de la técnica.
- El sistema desarrollado es de gran promesa para el monitoreo de la integridad continuo y permanente de estructuras y edificaciones de concreto, en particular permite la detección de daño causado por terremotos y otros eventos catastróficos.

Referencias

- P. Childs et al., "Measurement of crack formation in concrete using embedded optical fibre sensors and differential strain analysis," Meas. Sci. Technol. 19(6), 065301 (2008).
- K. Kesavan et al., "Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete," Measurement 43(2), 157-163 (2010).
- S. Khotiaintsev et al., "Monitoring of integrity of concrete elements with arrays of optical fibers," Electron. Comm. 3(61), 200-204 (2011).

2.

LV Congreso Nacional de Física, XXVII Encuentro Nacional de Divulgación Científica, Sociedad Mexicana de Física, presentado en la Sesión Simultanea ISD04 Martes 9 de Octubre 2012 , Salón Michoacán Modulo D, Centro de Convenciones de Morelia Michoacán.

ISD04 SISTEMA OPTOELECTRÓNICO DE INTERROGACIÓN DE ARREGLOS DE SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS

¹Juan E. González Tinoco, ¹Roslba Álvarez Chávez, ²Alfredo Beltrán Hernández, ³Sergei Khotiaintsev ¹Programas de ¹Maestría y ²Doctorado en Ingeniería Eléctrica, y ³Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F., e-mail: telerin10@hotmail.com

Se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo e implementación de un sistema de interrogación de arreglos de sensores de fibra óptica de tipo amplitud. Se trata de un sistema modular cuyo modulo base consiste en 16 transmisores y 16 receptores ópticos. El sistema utiliza una multicanalización en el dominio del tiempo (TDM).

La originalidad de este sistema consiste en la posibilidad de utilizar tres tipos distintos de señales: senoidal, triangular y cuadrada; esto permite diagnosticar el funcionamiento correcto del sistema para detectar una posible saturación y/o distorsión del mismo. El procesamiento de los datos se realiza a nivel electrónico. El sistema es capaz de trabajar con fibras ópticas de diferentes tipos y características físicas, monomodo y multimodo.

Este sistema ha sido utilizado con fibras ópticas embebidas en elementos de concreto, para detectar daños: fisuras y grietas. En esta aplicación medimos la atenuación en los arreglos de los sensores ópticos. Entre las ventajas de este sistema con respecto a los sistemas existentes, es la practicidad, portabilidad, economicidad, independencia y con amplias posibilidades de monitoreo. Este sistema puede encontrar otras aplicaciones con arreglos de sensores ópticos de otros tipos.

Structural health monitoring of concrete elements with embedded arrays of optical fibers

Sergei Khotiaintsev^a, Alfredo Beltrán-Hernández^a, Juan González-Tinoco^a, Héctor Guzmán-Olguín^a, Gerardo Aguilar-Ramos^b

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Coyoacán, México, D.F., 52-55-5622-3074; ^bInstituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Coyoacán, México, D.F., 52-55-5623-3600 ext. 8410

ABSTRACT

An optical-fiber sensor system for structural health monitoring of concrete elements such as beams and columns is presented. The system employs arrays of conventional optical fibers embedded in the concrete elements as crack sensors. Twelve types of optical fibers as well as several embedding techniques have been tested for this role. The survival rate of optical fibers embedded in concrete could be as high as 80%. The loss of fibers during the embedding process was acceptable provided that the number of fibers in the array had redundancy. The optical transmission of all fibers in the array was monitored in a time-division multiplexed mode at a high repetition rate, in the kHz range. The monitoring scheme allowed a quasi-continuous data acquisitions of large optical fiber arrays. A sharp decrease in the optical transmission of one or more optical fibers was a clear indicator of the development of cracking in the element subjected to flexural loads. The system was successful in detecting not only the initiation but also the propagation of cracks in concrete elements subjected to incremental flexural loading. In this work, the relation between the mechanical properties of the optical fibers and their behavior for the described application is discussed. Also, considerations towards a rational design of the system are proposed. The damage detection system may be used for the mapping and monitoring of cracks in concrete elements. The simplicity of the operation and relatively low cost of the proposed system make it a great candidate for applications in structural health monitoring of critical elements in civil infrastructure.

Keywords: structural health monitoring, concrete elements, crack detection, distributed sensing, optical fiber sensors, smart structures

1. BACKGROUND

Monitoring of structural elements throughout their construction and service life has been a subject of great interest in recent years, particularly due to the increasing concern in the prevention of catastrophic failures of buildings and large infrastructure projects. The use of fiber optic sensors for the monitoring of the physical and mechanical conditions of structures has the advantage of being immune to electrical discharges and electromagnetic interference, in comparison with electronic sensors. To date, most of the fiber optics monitoring techniques are based on the so-called Fiber Bragg Gratings (FBG)¹, the Fabry-Perot interferometers², and the Brillouin scattering³. These techniques are able to provide information about the state of structural elements in terms of physical parameters such as temperature, displacement, and stress. However, the cost of installation and operation of the equipment associated with said techniques is usually high, thereby limiting their scope of application^{4,5}.

Moreover, the indication of structural damage in main structural concrete elements, such as beams and columns, allows for a rapid assessment of the health of the structure shortly after extreme events such as earthquakes and overloading. Structural damage may be easily correlated with the appearance, extension and widening of cracks beyond a certain value. Therefore, an effective structural health monitoring of concrete members may be adequate if it is able to identify and locate cracks. Such data may be obtained via the monitoring of the transmission properties of simple optical fibers embedded into the concrete elements^{6,7}. The widening of a crack may result in the rupture of the optic fiber that crosses it. In turn, this results in a sudden decrease of the optical transmission capability of the fiber, i.e., the optical fibers turn into reliable indicators of the damage evolution of the structural member. The main challenge associated with this idea is preventing the damage of the optical fibers during the construction of the concrete elements. In most of the existing applications of optical fibers for damage detection, they are attached to the surface of the concrete elements after their formwork is removed and construction is completed⁸.

In the few cases where the fibers have been embedded, it has been common to protect them by means of plastic tubing, metal pipes, or metal sheets and foils⁸. The disadvantage of protecting the optical fiber when it is embedded in concrete is the reduction of its ability to detect the appearance and development of cracks. The latter and the complexity of the installation process have been the main reasons for these techniques not to be used in practical applications. Currently, the approach of optical fiber embedment has been virtually abandoned as a method for the structural health monitoring of concrete structures.

The main objective of this research program was to investigate the efficiency of different techniques for the location, fixation and final embedment of optical fibers in concrete elements. A series of experiments were carried out to demonstrate the effectiveness of the proposed system for detecting structural damage in concrete beams by means of simple optical fiber arrays embedded in these elements.

2. METHODOLOGY

The fabrication of concrete elements involves a variety of materials, processes and activities that may cause physical damage or deterioration to the optical fibers, thus leaving them useless for damage detection during the service life of the element. In particular, the presence of coarse aggregates (gravel) in the concrete may be responsible for the breaking of optical fibers during the cast of the concrete element.

In the present research program, the direct embedding technique without any protection of the optical fibers was used. This technique was compared with another in which the temporary protection of the optical fibers by means of plastic tubing was carried out. The protective tubing was removed once the cast of the concrete in the mold of the flexural beams was concluded, i.e. before the initial setting of the concrete mix. Thus, the space between the optical fiber and its temporary protection was filled with concrete.

In the two embedding techniques described, some optical fibers are damaged and lost. The loss, however, may be acceptable provided that the number of optical fibers is redundant, that is, than the number of the survived optical fibers is sufficient for detecting structural damage (Figure 1). The risk of damaging and even losing some optical fibers of the array during the fabrication process is rather high. Therefore, it was deemed interesting to analyze the survival rate of optical fibers embedded in the concrete element.

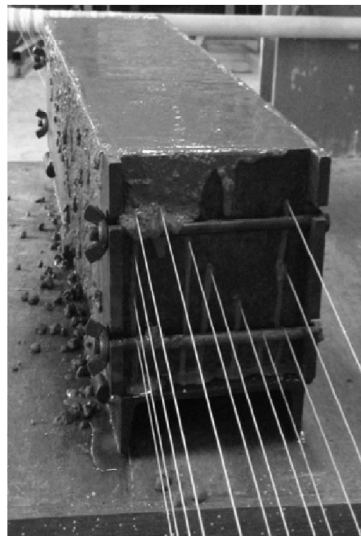


Figure 1. Concrete beam in its mold showing the embedded optical fibers.

Initially, two concrete beams were cast. Their width-height-length dimensions were 100-150-450 mm and 100-150-550 mm, respectively. The concrete mix for both beams was produced in the laboratory following a proportioning by volume. The cement-gravel-sand-water proportion was 1-2.35-2.86-0.96. The maximum size of the coarse aggregate was 20 mm.

The extreme walls in the longitudinal direction of the molds were drilled for the optical fibers to run through the holes and secured from the exterior side of the molds. Twelve types of silica-core multimode and single-mode optical fibers were used. The fibers had different internal structure and dimensions, and different external plastic jackets of different diameter. The arrays included from 4 to 12 fibers.

The molds were filled with the concrete mix and allowed to harden over a 24-hour period after which the flexural beams were removed from their molds and cured for 28 days in laboratory dry condition. The transmission characteristics of each of the optical fibers were monitored during the concrete curing process. The flexural load tests were carried out by means of a 50-ton Amstler universal machine capable of both static and dynamic loading. The tests were conducted using load control under a uniform and monotonically increasing regime. Data was recorded at load steps of 50 kg.

Data acquisition of the fiber-optic arrangements was done using a time division mode (TDM). An ad-hoc monitoring system was designed, built and tested (Figure 2). Each optical fiber was coupled to its own source: a light emitting diode (LED) of a wavelength of 633 nm. The light sources were operated sequentially by means of a de-multiplexer and a synchronizing clock at a rate of several kHz. The outputs of all optical fibers were coupled to a single optical receiver. The multiplexed signal representing the transmission of all optical fibers in the array with respect to time was monitored using an oscilloscope, and stored and post-processed with a personal computer.

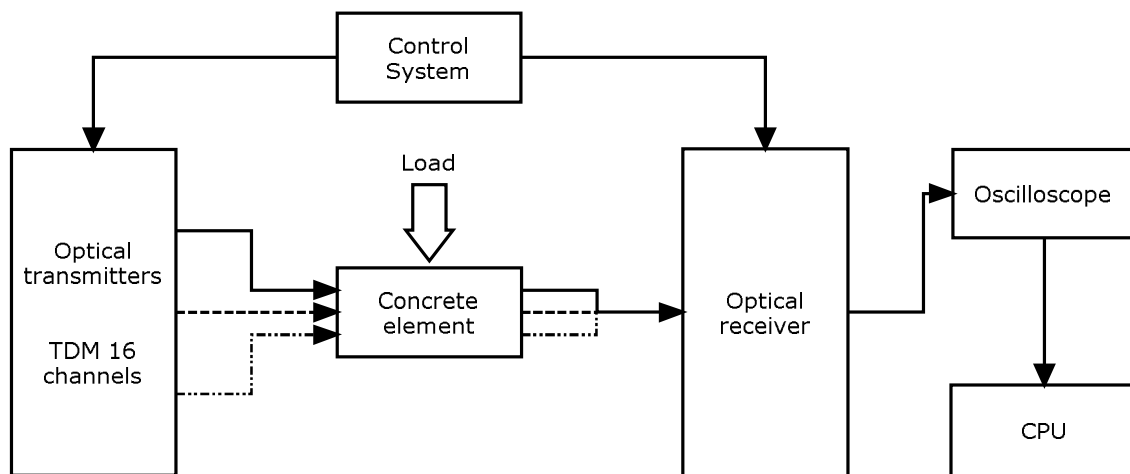


Figure 2. Block diagram for the ad-hoc optoelectronic monitoring system for concrete elements.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

The experimental program conducted in this study consisted of three phases:

1. Development and verification of a methodology for the embedment of optical fibers arrays in concrete beams.
2. Experimental testing.
3. Analysis of results including the survival rate of optical fibers based on their protective technique and their optical transmission characteristics after installation.

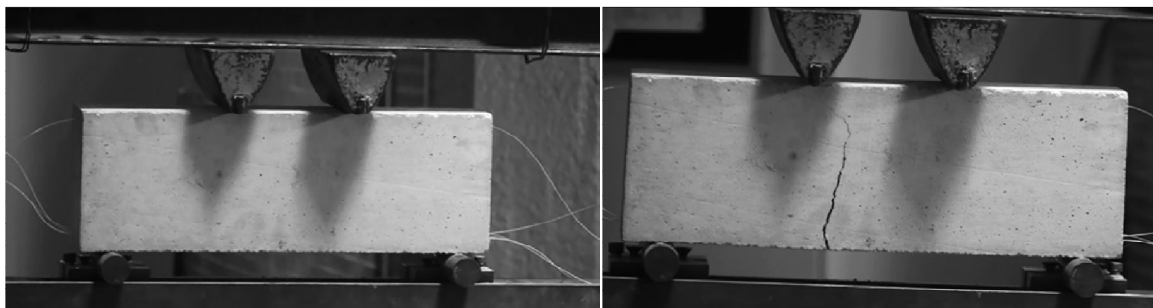
Visual inspection carried out during the cast operation revealed that, in all cases, the optical fibers were slightly displaced with respect to their initial position in the mold. The displacement was not detrimental of the performance of the fiber. In most cases, it was enough to slightly stretch the fiber back into its original position right after the end of the cast operation. The maximum survival rate of fibers of 80 to 90% was observed for the 400-um core, silica multimode fiber with a 425-um hard polymer coating and a 730 um Tefzel jacket. The lowest survival rate of 7.5% was observed for small diameter silica fibers. Therefore, we suggest that the embedment of small diameter optical fibers is avoided for the monitoring of concrete members.

Table 1. Survival rate of some optical fibers used.

Optical fiber type	Survival rate (%)	
	With protection	Without protection
SMF-128	~ 30	~ 10
GFIB	~ 20	~ 10
FG-200 UCR	~ 65	~ 65
FG-200 LCR	~ 65	~ 65
FG-365 LER	~ 70	~ 70
FT-200 URT	~ 60	~ 60
FT-400 URT	~ 90	~ 80
AFS 50/125	~ 40	~ 20
AFS 105/125	~ 50	~ 20
IOFAN 50/125	~ 40	~ 10

Table 1 lists the survival rate of the optical fibers used. It is perhaps discernible that the fibers with a higher survival rate are those with larger core diameter. This is not surprising as there is a direct correlation between the thickness of the fiber coating and its strength. The use of optical fibers with thicker, stronger coatings in combination with temporary external protective measures such as the use of plastic tubing is recommended. Based on the results of Table 1, we conclude that optical fibers with core diameters larger than 200 μm are the most suitable for the monitoring of cracks in concrete members as they have both high survival rate and high optical transmission.

The use of optical fibers with relatively large core sizes has both advantages and weaknesses. On one hand, they are more resistant and less subjected to damage and rupture during the fabrication of the concrete elements. In contrast, they are not as sensitive as small core-diameter fibers and they might not detect the development of hairline cracks. However, the advantages of using large-diameter optical fibers compensate their shortcomings, as they are easier to handle, install and couple to the optoelectronic components.



(a)

(b)

Figure 3. Evolution of the crack pattern of the beam under load: (a) Onset of flexural cracking, and (b) Development of secondary crack.

In addition, we focused at the relationship between the applied load and the crack pattern, and the optical signal at the output of the embedded optical fibers. Figure 3 shows two stages of the crack pattern as the vertical load applied to one of the beams increased, while Figure 4 shows the same specimen after reaching its maximum load capacity.

Figure 5 shows the results of monitoring of two concrete beams subjected to vertical load. The plots show the change in normalized amplitude of the output signals of the array of four optical fibers against the total vertical load. Before the onset of the first crack at a load of 1200 kg, there is a slight variation of the signal amplitude of about 1%. This variation may be attributed to small changes in the optical fiber geometry, particularly while the micro-bending of the beam is taking place due to the external load.

The development of said crack resulted in the rupture of the optical fibers and, consequently, a sharp drop in the optical signal. The rupture of the optical fiber was observed for a crack width of 0.5 mm, approximately.

These experiments demonstrate the feasibility of using embedded arrays of conventional optical fibers for the detection of damage in concrete members. The experimental evidence shows that such detection is possible even without using any temporary protection of the optical fibers.

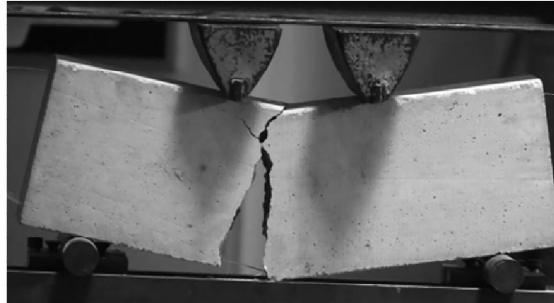


Figure 4. Flexural beam after failure.

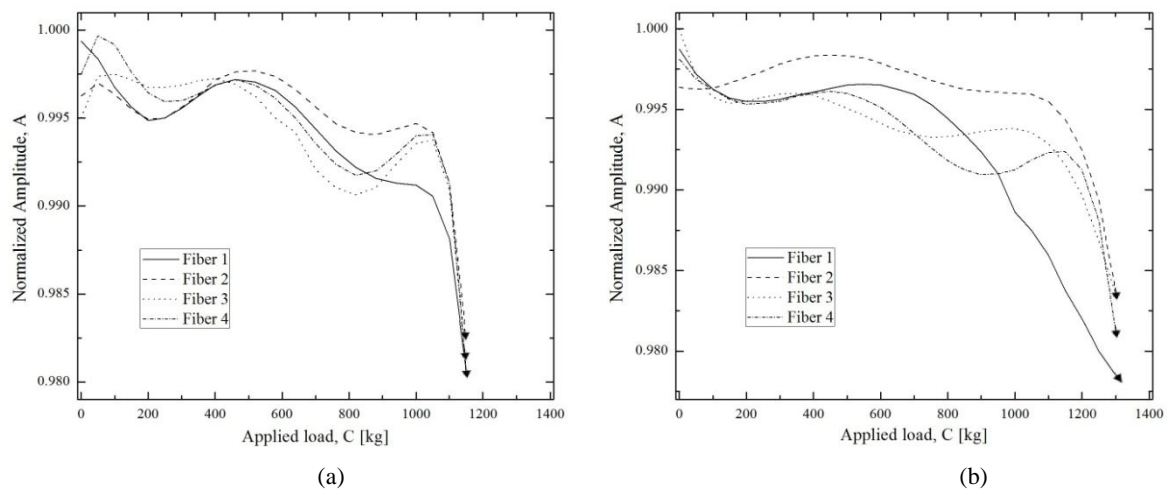


Figure 5. Normalized amplitude of the output of the array of four optical fibers vs. applied load, (a) Beam I, and (b) Beam II.

4. DISCUSSION

The monitoring technique proposed in this paper is of discrete nature, i.e. the optical fiber is either integral or broken. The discrete nature of the method allows for a simple identification of damage and, thus, a reliable monitoring strategy for concrete members. Since the optical fibers of the array are in direct contact with the concrete, and no barrier isolates them from the concrete, the fibers are not shielded from what happens to the concrete, contrary to the situation when permanent protective elements are used.

In this paper, a variety of optical fibers were evaluated in terms of their survival rate and crack detection capabilities. The best type of fiber that matches both criteria is the silica fiber of relatively large diameter (400 to 730 μm). The latter does not mean that small-diameter optical fibers are not suitable for crack detection. However, new protective and installing techniques must be developed to increase their rate of survival during the embedding process. The use of temporary protection for the fibers was shown to be a relatively good measure to increase their survival rate but this technique would be difficult to implement under actual construction conditions.

The accuracy and ability of the system to detect damage on the basis of crack propagation depends largely on the arrangement and the physical location of the optical fibers within the concrete element. The detailed structural analysis will be necessary to determine the best location for the fibers.

One of the advantages of the proposed method lies in its compatibility with existing monitoring technologies and measuring equipment. In particular, this technique can be complemented with a 1-mm resolution OTDR capable of identifying the exact point of rupture of the optical fiber and, hence, the location of the crack inside the concrete element.

5. CONCLUSIONS

The experimental program carried out on concrete elements with embedded optical fibers allowed for the identification of the types of fibers best suited for the structural monitoring of concrete structural members. It was observed that silica optical fibers of large diameter survive their embedment in concrete elements better than small diameter fibers. Also, we designed, developed, fabricated and verified an ad-hoc, easy-to-operate and low-cost optoelectronic equipment for the generation of signals and interrogation of the optical fiber arrays.

We demonstrated that the optical transmission of the optical fibers can be correlated to the damage in a concrete element. The optical fibers ruptured in the exact location of the main crack in the element.

The advantages of the implemented technique over other acoustic, optical and electric methods currently in use include the ease of data processing, the simplicity of interpreting results (being it a discrete system), and the low cost of the monitoring equipment. We expect this monitoring system to have a wide range of applications in structural testing and monitoring. The system is a great promise for the monitoring and automated detection damage in concrete structures that is due to earthquakes and other natural phenomena.

6. ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Institute of Engineering and the Faculty of Engineering of the National Autonomous University of Mexico (UNAM) [joined grant "Monitoring of Crack Development in Concrete Elements with Embedded Arrays of Optical Fibers"] and the General Directorate for Academic Staff Affairs (DGAPA) of UNAM [grant IN117512]. A. B. H. and J. G. T. acknowledge the scholarships provided by the Coordination of Graduate Studies (CEP) of UNAM and the National Science and Technology Council of Mexico (CONACYT), respectively.

REFERENCES

- [1] Mousumi, M., Tarun, K. G., Ashim, K. C., Kamal, D. and Bhattacharya, D. K., "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications," *Sensor Actuat. A-Phys.* 147(1), 150-164 (2008).
- [2] Maalej, M., Ahmed, S. F. U., Kuang, K. S. C. and Paramasivam, P., "Fiber optic sensing for monitoring corrosion-induced damage," *Struct. Health Monit.* 3(2), 165-176 (2004).
- [3] Deif, A., Martín-Pérez, B., Cousin, B., Zhang, C., Bao, X. and Li, W., "Detection of cracks in a reinforced concrete beam using distributed Brillouin fibre sensors," *Smart Mater. Struct.* 19(5), 055014 (2010).
- [4] Wan, K. T. and Leung, C. K. Y., "Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures," *Sensor Actuat. A-Phys.* 135(2), 458-464 (2007).
- [5] Wan, K. T. and Leung, C. K. Y., "Fiber optic sensor for the monitoring of mixed mode cracks in structures," *Sensor Actuat. A-Phys.* 135(2), 370-380 (2007).
- [6] Rossi, P. and LaMaou, F., "New method for detecting cracks in concrete using fiber optics," *Mater. Struct.* 22(6), 437-442 (1989).
- [7] Childs, P., Wong, A. C. L., Terry, W. and Peng, G. D., "Measurement of crack formation in concrete using embedded optical fibre sensors and differential strain analysis," *Meas. Sci. Technol.* 19(6), 065301 (2008).
- [8] Kesavan, K., Ravisankara, K., Parivallala, S., Sreeshylama, P. and Sridhara, S. "Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete," *Meas.* 43(2), 157-163 (2010).