



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

TECNOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA EN LA INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL INDUSTRIAL

Eliú Mizraim Hernández Pérez

Asesorado por el Ing. José Anibal Silva de los Ángeles

Guatemala, julio de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**TECNOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA EN LA
INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL INDUSTRIAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA

POR

ELIÚ MIZRAIM HERNÁNDEZ PÉREZ

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ANIBAL SILVA DE LOS ÁNGELES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JULIO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

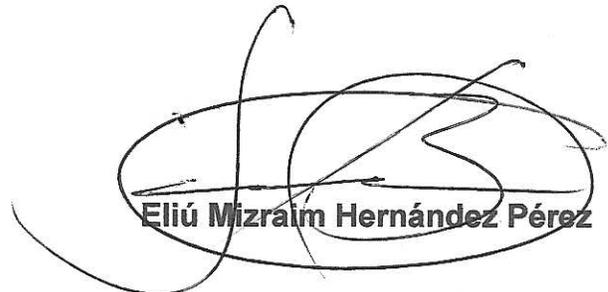
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. José Anibal Silva de los Ángeles
EXAMINADOR	Ing. Milton Alexander Fuentes Orozco
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

TECNOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA EN LA INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL INDUSTRIAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 27 de noviembre de 2017.



Eliú Mizraim Hernández Pérez

Guatemala 02 de marzo de 2018

Ingeniero
Saúl Cabezas Durán
Coordinador de Área de Potencia.
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación Titulado: **TECNOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA EN LA INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL INDUSTRIAL**, estudiante; Eliú Mizraim Hernández Pérez, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
JOSE ANIBAL SILVA DE LOS ANGELES
ING. ELECTRONICO
COLEGIADO No. 5067

José Anibal Silva de los Angeles
Ingeniero Electrónico
Colegiado No. 5067



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 32.2018.
24 DE ABRIL 2018.

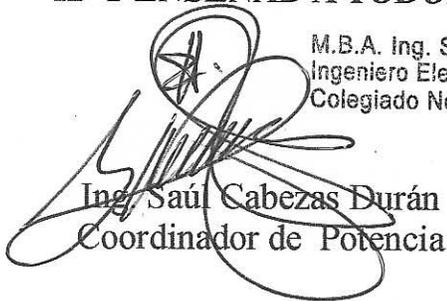
Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**TECNOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA EN LA
INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL INDUSTRIAL**, estudiante;
Eliú Mizraím Hernández Pérez, que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Saúl Cabezas Durán
Coordinador de Potencia

M.B.A. Ing. Saúl Cabezas Durán
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 4648





REF. EIME 32.2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: **ELIÚ MIZRAIM HERNÁNDEZ PÉREZ** titulado: **TECNOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA EN LA INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL INDUSTRIAL**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andrino González



GUATEMALA, 8 DE MAYO 2018.

Universidad de San Carlos
De Guatemala

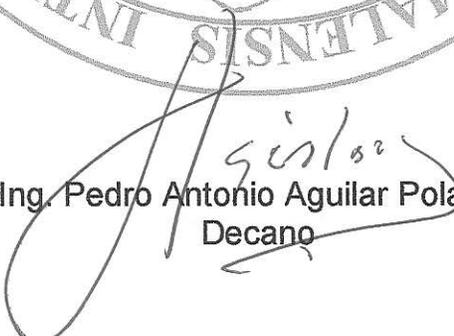


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.D.256.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **TECNOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA EN LA INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL INDUSTRIAL**, presentado por el estudiante universitario: **Eliú Mizraim Hernández Pérez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, julio de 2018

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Ser supremo y poderoso, dador de todo don perfecto que desciende de lo alto, le doy las infinitas gracias por permitir culminar una meta más en mi vida, sin la ayuda de él nunca hubiese sido posible estar hasta aquí.

Mis padres

Lic. Pedro Hernández y Licda. Silvia Berena Pérez Barrios, por brindarme su apoyo en todos estos años de lucha y trabajo constante. Sin duda son para mí un ejemplo de perseverancia. Gracias por confiar en mí.

Mis hermanas

Dra. Loida Eunice Hernández Pérez y Zabdi Jocabed Hernández Pérez, por acompañarme en cada momento y brindarme su apoyo en este proceso formativo. Las quiero mucho.

Mi sobrina

Merari Amisadai Martínez Hernández quien, durante la etapa final de mi proceso formativo, me alegró con cada momento que pasamos juntos. Espero algún día estar junto a ti presenciando tu graduación universitaria. A todos los miembros de mi familia les quiero decir: “Cuando te propones con el corazón una meta y luchas por ella se hace posible, lo único que tenemos que hacer es soñar en grande”.

Mi Universidad

Tricentenaria Universidad de San Carlos de Guatemala y a la Facultad de Ingeniería por abrirme las puertas y brindarme tanto conocimiento para formarme como un profesional de la ingeniería: mil gracias.

AGRADECIMIENTO A:

- Facultad de Ingeniería** Por brindarme la oportunidad de adquirir conocimientos y experiencias fundamentales para mi futuro ejercicio profesional.
- Coordinadores y Directores** Profesionales de la ingeniería que con su arduo trabajo y constancia han logrado educar a un sinnúmero de estudiantes, con el único fin de fomentar y crear día con día una Guatemala próspera y sobresaliente.
- Ing. José Anibal Silva** Por su disposición y asesoría de manera desinteresada en la redacción de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. CAPÍTULO I.....	1
1.1. Breve historia de la fibra óptica.....	1
1.2. Propiedades de la fibra óptica	2
1.3. Principios de funcionamiento de la fibra óptica	3
1.3.1. Propagación de las ondas de luz.....	5
1.3.2. Naturaleza ondulatoria de la luz.....	5
1.3.3. Índice de refracción.....	7
1.3.4. Ventajas y desventajas de la fibra óptica.....	9
1.3.5. Características técnicas de la fibra óptica.....	17
1.4. Procesos de fabricación de la fibra óptica	23
1.4.1. Deposición de vapor químico modificado	24
1.4.2. Deposición de vapor axial	25
1.4.3. Método de deposición de vapor externo	27
1.4.4. Método de deposición de vapor químico de plasma ...	28
1.4.5. Etapa de estirado de la preforma.....	28
1.5. Normativa para el uso de la fibra óptica.....	30

1.5.1.	Normativa de componentes estándar del cable de fibra óptica ANSI/TIA/EIA-568-B.3-2000	30
1.5.2.	Cableado de fibra óptica subterráneo y/o aéreo.....	35
2.	CAPÍTULO II.....	39
2.1.	Tipos de fibra óptica	39
2.1.1.	Fibra multimodo.....	39
2.1.2.	Fibra monomodo	40
2.2.	Cable de fibra óptica.....	41
2.2.1.	Instalación y explotación de fibra óptica	42
2.2.2.	Elementos y diseño del cable de fibra óptica.....	42
2.2.3.	Elementos estructurales del cable de fibra óptica	43
2.2.4.	Elementos de refuerzo del cable de fibra óptica.....	43
2.2.5.	Funda de cable de fibra óptica	44
2.2.6.	Pérdida en los cables de fibra óptica	45
2.3.	Empalmes y conectores de cables de fibra óptica	49
2.3.1.	Empalmes de fibra óptica elaborados manualmente (empalmes).....	50
2.3.2.	Empalmes de fibra óptica mediante equipo (conectores).....	51
3.	CAPÍTULO III.....	53
3.1.	Aplicaciones de la fibra óptica	53
3.2.	Comunicaciones a través de fibra óptica.....	54
3.3.	Sensores que utilizan fibra óptica.....	54
3.3.1.	Sensores según la función de la fibra óptica	56
3.3.2.	Sensores según el tipo de modulación	57
3.3.3.	Modulación de amplitud extrínseca por interrupción de luz.....	60

3.3.4.	Sensores de fibra óptica basados en la modulación de la fase	63
3.3.5.	Tipos de interferómetros	65
3.4.	Antecedentes de instrumentación utilizando fibra óptica	68
3.4.1.	Ejemplos de instrumentación de control industrial utilizada en la actualidad.....	69
3.5.	Comparativa de instrumentación de fibra óptica con tecnologías convencionales.....	79
4.	CAPÍTULO IV.....	81
4.1.	Innovación de fibra óptica en instrumentación industrial	81
4.2.	Ventajas de la instrumentación con fibra óptica.....	82
4.3.	Costo-beneficio de la instrumentación que utiliza fibra óptica	82
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	89
	ANEXO	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura básica cableado de fibra óptica.....	3
2.	Reflexión interna total.....	4
3.	Naturaleza ondulatoria de la luz.	7
4.	Ejemplo índice de refracción de la luz.....	8
5.	Ejemplo concepto de ancho de banda	12
6.	Aislamiento eléctrico fibra óptica	16
7.	Fibra óptica con perfil índice de refracción.....	22
8.	Fibra óptica con perfil índice gradual.....	22
9.	Ejemplo apertura numérica	23
10.	Deposición de vapor químico modificado.....	25
11.	Deposición de vapor axial	26
12.	Deposición de vapor extremo.....	27
13.	Deposición de vapor químico plasma.....	28
14.	Estirado de la preforma de fibra óptica.....	29
15.	Rendimiento gradual de cableado de fibra óptica	32
16.	Ejemplos de conectores de cableado de fibra óptica	35
17.	Especificaciones técnicas cableado fibra óptica	37
18.	Ejemplo fibra óptica multimodo y monomodo.....	39
19.	Elementos básicos de un sensor de fibra óptica.	55
20.	Clasificación de los sensores de fibra óptica.....	55
21.	Amplitud por transmisión de los sensores de fibra óptica	57
22.	Rejillas para aumentar sensibilidad de instrumentación.....	58
23.	Modulación amplitud por reflexión.....	59

24.	Modulación por microdeformación	60
25.	Ejemplo fotocelda de fibra óptica	61
26.	Modulación de amplitud por variaciones de fibra óptica	62
27.	Modulación de amplitud por variaciones de fibra óptica	63
28.	Interferómetro de amplitud.....	65
29.	Ejemplo interferómetro Mach-Zehnder.	66
30.	Ejemplo interferómetro Michelson.....	67
31.	Ejemplo interferómetro Fabry-Perot.....	67
32.	Ejemplo interferómetro Sagnac	68
33.	Sensor de temperatura basado en fibra óptica	71
34.	Funcionamiento sensor de temperatura fibra óptica	72
35.	Ejemplo interferómetro Michelson.....	74
36.	Ejemplo interferómetro Michelson.....	76

TABLAS

I.	Descripción velocidad cableado fibra óptica	10
II.	Descripción técnica básica fibra óptica	11
III.	Características técnicas conductores OPGW	17
IV.	Detalle técnico sensor de temperatura basado en fibra óptica	73
V.	Detalle técnico sensor de presión basado en fibra óptica.....	74
VI.	Detalle técnico sensor de posición basado en fibra óptica	76
VII.	Detalle técnico sensor de marcas de color basado en fibra óptica	77
VIII.	Detalle técnico sensor de objetos pequeños basado en fibra óptica	79
IX.	Comparativa instrumentación de fibra óptica vrs. instrumentación de tecnología convencional	80
X.	Comparativa instrumentación de fibra óptica vrs. instrumentación de tecnología convencional	83

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
F.O.	Fibra óptica
Mbps	Megabytes por segundo
Gbps	Gigabytes por segundo
nm	Nanómetros
Mhz	Mega-Hertz
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
MM	Multimodo
SM	Single mode
dB	Decibles
km	Kilómetros
kA	Amperios
kN	Kilo-Newton
lbf	Libras fuerza
psi	Libras por pulgada cuadrada
in	Pulgadas
kPa	Kilo-Pascales
V	Voltios
VDC	Voltios corriente directa

GLOSARIO

Absorción	Una de las propiedades básicas de la luz al incidir sobre un objeto es la absorción. Cuando la luz blanca incide sobre un cuerpo, este absorbe total o parcialmente una parte del espectro y refleja o transmite (según sea opaco o transparente) una determinada gama de longitudes de onda, que constituyen su color.
Atenuación	Reducción significativa de una onda que transporta energía o información a través de un medio previsto y dimensionado para este fin.
Axial	La simetría axial (también llamada rotacional, radial o cilíndrica) es la simetría alrededor de un eje.
Conductividad	Propiedad natural de los cuerpos que permiten el paso a través de sí del calor o la electricidad, propiedad directamente ligada con la capa de valencia del elemento en cuestión.

Deposición

Es un proceso termodinámico en el cual un gas se transforma en un sólido. También conocido como desublimación o sublimación inversa. El proceso inverso de la deposición es la sublimación. La deposición libera energía y es un cambio de fase exotérmico.

Dieléctrico

Material que no permite el paso a través de sí del calor o la electricidad con facilidad, como los conductores. Provee así de un material para usos de protección para el campo eléctrico.

Difracción

Fenómeno por el cual se produce una desviación de los rayos luminosos cuando atraviesan por un cuerpo opaco o por una abertura de diámetro menor o igual que la longitud de onda.

Empalme

También llamado enlace de cableado eléctrico, es la unión de dos o más cables de una instalación eléctrica o dentro de un aparato o equipo electrónico.

También se le dice empalme a la unión de dos terminaciones de fibra óptica con el fin de transportar el haz luminoso que contiene la información por trasladar.

Extrusión

De raíces latinas, la voz “extrusión”, “extrusiónis” quiere decir forzamiento. Otras fuentes exponen que viene del latín “extrudere” que significa expulsar. De forma general, extrusión es la acción y el efecto de extrudir; más específicamente puede definirse como aquel proceso de prensado, modelado y conformado de una determinada materia prima para crear ciertos objetos con cortes transversales definidos y fijos, por medio de un flujo continuo con presión, tensión o fuerza.

Hebra

Trozo pequeño de un material determinado. Se caracteriza principalmente por tener dimensiones muy pequeñas.

Interferencia

Alteración o perturbación del transporte de una onda lumínica a través de la interposición de otra que puede llegar a resultar un obstáculo. La interferencia ocurre cuando dos o más ondas coinciden y se suman sus efectos. Estos pueden ser constructivos o destructivos, de acuerdo con el punto de la onda donde se encuentren. La interferencia constructiva ocurre cuando las ondas lumínicas se encuentran en los puntos donde coinciden las dos crestas; por lo tanto, se suman las frecuencias de onda.

Interferómetro

Un interferómetro es un dispositivo que utiliza franjas de interferencia para llevar a cabo medidas precisas de distancia u otra dimensión por medir.

Intrínseca

Intrínseco es un término utilizado frecuentemente en Filosofía para designar lo que corresponde a un objeto por razón de su naturaleza y no por su relación con otro.

Lumínica

La energía lumínica o luminosa hace referencia a la energía y/o información que se transporta a través de las ondas luminosas.

Modulación

Término que engloba el conjunto de técnicas que se usan para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal u onda electromagnética.

Plasma

Estado plasmático. En física y química el plasma es un estado de la materia en el que prácticamente todos los átomos están ionizados y con la presencia de una cierta cantidad de electrones libres, no ligados a ningún átomo o molécula. Es un fluido, formado por electrones, e iones positivos.

Polarización

La polarización electromagnética es un fenómeno que puede producirse en las ondas electromagnéticas, como la luz, por el cual el campo eléctrico oscila solo en un plano determinado, denominado plano de polarización.

Este puede definirse por dos vectores, uno de ellos paralelo a la dirección de propagación de la onda y otro perpendicular a esa misma dirección, el cual indica la dirección del campo eléctrico. En una onda electromagnética no polarizada, al igual que en cualquier otro tipo de onda transversal sin polarizar, el campo eléctrico oscila en todas las direcciones normales a la dirección de propagación de la onda.

Las ondas longitudinales, como las ondas sonoras, no pueden ser polarizadas porque su oscilación se produce en la misma dirección que su propagación.

Refracción

Cambio de dirección de un rayo de luz u otra radiación que se produce al pasar oblicuamente de un medio a otro de distinta densidad o índice de refracción.

Tensión

Estado de un cuerpo sometido a esta acción.

RESUMEN

El constante y rápido cambio en las tecnologías para realizar la medición o monitoreo de parámetros o variables en un sistema de control industrial, aunado a mejorar la respuesta de los sistemas de control ante mínimos cambios en las variables monitoreadas, ha centrado la atención en la utilización de materiales que, debido a sus múltiples propiedades, son adecuados para implementar la instrumentación en los sistemas de control actuales.

La fibra óptica es uno de los materiales de ingeniería que, debido a sus múltiples propiedades, es utilizada en la fabricación e implementación de diversos instrumentos para los sistemas de control industrial. Presenta grandes ventajas versus la instrumentación que comúnmente suele emplearse en el monitoreo de parámetros industriales. Es por ello que un conocimiento sólido de las propiedades y ventajas de la fibra óptica incrementará considerablemente las opciones en la instrumentación industrial que será utilizada por el personal técnico o ingenieros, al diseñar un sistema de control. Se tendrá la certeza que al implementar la instrumentación fabricada con fibra óptica, esta responderá ante situaciones de gran exigencia, proveyendo de versatilidad, confiabilidad y rápida respuesta al sistema de control que se está desarrollando. Esta investigación dará al lector una opción más certera y viable en el uso de instrumentación de control con fibra óptica como material principal para medir el parámetro de interés. De esta manera se extraerá el máximo provecho de sus múltiples ventajas, que más adelante serán tratadas a detalle, para así entregar un valor agregado al sistema que esté en proceso de implementar con la óptima selección de la instrumentación.

OBJETIVOS

General

Brindar un panorama amplio en el uso moderno de la instrumentación de control industrial con fibra óptica para monitorear los parámetros o variables en sistema de control Industrial. Para ello se abordarán desde los principios básicos de funcionamiento de dicha tecnología, se analizará a detalle y se estudiará de manera paralela algunas de las características más relevantes de dicha instrumentación. Asimismo, se brindarán ejemplos de instrumentación que utiliza ya la tecnología de fibra óptica y se comparará con la instrumentación comúnmente utilizada, para dar el lector un idea clara de las ventajas que puede obtener con la fibra óptica en el sistema de control industrial.

Específicos

1. Entregar una base clara y concisa acerca de las múltiples ventajas de la utilización de instrumentación de control que utilice fibra óptica como medio transductor y, de esta manera, implementar procesos de control más eficientes comparados con los procesos de control que utilizan otro tipo de tecnología y con costo beneficio considerablemente competitivo.
2. Brindar a ingenieros y técnicos vinculados directa o indirectamente al campo de control industrial, una opción de instrumentación con tecnología de vanguardia para la medición de parámetros dentro de los diversos

sistemas de control por implementar, para incrementar así la confiabilidad, robustez y tiempo de respuesta ante pequeñas variaciones en las variables del proceso que se está controlando.

INTRODUCCIÓN

En esta investigación se presenta la información necesaria para entender y conocer el funcionamiento de la fibra óptica (F.O.); además, se hace hincapié en las propiedades de dicho material de ingeniería, las cuales son utilizadas en el control industrial, específicamente en implementar instrumentación de control industrial (*sensores*).

Con el único fin de resaltar los múltiples beneficios de la fibra óptica y entregar criterios claros y concisos del campo de utilización que puede dársele a dicho material en el campo de la instrumentación de control industrial, el presente documento resalta los aspectos más sobresalientes de la fibra óptica, dada la constante necesidad de incrementar la capacidad de los sistemas de control industrial relacionado con tiempo de respuesta ante las perturbaciones externas, exactitud, precisión, robustez, confiabilidad, entre otras, así como reducir el tiempo y costo de fabricación de instrumentación utilizada en los sistemas de control industrial. Todas estas necesidades han propiciado el desarrollo de nuevas tecnologías en el mundo, precisamente en la implementación de fibra óptica para fabricar instrumentación de uso industrial.

Dicha instrumentación es capaz de detectar un amplio número de parámetros de interés en el campo de control industrial. Entre los más comunes están la presión, temperatura, campos magnéticos, detección de objetos muy pequeños, verificación de piezas en áreas de difícil acceso, registro de marcas de color, etc. Uno de los aspectos de importancia de dicha instrumentación es la velocidad a la cual pueden transmitir el parámetro o variable que se está monitoreando. Se asegura así una excelente eficiencia y pronta respuesta ante

los mínimos cambios que pudiesen presentarse en los parámetros de interés dentro del sistema de control industrial.

Las señales ópticas registradas por dicha instrumentación tienen la ventaja que pueden ser de forma analógica o discreta. La instrumentación puede operar con la conversión de la señal óptica-eléctrica o eléctrica-óptica, de acuerdo con los requerimientos del entorno donde se encuentre el parámetro por ser monitoreado.

En la actualidad, la necesidad de incrementar la capacidad de los sistemas de comunicación, reducir el tiempo por cada mensaje, mejorar la seguridad y confiabilidad de la información y la precisión de los sistemas de control industrial, ha propiciado el desarrollo de cientos de operaciones, soluciones incluso de instrumentación utilizando los sistemas de ondas de luz o fibra óptica alrededor del mundo.

La atenuación o pérdida de potencia en la señal, ocasionada por las distancias entre los equipos, los diversos contaminantes que afectan a los sistemas alámbricos de cobre y sobre todo la necesidad de obtener un ancho de banda cada vez mayor, han dado paso libre al desarrollo y utilización de la tecnología de transmisión de voz, datos y video y demás información importante en el área industrial a través de ondas de luz, con fibras ópticas como medio de propagación.

1. CAPÍTULO I

1.1. Breve historia de la fibra óptica

El primer intento de utilizar la luz para transmitir información fue realizado por Alexander Graham Bell, en el año 1880. Él utilizó un haz de luz para llevar información, pero mediante este intento fallido se evidenció que la transmisión de las ondas de luz —sin tener un medio adecuado y dedicado para la transmisión— no es práctica debido a un sinnúmero de factores que interfieren en la óptima manera de transmisión. Pero este experimento abrió el camino y se ha buscado desde entonces la forma de transmitir los haces de luz usando una línea de transmisión de alta confiabilidad que no reciba perturbaciones desde el exterior. Así, en poco más de 10 años la fibra óptica se ha convertido en una de las tecnologías más avanzadas como medio de transmitir información, principalmente. Este novedoso material revolucionó los procesos de las telecomunicaciones y transmisión de haces de luz en todos los sentidos, desde lograr una mayor velocidad en la transmisión hasta disminuir casi totalmente los ruidos e interferencias en los medios de comunicación y en sistemas de control industrial. Está revolucionando el campo de la instrumentación para procesos automatizados.

La fibra óptica es una varilla delgada y flexible de vidrio u otro material transparente con un índice de refracción alto, constituido de material dieléctrico (no tiene conductividad, como vidrio y plástico). Es capaz de concentrar, guiar y transmitir la luz con muy pocas pérdidas, incluso cuando este curvada. Está formada por dos cilindros concéntricos; el interior es llamado núcleo (se construye con requisitos menos rigurosos). Ambos tienen diferentes índices de

refracción (η_2 del revestimiento es de 0,2 a 0,3% inferior al del núcleo η_1). Comparado con el sistema convencional de cables de cobre, la atenuación de sus señales (decremento o reducción de la onda o frecuencia) es de tal magnitud que requiere de repetidores cada dos kilómetros para regenerar la transmisión.

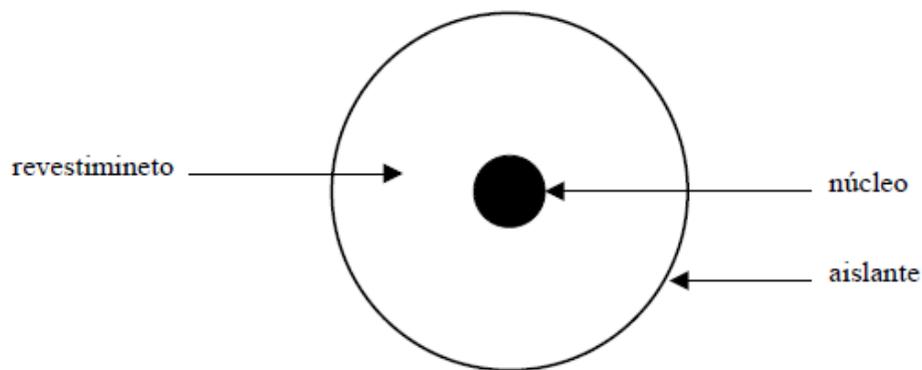
En el sistema de fibra óptica se pueden instalar tramos de hasta 70 km sin que haya necesidad de recurrir a repetidores, lo que también hace más económico y de fácil mantenimiento este material.

1.2. Propiedades de la fibra óptica

La fibra óptica es una hebra muy fina construida de material transparente, vidrio o materiales plásticos; físicamente puede ser de solamente 125 micras de diámetro. Esta hebra tiene aproximadamente el mismo grosor que un cabello humano. Se ha demostrado que las ondas electromagnéticas que conforman la luz tienden a viajar a través de una región que posea un índice de refracción alto; por eso se fabrica el centro de la fibra óptica de material transparente, vidrio o materiales plásticos. Se sabe que algunas fibras de vidrio tienen un diámetro de núcleo de únicamente 50 micras y un índice de refracción de tipo gradual. La importancia de un núcleo de este tipo es que posea un ancho de banda algo mayor que el que tendría otro cuyo índice de refracción fuera idéntico en todas partes. Alrededor del núcleo y con el fin de retener la luz dentro de él se necesita recubrirlo con algún tipo de material con un índice de refracción diferente. Si no se recubre no se obtendrán las reflexiones necesarias en la unión de ambos materiales, principio fundamental para la transmisión de los haces luz a través de fibra óptica (reflexión interna total).

De este modo se ha formado otro revestimiento en el núcleo que se denomina cubierta (silicona) y que tiene un índice de refracción menor que el del propio núcleo, necesario para la transmisión de los haces de luz. Finalmente, para hacerlo más robusto y prevenir daños a la cubierta, se suele contar con una protección o envoltura (poliuretano) sobre la cubierta que generalmente es de algún tipo de material plástico.

Figura 1. **Estructura básica cableado de fibra óptica**



Fuente: Ley de Snell. https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Snell. Consulta: 10 de diciembre de 2017

1.3. **Principios de funcionamiento de la fibra óptica**

La refracción es el cambio de dirección y velocidad que experimenta una onda al pasar de un medio de transmisión a otro con distinto índice de refracción. Este principio solo es aplicable si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos.

Al cumplir este principio de reflexión interna total, la luz puede transmitirse a largas distancia reflejándose miles de veces.

1.3.1. Propagación de las ondas de luz

En física, una onda consiste en la propagación de una perturbación de alguna propiedad del espacio; por ejemplo, densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético, e implica un transporte de energía sin transporte de materia. El espacio perturbado puede contener materia (aire, agua, entre otros) o no (vacío). La magnitud física cuya perturbación se propaga en el medio, se expresa como una función tanto de la posición como del tiempo $f(x, t)$.

1.3.2. Naturaleza ondulatoria de la luz

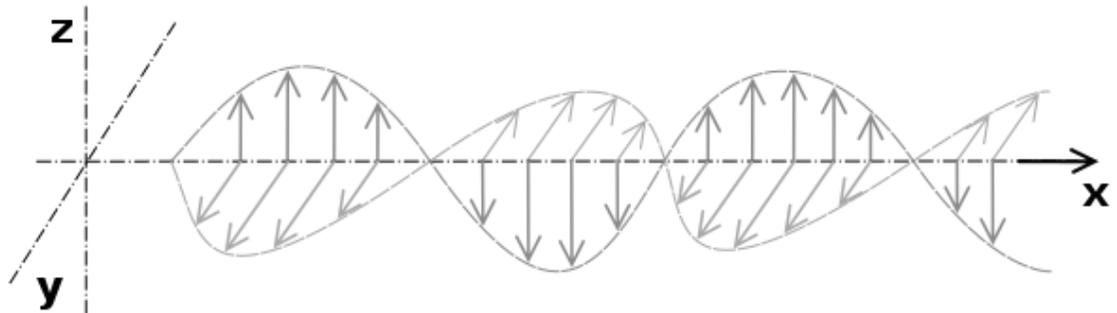
A principios del siglo XVIII era creencia generalizada que la luz estaba compuesta de pequeñas partículas y fenómenos como la reflexión, la refracción y las sombras de los cuerpos, que no tenían una correcta explicación científica. Isaac Newton demostró que la refracción estaba provocada por el cambio de velocidad de la luz al cambiar de medio y trató de explicarlo afirmando que las partículas incrementaban su velocidad al aumentar la densidad del medio. La comunidad científica, consciente del prestigio de Newton, aceptó su teoría en ese momento de la historia.

En 1768, Christian Huygens propuso la teoría que la luz era un fenómeno ondulatorio que se transmitía a través de un medio llamado éter. Esta teoría quedó olvidada hasta la primera mitad del siglo XIX, cuando Thomas Young fue capaz de explicar el fenómeno de las interferencias asumiendo que la luz fuese

en realidad una onda. Otros estudios de la misma época explicaron fenómenos como la difracción y la polarización, considerando la teoría ondulatoria. En 1848 —cuando se consiguió medir la velocidad de la luz en diferentes medios y se encontró que variaba de forma totalmente opuesta a como lo había supuesto Newton— casi todos los científicos aceptaron que la luz tenía una naturaleza ondulatoria. Sin embargo, todavía quedaban algunos puntos por explicar como la propagación de la luz a través del vacío, ya que todas las ondas conocidas se desplazaban usando un medio físico y la luz viajaba incluso más rápido que en el aire o el agua. Se suponía que este medio era el éter del que hablaba Huygens, pero nadie lo conseguía encontrar.

En 1845, Michael Faraday descubrió que el ángulo de polarización de la luz se podía modificar aplicándole un campo magnético (efecto Faraday). Dos años más tarde propuso que la luz era una vibración electromagnética de alta frecuencia. James Clerk Maxwell, inspirado por el trabajo de Faraday, estudió matemáticamente estas ondas electromagnéticas y se dio cuenta de que siempre se propagaban a una velocidad constante, que coincidía con la velocidad de la luz, y que no necesitaban medio de propagación ya que se autopropagaban. La confirmación experimental de las teorías de Maxwell eliminó las últimas dudas sobre la naturaleza ondulatoria de la luz. La teoría ondulatoria de la luz desarrollada por Christian Huygens considera que la luz es una onda electromagnética, consistente en un campo eléctrico que varía en el tiempo y genera a su vez un campo magnético y viceversa. Afirma que los campos eléctricos variables generan campos magnéticos (ley de Amper) y los campos magnéticos variables generan campos eléctricos (ley de Faraday). De esta forma, la onda se autopropaga indefinidamente a través del espacio, con campos magnéticos y eléctricos que se generan continuamente. Estas ondas electromagnéticas son sinusoidales, con los campos eléctrico y magnético perpendiculares entre sí y respecto a la dirección de propagación.

Figura 3. **Naturaleza ondulatoria de la luz**



Fuente: Naturaleza ondulatoria de la luz. <https://es.wikipedia.org/wiki/Luz>. Consulta: 11 de diciembre de 2017

Algunos de los fenómenos más importantes de la luz se pueden comprender si se considera que esta tiene un comportamiento ondulatorio; por ejemplo, principio de superposición de ondas, interferencia, difracción, refracción, polarización.

1.3.3. Índice de refracción

Físicamente, el índice de refracción se produce cuando la luz pasa de un medio de propagación a otro con una densidad óptica diferente, experimenta un cambio de rapidez y de dirección si no incide perpendicularmente en la superficie. Esta desviación en la dirección de propagación se explica por medio de la ley de Snell.

Figura 4. **Ejemplo índice de refracción de la luz**



Fuente: Ejemplo índice de refracción.

http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3236/html/21_ndice_de_refraccin.html. Consulta: 11 de diciembre de 2017.

Matemáticamente, se denomina índice de refracción al cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio cuyo índice se calcula.

Ecuación 2. Refracción de un haz de luz

$$n = \frac{c}{v}$$

Donde:

c: velocidad de la luz en el vacío

v: velocidad de la luz en el medio cuyo índice se calcula (agua, vidrio, etc.).

n: índice de refracción del medio

El índice de refracción de un medio es una medida para conocer cuánto se reduce la velocidad de la onda (ondas tales como ondas acústicas, electromagnéticas) dentro del medio por el cual se transporta la onda.

1.3.4. Ventajas y desventajas de la fibra óptica

Las fibras ópticas han sido utilizadas ampliamente como un medio de transmisión para redes de comunicaciones de datos y redes de área local (conocidas por sus siglas en inglés LAN, *Local Area Network*) durante muchos años.

Ahora son introducidas en el campo de control industrial para satisfacer las necesidades que los sistemas de control imponen en cuando a robustez, velocidad de respuesta, aislamiento eléctrico y un sinnúmero de propiedades que se abordarán a lo largo de este trabajo de graduación.

Dichas propiedades son importantes y de ellas se extrae el mayor beneficio en el campo de la instrumentación de control industrial. En virtud de su poco peso, tamaño compacto, ancho de banda, robustez y adaptabilidad, las fibras ópticas son muy adecuadas para ser utilizadas en la fabricación de instrumentación para sistemas de control industrial.

Sin embargo, esta tecnología es relativamente nueva en la industria de control y trae con ella un conjunto nuevo de problemas y desafíos en su implementación en el campo de instrumentación industrial.

Dentro de las ventajas de la fibra óptica se puede mencionar las siguientes:

- Transmisión de datos a alta velocidad (poco tiempo de respuesta).
- La velocidad de transmisión de fibra óptica se puede observar en la tabla I.

Tabla I. Descripción velocidad cableado fibra óptica

Variante Eth.	Velocidad	Medio	Distancia
100Base-Fx	100 Mbps	f.o. MM OM1 1300nm	2 km
100Base-Lx	100 Mbps	f.o. SM 1310 nm	15 km
1000Base-Sx	1 Gbps	f.o. MM OM2 850 nm	500 m
1000Base-Lx	1 Gbps	f.o. MM OM1/OM2 1300 nm	500 m
1000Base-Lx	1 Gbps	f.o. SM 1320 nm	10 km
1000Base-Zx	1 Gbps	f.o. SM 1550 nm	80 km
10GBase-SR/SW	10 Gbps	f.o. MM OM3 850 nm	300m
10GBase-LR/LW	10 Gbps	f.o. SM 1310 nm	10 - 25 km
10GBase-Er/Ew	10 Gbps	f.o. SM 1550 nm	40 – 80 km

Fuente: elaboración propia.

- Amplio ancho de banda (ver apartado 1.3.4.1.).
- El cable fibra óptica, al ser muy delgado y flexible, es mucho más ligero y ocupa menos espacio.
- La materia prima para fabricarlo es abundante en la naturaleza.
- Compatible con la tecnología digital.
- Gran seguridad. La intrusión en una fibra óptica es fácilmente detectable, por el debilitamiento de la energía luminosa en la recepción; además, no radia ningún tipo de energía peligrosa, lo que es particularmente interesante para aplicaciones que requieren alto grado de confidencialidad.
- Resistencia al calor, frío y a la corrosión.

A continuación, se listan algunas características del cableado de fibra óptica que resumen las ya mencionadas.

Tabla II. **Descripción técnica básica fibra óptica**

Especificaciones técnicas			
Tipo de fibra	62,5/125m 850/1300nm	50/125m 850/1300nm	Sm 1310/1550nm
Atenuación máxima	3,5/1,0	3,5/1,5	0,5/0,4
Atenuación típica	3.0/1.0	3,0/1,0	0,4/0,3
Ancho de banda mínima (LED MHz/km)	200/500	500/500	----
Ancho de banda modal efectivo mínimo	---	510/-	----
Radio mínimo de curvatura			
Temperatura de funcionamiento	-40° a 70° C		
Temperatura de operación	-10° a 50° C		
Estándares industriales	NOM-001-SEDE, NMX-I-237 NYCE, ANSI/ICEA S83-596, NMX-I-NYCE-248-2005		

Fuente: elaboración propia.

- Se puede agrupar varios cables de fibra óptica y crear un solo grupo que transporte grandes cantidades de tráfico, de forma inmune a las interferencias electromagnéticas.
- Insensibilidad a la interferencia electromagnética debido al material con el cual están construidas las fibras (materiales no conductores de corriente eléctrica).

Desventajas

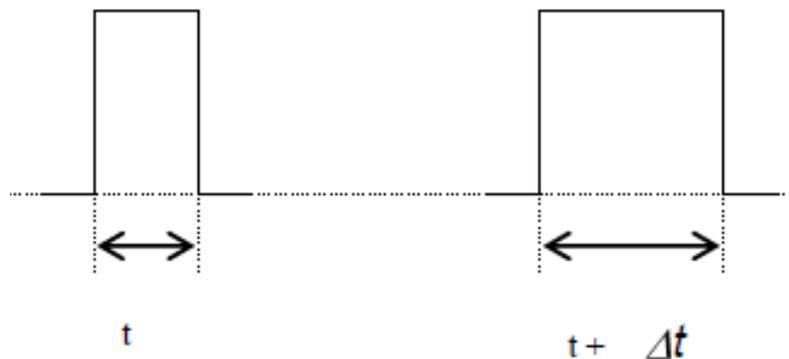
- El costo de la instrumentación e instalación es elevado (ver tabla X).
- Fragilidad de las fibras.

- Los diminutos núcleos de los cables deben alinearse con extrema precisión al momento de empalmar, para evitar una excesiva pérdida de señal.
- Dificultad de reparar un cable de fibra roto.
- La especialización del personal encargado de realizar las soldaduras y empalmes.

1.3.4.1. Ancho de banda

El ancho de banda constituye una medida del comportamiento dispersivo de la luz que se transmite a través de la fibra óptica. Cuando a un cable de fibra óptica se le inyecta un pulso que está modulado —debido a la mezcla de modos y a medida que se propaga a lo largo del conductor— se ensancha gradualmente e incrementa su duración a causa de la dispersión. Ese ensanchamiento que se produce disminuye el espacio para transmitir otras señales (demora el viaje de la señal).

Figura 5. Ejemplo concepto de ancho de banda



Fuente: Ejemplo concepto de ancho de banda.

http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3236/html/21_ndice_de_refraccin.html. Consulta: 12 de diciembre.

Para determinar el ancho de banda de un cable de fibra óptica se mide la potencia lumínica que llega al extremo receptor de un conductor de fibra óptica al cual se ha inyectado en su inicio —por medio de un transmisor— una potencia lumínica modulada en amplitud con una frecuencia (f_m) que se incrementa continuamente. Con los resultados de estas mediciones y las expresiones precedentes se puede calcular el ancho de banda. Este método es muy apto para la medición en conductores de fibra óptica ya instalados.

Según el estándar internacional ISO/IEC 11801, el cual especifica sistemas de cableado para telecomunicación multipropósito —cableado estructurado que es utilizable para un amplio número de aplicaciones (análogas, estándares de comunicación de datos, construcción de sistemas de control, automatización industrial)—, las fibras multimodo se clasifican de la siguiente manera.

OM1. Fibra multimodo con núcleo de vidrio y 62,5 micrones de diámetro. Ancho de banda de 200 Mhz y atenuación de 3,5 dB en longitud de onda de 850 nm.

OM2. Fibra multimodo con núcleo de vidrio y 50 micrones de diámetro. Ancho de banda de 500 Mhz y atenuación de 3,5 dB de longitud de 850nm.

OM3. Fibra multimodo optimizada con núcleo de vidrio y 50 micrones de diámetro. Ancho de banda de 1500 Mhz y atenuación de 3,5 dB en longitud de onda de 850nm.

OM4. Estándar utilizado por TIA (*Telecommunications Industry Association*) pero sin adoptar por ISO (*International Organization for Standardization*). Fibra multimodo optimizada de núcleo de vidrio que permite transportar 10 Gigabit Ethernet hasta 550 metros.

Una fibra monomodo tiene habitualmente un núcleo de 9 micras y una cubierta de 125 micras de diámetro.

Sus principales ventajas son el ancho de banda muy amplio y bajo nivel de atenuación. Es utilizado normalmente para aplicaciones de larga distancia. El estándar IEC 60793-1-40 la clasifica de la siguiente manera:

G.652. Para transmisión de Ethernet Gigabit y 10 Gigabit, la denominación OS1 es cubierta por las fibras tipo de G652a, b, c y d. La fibra tipo OS2 fija características para las longitudes de onda 1310nm 1550nm y 1383nm.

G.655. Fibra de dispersión no nula, optimizada para aplicaciones de larga distancia a 1550nm. Sus características se fijan a 1550nm y 1625nm, por lo que puede ser utilizada para multiplexación.

G656. Fibra con dispersión desplazada no nula. Optimizada para aplicaciones de banda ancha, sus características se fijan entre 1460nm y 1525nm. Está especialmente indicada para aplicaciones de multiplexación.

G.657. Fibra óptica con características especiales para su aplicación en FTTx (alta resistencia a la humedad y a las macrocurvaturas) permite la transmisión a 1310, 1490, 1550nm.

Las fibras ópticas monomodo descritas deben cumplir con los estándares siguientes: IEC 60793250, UIT G.652B, Telcordia GR20CORE.

1.3.4.2. Bajas pérdidas

En el campo de la comunicación mediante fibra óptica, las pérdidas se traducen como una reducción de la potencia promedio que llega al receptor. Se puede explicar como la pérdida de potencia óptica cuando la luz viaja a largas distancias dentro de un medio de transmisión. Se define como la relación de la potencia óptica de entrada (P_i) y la potencia de salida óptica (P_o). La unidad para medir las pérdidas de un sistema de transmisión de fibra óptica es *db/km*.

Existen diferentes tipos de pérdidas que se debe tomar en cuenta en la utilización de fibra óptica, dentro de las cuales se puede mencionar:

- Pérdidas por absorción
- Pérdidas por dispersión
- Pérdidas por dispersión no lineales
- Pérdidas por flexión y/o pérdidas en uniones (conectores)

1.3.4.3. Inmunidad a la interferencia electromagnética

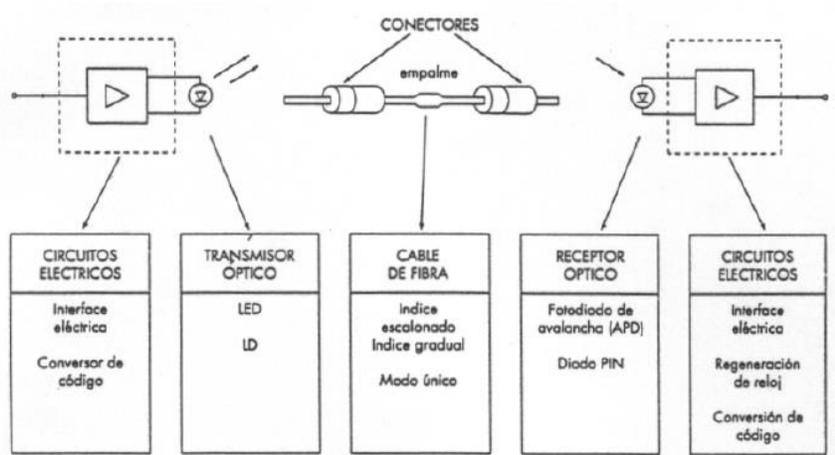
Debido a que la fibra óptica únicamente transporta haces de luz y está fabricada con materiales aislantes, es totalmente inmune a las ondas electromagnéticas externas (descargas electroatmosféricas, cableados de alta tensión). Esta característica es una de las propiedades más relevantes de la instrumentación que utiliza fibra óptica como elemento transductor, ya que puede ser instalada en cualquier ambiente hostil y no presentar ningún inconveniente debido a inducciones electromagnéticas indeseadas.

1.3.4.4. Aislamiento eléctrico

Una de las principales ventajas de un cable de fibra óptica en su funcionamiento continuo es la seguridad en cuanto a manipulación y manejo por el personal técnico o de ingeniería al efectuar mantenimientos o modificar alguna instalación de este tipo, debido a que está fabricada de materiales dieléctricos; es decir, por ella no circula corriente eléctrica. Debido a esta particularidad de su funcionamiento se elimina el riesgo de descarga eléctrica.

La información se transmite mediante impulsos de luz aislando totalmente el cableado de fibra óptica de los sistemas energizados. A continuación se ilustra la estructura básica del sistema de emisión/recepción de haces de luz, el cual hace posible el aislamiento eléctrico del cableado de fibra óptica.

Figura 6. **Aislamiento eléctrico fibra óptica**



Fuente: Aislamiento eléctrico fibra óptica.

http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3236/html/21_ndice_de_refraccin.html. Consulta: 12 de diciembre de 2017.

Principalmente, el sistema de transmisión/recepción se compone de:

- Circuitos eléctricos transmisor de haces de luz
- Transmisores ópticos (led, laser) y cable de fibra óptica
- Receptor óptico y circuito eléctrico transductor de señales ópticas

Uno de los claros ejemplos del excelente aislamiento eléctrico, elevada rigidez dieléctrica y/o inmunidad a las interferencia de campo eléctrico o magnético que presenta la fibra óptica, es su utilización en la protección de línea de transmisión eléctrica de alta y extra alta tensión, específicamente, en la utilización del cable tipo OPGW (*Optical Ground Wire*).

Este es utilizado para las comunicaciones entre subestaciones eléctricas; es, básicamente, un hilo de guarda con cables de fibra óptica en su interior para la tarea de comunicación. A continuación se presenta las características técnicas de uno de los tipos de cables más utilizados para la protección de líneas eléctricas aéreas. Según la norma *IEC 60794-4-10 Areal optical cables along electrical power lines*, se brinda los datos siguientes para entender mejor las características eléctricas del cable de guarda con fibra óptica OPGW para 11kA de corriente de cortocircuito. Este conductor se ajusta al estándar 1138 (2009) del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE).

Tabla III. **Características técnicas conductores OPGW**

Características conductores OPGW		
	Heavy OPGW	Ligth OPGW
Diámetro exterior del conductor	20mm	2100mm
Peso del conductor instalado	1000 kg/km	400 kg/km
Diámetro de curvatura	600mm	300mm
Fuerza máxima para instalación	70kN	20kN
Fuerza de rotura	160kN	50kN
Resistencia eléctrica DC	0,4 ohm/km	1,4 ohm/km
Corriente de cortocircuito instantánea	14kA	3,7kA
Coefficiente de elongación térmica	13,5x10-6/K	13,5x10-6/K
Número de fibras	144	48

Fuente: elaboración propia.

1.3.5. Características técnicas de la fibra óptica

La fibra es un medio de transmisión de información analógica o digital. Las ondas electromagnéticas viajan en el espacio a la velocidad de la luz. Básicamente, la fibra óptica está compuesta por una región cilíndrica denominada núcleo, por la cual se efectúa la propagación de los haces de luz, y por una zona externa al núcleo y coaxial con él, totalmente necesaria para que

se produzca el mecanismo de propagación, que se denomina envoltura o revestimiento. La capacidad de transmisión de información que tiene una fibra óptica depende de dos características técnicas fundamentales:

- Diseño geométrico de la fibra
- Propiedades de los materiales empleados en su elaboración (*diseño óptico*)

Una característica técnica importante en el cableado de fibra óptica son las dimensiones más reducidas que los medios preexistentes. Un cable de 10 fibras tiene un diámetro aproximado de 8 o 10 mm y proporciona la misma o más información que un coaxial de 10 tubos. Además de su reducido peso comparado con los cables metálicos —lo que facilita la instalación— posee una gran robustez al trabajar en entornos hostiles, propiedad de mucho interés técnico en la utilización de fibra óptica. Esta propiedad se debe a que el sílice (material con el que principalmente se fabrica la fibra óptica) tiene un amplio margen de funcionamiento en cuanto a temperatura, pues funde a 600° C. La fibra óptica presenta un funcionamiento uniforme desde -550 °C a +125 °C sin degradación de sus características técnicas y de transmisión de ondas de luz. Estas características se ordenarán en tres grandes grupos (mecánicas, eléctricas y ópticas) para resaltar los beneficios y debilidades de dicho material cuando es empleado en el campo al cual está enfocando esta investigación, específicamente, la instrumentación de control industrial.

1.3.5.1. Características mecánicas

Las propiedades mecánicas de los materiales sólidos son las que se manifiestan cuando se aplica una fuerza. Se refieren a la capacidad de los mismos de resistir acciones de cargas o fuerzas que actúan momentáneamente.

La fibra óptica es un elemento único debido a las dimensiones y el tipo de material con el cual está elaborada. Debido a la agresividad del medio ambiente donde comúnmente se encuentra instalada la instrumentación de control industrial, no tiene las características adecuadas de tracción que permitan su utilización directa sin tener algún tipo de recubrimiento o material protector para extender su vida útil. Por tanto, contar con un claro panorama de las características técnicas, físicas y mecánicas de la fibra óptica es de gran importancia al momento de ser empleada en sistema de control industrial. Dentro de las características mecánicas de mayor interés para utilizar dicho material a nivel industrial están las siguientes:

Tensión: determina el grado de resistencia que presenta el material cuando se somete a esfuerzos mecánicos directos (tracción, compresión, corte). Si se excede el límite físico que puede resistir el material se presentará la falla inminente. Un caso particular de falla que presenta este material es que una vez sometido a los esfuerzos descritos se formen microcurvaturas y daños pequeños en el material, sin llegar a romperse, lo que imposibilita de alguna manera la correcta transmisión de señales.

Impacto: todos los materiales utilizados en sistemas de control industrial están predispuestos a sufrir algún tipo de contacto directo. Esta es una de las principales desventajas que presenta la fibra óptica y debe ser una de las principales consignas para las instalaciones de la instrumentación que utilice este material como medio transductor ya que, debido a su fragilidad, el esfuerzo de impacto que presenta es de un grado muy bajo.

Enrollamiento: durante la instalación de instrumentación de control que utilice fibra óptica como medio transductor existe siempre un límite para el ángulo de curvatura que puede dársele a dicho material sin comprometer sus propiedades de transmisión dentro del sistema de control.

Este inconveniente puede ser contrarrestado mediante la correcta selección de un material protector que evite las curvaturas pronunciadas durante la fabricación e instalación de la instrumentación.

Térmicas: es una de las principales características que deben ser tomadas en cuenta en la instrumentación de control industrial, debido a que en la mayoría de los sistemas industrializados las temperaturas elevadas se presentan de manera cotidiana. Aquí es donde radica una de las principales ventajas de la fibra óptica, debido al material con el cual ha sido fabricada presenta un alto grado de resistencia a las elevadas temperaturas. Por tanto, puede ser utilizada y aportar una buena respuesta ante mínimos cambios de las variables que esté monitoreando, a pesar de la temperatura ambiente a la cual es sometida dicha instrumentación.

1.3.5.2. Características eléctricas

Las propiedades eléctricas de los materiales son las particularidades que presentan cuando una corriente eléctrica es conducida o no a través de estos. La fibra óptica formará parte de un sistema de comunicación o de control de industrial como fin primordial de este trabajo de investigación y, por ende, estará ligada a sistemas electrónicos o eléctricos. No se puede dejar de manera aislada las características eléctricas que presenta esta fibra. Muchas de sus cualidades se traducen en ventajas de seguridad para el personal de ingeniería a cargo de manipular los sistemas de control industrial. Dentro de las características eléctricas de fibra óptica se citan las siguientes:

Aislamiento eléctrico: proporciona un total aislamiento entre el emisor y receptor. Permite a esta tecnología estar en lugares muy exigentes sin peligro

de cortocircuitos, a pesar de que sufra daños físicos. Puede ser manipulada por personal técnico sin peligro de una descarga eléctrica.

Menor utilización potencia eléctrica: por sus características de transmisión (bajas pérdidas, ancho de banda, robustez) los principales elementos que convierten la información en haces de luz utilizan considerablemente menor cantidad de potencia eléctrica para desempeñar la misma función que realizaría la instrumentación con otro medio transductor que no fuera fibra óptica.

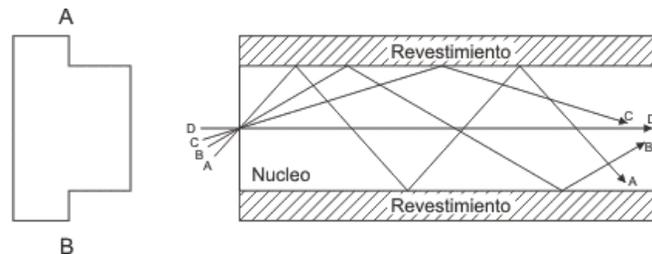
1.3.5.3. Características ópticas

Las propiedades ópticas de la instrumentación de control industrial que utiliza la fibra óptica como elemento transductor son ventajosas ya que permiten optimizar sistemas de control industrial modernos. Las propiedades ópticas son las que principalmente dan lugar a la clasificación según el índice de refracción y la apertura numérica.

Perfil de índice de refracción: es la variación índice conforme se desplaza en la sección transversal de la fibra óptica; es decir, a lo largo del diámetro. Existe el índice escalón y el gradual.

Las fibras de índice escalón o salto de índice (SI) son las que al desplazarse sobre el diámetro AB, el índice de refracción toma un valor constante n_2 desde el punto A hasta el punto donde termina el revestimiento y empieza el núcleo. En ese punto se produce un salto con un valor $n_1 > n_2$, que también es constante a lo largo de todo el núcleo. Este tipo de perfil es utilizado en las fibras monomodo.

Figura 7. **Fibra óptica con perfil índice de refracción**

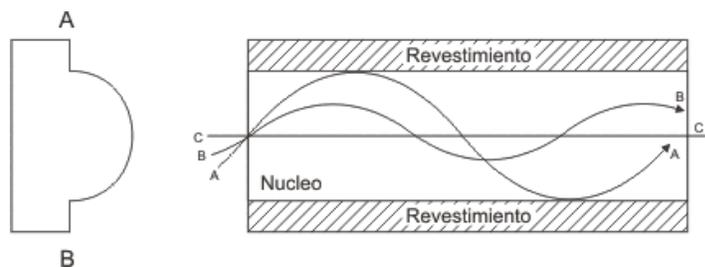


Fuente: Fibra óptica con índice gradual.

http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3236/html/21_ndice_de_refraccin.html. Consulta: 13 de diciembre de 2017.

En las fibras de índice escalón multimodo, la dispersión del haz de luz ocasionado por retardo de los distintos caminos de los modos de propagación limita el ancho de banda. En las fibras de índice gradual, el índice de refracción n_2 es constante en el revestimiento, pero en el núcleo varía gradualmente (en forma parabólica) con un máximo en el centro del núcleo. Este tipo de perfil es utilizado en las fibras multimodo porque disminuye la dispersión de las señales al variar la velocidad para las distintas longitudes de los caminos en el centro y próximos a la frontera.

Figura 8. **Fibra óptica con perfil índice gradual**

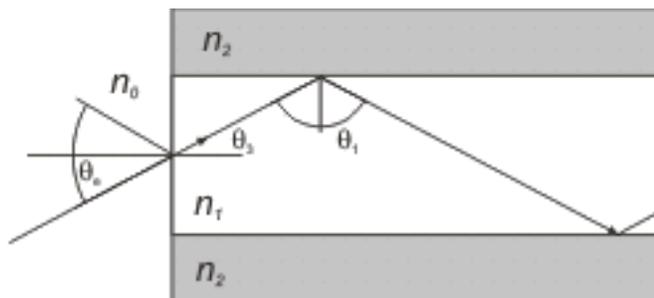


Fuente: Fibra óptica con índice gradual.

http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3236/html/21_ndice_de_refraccin.html. Consulta: 13 de diciembre de 2018.

Apertura numérica (NA): es un parámetro que da idea de la cantidad de luz que puede ser guiada por una fibra óptica. Por lo tanto, cuanto mayor es la magnitud de la apertura numérica de una fibra, mayor es la cantidad de luz que puede guiar o, lo que es lo mismo, más cantidad de luz es capaz de aceptar en su núcleo.

Figura 9. Ejemplo apertura numérica



Fuente: Ejemplo apertura numérica.

http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3236/html/21_ndice_de_refraccin.html. Consulta: 13 de diciembre de 2017.

1.4. Procesos de fabricación de la fibra óptica

La mayoría de las fibras ópticas se hacen de arena o sílice, materia prima abundante en comparación con el cobre. Con pocos kilogramos de vidrio se puede fabricar aproximadamente 43 kilómetros de fibra óptica. Los dos constituyentes esenciales de las fibras ópticas son el núcleo y el revestimiento del mismo, los cuales son la parte más interna de la fibra óptica y es la que guía la luz mediante reflexión interna del material. Una vez obtenida la materia prima, se procede a iniciar el proceso de fabricación de la fibra óptica. Básicamente se puede describir a través de tres etapas: fabricación de la preforma, estirado de la preforma y, por último, las pruebas y mediciones del producto terminado.

Para crear la preforma existen cuatro procesos que son principalmente utilizados. La etapa de fabricación puede ser a través de alguno de los siguientes métodos:

- Deposición de vapor químico modificado (*M.C.V.D Modified Chemical Vapor Deposition*).
- Deposición de vapor axial (*V.A.D Vapor Axial Deposition*).
- Método de deposición de vapor externo (*O.V.D Outside Vapor Deposition*).
- Método de deposición de vapor químico de plasma (*P.C.V.D Plasma Chemical Vapor Deposition*).

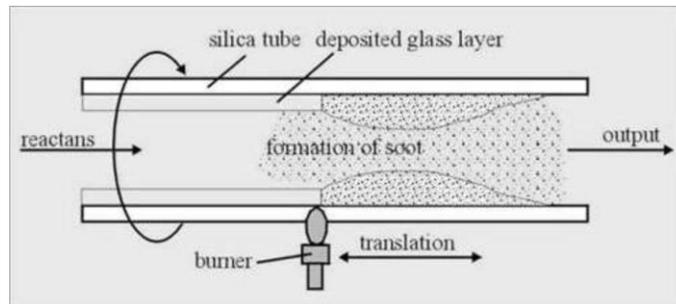
1.4.1. Deposición de vapor químico modificado

Fue desarrollado originalmente por Corning Glass y modificado por los laboratorios Bell Telephone para su uso industrial.

Utiliza un tubo de cuarzo puro de donde se parte. En su interior se deposita la mezcla de dióxido de silicio y aditivos de dopado en forma de capas concéntricas. A continuación, en el proceso industrial se instala el tubo en un torno giratorio. El tubo es calentado hasta alcanzar una temperatura comprendida entre 1 400 °C y 1 600 °C mediante un quemador de hidrógeno y oxígeno. Al girar el torno, el quemador comienza a desplazarse a lo largo del tubo. Por un extremo del mismo se introducen los aditivos de dopado, parte fundamental del proceso, ya que de la proporción de estos dependerá el perfil final del índice de refracción del núcleo. La deposición de las sucesivas capas se obtiene de las siguientes pasadas del quemador, mientras el torno gira; queda de esta forma sintetizado el núcleo de la fibra óptica. La operación que resta es el colapso, el cual se logra igualmente con el continuo desplazamiento del quemador, solo que ahora a una temperatura comprendida entre 1 700 °C y

1 800 °C. Precisamente es esta temperatura la que garantiza el ablandamiento del cuarzo, y el tubo se convierte así en el cilindro macizo que constituye la preforma. Las dimensiones de esta suelen ser de un metro de longitud útil y de un centímetro de diámetro exterior.

Figura 10 **Deposición de vapor químico modificado**



Fuente: Deposición de vapor químico modificado. www.icatron.org. Consulta: 14 de diciembre de 2017.

1.4.2. **Deposición de vapor axial**

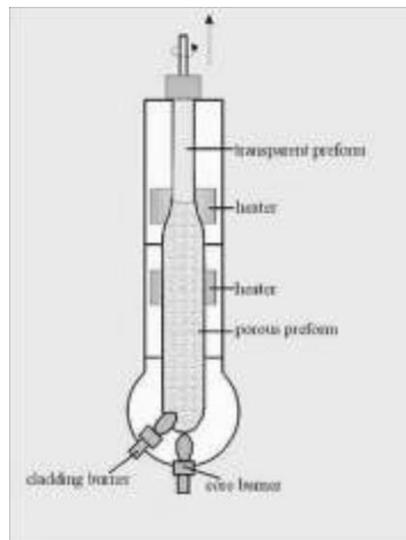
Su funcionamiento se basa en la técnica desarrollada por la Nippon Telephone and Telegraph, muy utilizado en Japón por compañías dedicadas a la fabricación de fibras ópticas.

La materia prima que utiliza es la misma que el método de deposición de vapor químico modificado. La diferencia radica en que en este último solamente se depositaba el núcleo, mientras que la primera, además del núcleo de la fibra óptica se deposita el revestimiento. Por esta razón debe cuidarse que, en la zona de deposición axial o núcleo, se deposite más dióxido de germanio que en la periferia, lo que se logra a través de la introducción de los parámetros de diseño en el software que sirve de apoyo en el proceso de fabricación.

A partir de un cilindro de vidrio auxiliar que sirve de soporte para la preforma, se inicia el proceso de creación. Se depositan ordenadamente los materiales a partir del extremo del cilindro; queda así conformada la llamada "preforma porosa". Conforme crece se desprende del cilindro auxiliar de vidrio. El siguiente paso consiste en el colapso, donde se somete la preforma porosa a una temperatura comprendida entre los 1 500 °C y 1 700 °C, por lo que se logra el reablandamiento del cuarzo.

La preforma porosa queda hueca en su interior, en el cilindro macizo y transparente mediante el cual se suele describir la preforma. Entre sus ventajas, comparado con el método anterior (M.C.V.D) permite obtener preformas con mayor diámetro y longitud, a la vez que precisa un menor aporte energético. Como inconveniente se destaca la sofisticación del equipo necesario para su realización.

Figura 11. **Deposición de vapor axial**



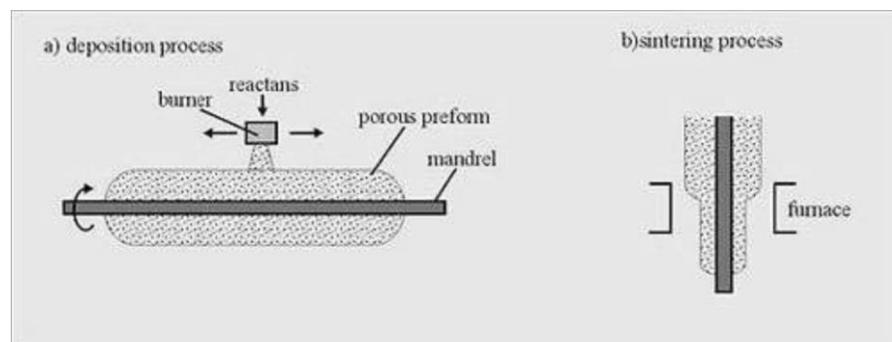
Fuente: Deposición de vapor axial. www.icatron.org. Consulta: 15 de diciembre de 2017.

1.4.3. Método de deposición de vapor externo

Desarrollado por Corning Glass Work, el proceso parte de una varilla de sustrato de cerámica y un quemador. En la llama del quemador son introducidos los cloruros vaporosos y se calienta la varilla. A continuación, se realiza la síntesis de la preforma, proceso que consiste en el secado de la misma mediante cloro gaseoso y el correspondiente colapso de forma análoga a los realizados con el método V.A.D. Quedan así sintetizados el núcleo y revestimiento de la preforma. Entre las ventajas, las tasas de deposición que se alcanzan son del orden de 4,3g/min, lo que representa una tasa de fabricación de FO de 5km/h, tras eliminar las pérdidas iniciales en el paso de estirado de la preforma.

También es posible la fabricación de fibras de muy baja atenuación y de gran calidad mediante la optimización en el proceso de secado, porque los perfiles así obtenidos son lisos y sin estructura anular reconocible.

Figura 12. Deposición de vapor extremo

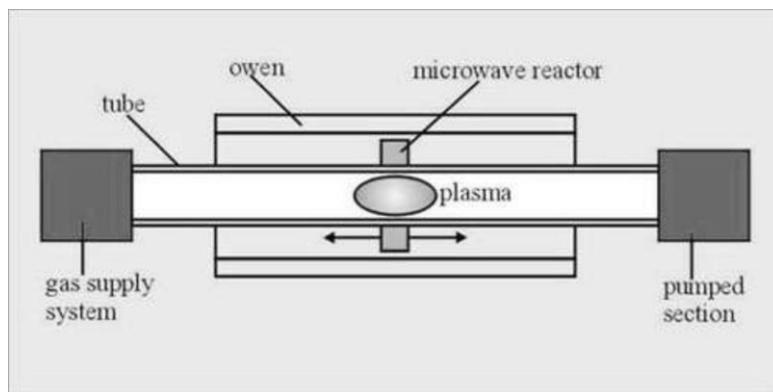


Fuente: Deposición de vapor extremo. Disponible en www.icatron.org. Consulta: 15 de diciembre de 2017.

1.4.4. Método de deposición de vapor químico de plasma

Desarrollado por Philips, se caracteriza por la obtención de perfiles lisos sin estructura anular reconocible. Su principio se basa en la oxidación de los cloruros de silicio y germanio, creando en estos un estado de plasma, seguido del proceso de deposición interior.

Figura 13. Deposición de vapor químico plasma



Fuente: *Deposición de vapor químico plasma*. www.icatron.org. Consulta: 15 de diciembre de 2017.

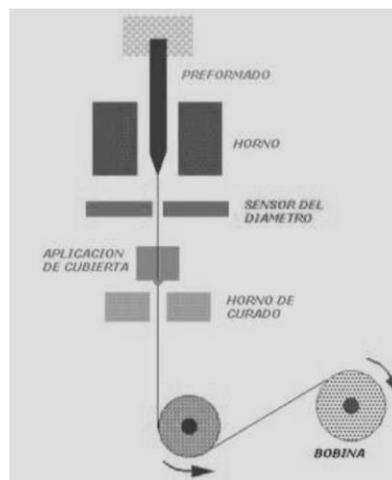
1.4.5. Etapa de estirado de la preforma

Sea cual sea la técnica que se utilice para la construcción de la preforma, es común a todo el proceso de estirado. Consiste básicamente en un horno tubular abierto, en cuyo interior se somete la preforma a una temperatura de 2 000 °C, lo que reablanda el cuarzo y fija el diámetro exterior de la fibra óptica. Este diámetro se ha de mantener constante mientras se aplica una tensión sobre la preforma.

Para lograrlo, son indispensables la constancia y uniformidad en la tensión de tracción y la ausencia de corrientes de convección en el interior del horno. En este proceso se debe cuidar que la atmósfera interior del horno esté aislada de partículas provenientes del exterior, para evitar que la superficie reblandecida de la fibra óptica pueda ser contaminada o haya microfisuras, con la consecuente e inevitable rotura de la fibra. También es aquí donde se aplica a la fibra un material sintético, que generalmente es un polimerizado viscoso, el cual posibilita las elevadas velocidades de estirado, comprendidas entre 1 m/s y 3 m/s.

Se conforma así una capa uniforme sobre la fibra totalmente libre de burbujas e impurezas. Posteriormente, se pasa al endurecimiento de la protección descrita y queda así la capa definitiva de polímero elástico. Esto se realiza habitualmente mediante procesos térmicos o de reacciones químicas con empleo de radiaciones ultravioletas.

Figura 14. **Estirado de la preforma de fibra óptica**



Fuente: Vargas, Ibrahim. (2001). *Estirado de la preforma*. www.icatron.org. Consulta: 15 de diciembre de 2017.

1.5. Normativa para el uso de la fibra óptica

La fibra óptica, como todo material empleado en entornos industriales, debe regir su utilización con base en normativos previamente aprobados y certificados, con el fin de estandarizar su utilización y extraer el máximo beneficio de la tecnología con seguridad, eficiencia y correcta utilización del recurso. Específicamente, trataremos el normativo que rige los componentes mínimos o estandarizados que componen la fibra óptica en una instalación industrial.

1.5.1. Normativa de componentes estándar del cable de fibra óptica ANSI/TIA/EIA-568-B.3-2000

La normativa que se describirá a continuación brinda información constructiva acerca de los requisitos de los componentes para un sistema de cableado de fibra óptica (por ejemplo, cable, conectores).

Los cables multimodo de fibra óptica de 50/125 mm y 62.5 / 125 mm y monomodo son cables reconocidos. Es importante destacar que los criterios contenidos en la norma ANSI/TIA/EIA-568-B.3-2000, que se cita a continuación, están sujetos a revisiones y actualizaciones según lo requieran los avances en las técnicas de construcción de edificios y la tecnología de telecomunicaciones y cableado de fibra óptica.

Especificación de criterios. De acuerdo con EIA *Engineering Publication* EP-7B, se especifican dos categorías de criterios: obligatorio y asesor. Los obligatorios se designan con la palabra "deberá"; los de asesoramiento, con las palabras "debería", "puede" o "deseable", que se utilizan indistintamente en la norma ANSI/TIA/EIA-568-B.3-2000. Los criterios obligatorios generalmente se

aplican a la protección, el rendimiento, la administración y la compatibilidad del cable de fibra óptica y especifican los requisitos mínimos absolutamente aceptables. Los criterios deseables se presentan cuando su logro mejorará el rendimiento general del sistema de cableado en todas sus aplicaciones contempladas.

Alcance. La norma ANSI/TIA/EIA-568-B.3-2000 especifica los requisitos mínimos para los componentes de fibra óptica utilizados en el cableado de las instalaciones, como cables, conectores, hardware de conexión, cables de conexión y equipos de prueba de campo.

Cables de fibra óptica

General. Esta cláusula contiene las especificaciones de rendimiento para los cables de fibra óptica reconocidos en las normas de cableado de las instalaciones.

Rendimiento de la transmisión del cable. El cable de telecomunicaciones de la planta externa de cualquier edificación o recinto debe cumplir con ANSI / ICEA S-87-640. El cable de telecomunicaciones de fibra óptica de la planta interior debe cumplir con ANSI/ICEA S-83-596. Cada fibra cableada debe cumplir con las especificaciones de rendimiento gradual de la tabla siguiente.

Figura 15. Rendimiento gradual de cableado de fibra óptica

Optical fiber cable type	Wavelength (nm)	Maximum attenuation (dB/km)	Minimum information transmission capacity for overfilled launch (MHz•km)
50/125 μm multimode	850	3.5	500
	1300	1.5	500
62.5/125 μm multimode	850	3.5	160
	1300	1.5	500
singlemode inside plant cable	1310	1.0	N/A
	1550	1.0	N/A
singlemode outside plant cable	1310	0.5	N/A
	1550	0.5	N/A

NOTE - The information transmission capacity of the fiber, as measured by the fiber manufacturer, can be used by the cable manufacturer to demonstrate compliance with this requirement.

Fuente: TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY ASSOCIATION. (2000). Rendimiento gradual de cableado de fibra óptica. <http://www.csd.uoc.gr/~hy435/material/TIA-EIA-568-B.3.pdf>. Consulta: 16 de diciembre de 2017.

Especificaciones del cable físico. La construcción del cable de fibra óptica consistirá en fibras ópticas multimodo de 50/125 mm o 62,5/125 mm o fibras ópticas monomodo, o una combinación de estos medios. Las fibras individuales y los grupos de fibras deben ser identificables de acuerdo con ANSI/TIA/EIA-598-A. El cable debe estar listado y marcado como se requiere bajo el código eléctrico aplicable y los requisitos del código de construcción local.

Especificaciones de cable de la planta interior. Las especificaciones mecánicas y ambientales para el cable de fibra óptica de la planta interior deben estar de acuerdo con ANSI/ICEA S-83-596. Los cables de 2 y 4 fibras destinados a cableado horizontal o centralizado deberán soportar una radio de curvatura de 25 mm (1 in) bajo condiciones sin carga.

Los cables de 2 y 4 fibras que deben pasar por vías horizontales durante la instalación deberán soportar un radio de curvatura de 50 mm (2 in) bajo una carga de tracción de 222 N (50 lbf). Todos los demás cables interiores de la planta deberán soportar un radio de curvatura de 10 veces el diámetro exterior del cable cuando no esté sujetos a carga de tracción y 15 veces el diámetro exterior del cable cuando está sujeto a la carga de tensión hasta el límite nominal del cable.

Especificaciones de cable de planta exterior. Las especificaciones mecánicas y ambientales para el cable de fibra óptica de la planta exterior deben estar de acuerdo con ANSI/ICEA S-87-640. Los cables de fibra óptica de la planta exterior deben ser de construcción de bloque de agua y cumplir con los requisitos de flujo compuesto y penetración de agua según lo establecido por ANSI/ICEA S-87-640. El cable para exteriores debe tener una resistencia mínima a la tracción de 2670 N (600 lbf). Los cables de planta exteriores deben soportar un radio de curvatura de 10 veces el diámetro exterior del cable cuando no está sujetos a la carga de tracción, y 20 veces el diámetro exterior del cable cuando están sujetos a la carga de tensión hasta el límite nominal del cable.

Cable de caída. Los cables de bajada son típicamente de bajo diámetro y bajo contenido de fibra con distancias de tramo no soportadas. Se utilizan para alimentar un pequeño número de fibras desde un cable de mayor conteo de fibras a una única ubicación. El cable de bajada debe tener una resistencia mínima a la tracción de 1335 N (300 lbf).

Conexión de hardware. Esta cláusula de la norma ANSI/TIA/EIA-568-B.3-2000 contiene las especificaciones de rendimiento para los conectores de fibra óptica, hardware de conexión y empalmes reconocidos en las normas de cableado de las instalaciones. Estos requisitos se aplican a la conexión de hardware en la conexión cruzada principal, intermedia, horizontal, interconexión

de cableado centralizado y el empalme, punto de consolidación y el área de trabajo. Se puede usar varios diseños de conectores, siempre que el diseño del conector cumpla con los requisitos de rendimiento especificados.

Nota: el término “adaptador”, cuando se usa en referencia con fibra óptica, no debe confundirse con su definición cuando se usa en referencia con otros tipos de medios, como el par trenzado cableado. El término “adaptador” ha sido adoptado por la industria de fibra óptica y organizaciones de estándares para definir un dispositivo mecánico de terminación, diseñado para alinear y unir dos conectores ópticos similares.

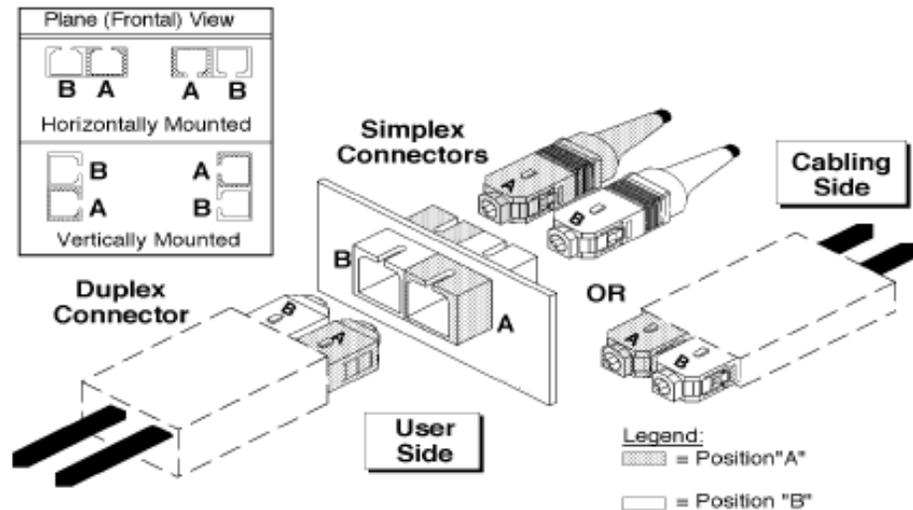
Conector y adaptador. Se describe las características básicas de un conector de cableado de fibra óptica.

Diseño físico. Los diseños de conectores cumplirán los requisitos del documento TIA FOCIS correspondiente. Por ejemplo, el conector y el adaptador 568SC deben cumplir con los requisitos de ANSI/TIA/EIA-604-3; designación FOCIS 3P-0-2-1-1-0 para enchufes monomodo, designación FOCIS 3P-0-2-1-4-0 para enchufes multimodo, y designación FOCIS 3A-2-1-0 para adaptadores. No se requiere ningún medio para evitar el acoplamiento de fibras monomodo a multimodo.

Rendimiento. El rendimiento de los diseños de los conectores deberá cumplir los requisitos especificados en el anexo A.

Identificación multimodo y monomodo. El conector multimodo o una parte visible del mismo debe ser de color beige. El adaptador o salida multimodo se identificará con el color beige. El conector monomodo o una parte visible del mismo deben ser de color azul. El adaptador o salida monomodo debe identificarse por el color azul.

Figura 16. Ejemplos de conectores de cableado de fibra óptica



Fuente: TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY ASSOCIATION. (2000). Ejemplo conectores de cableado de fibra óptica. <http://www.csd.uoc.gr/~hy435/material/TIA-EIA-568-B.3.pdf>. Consulta 16 de diciembre de 2017

1.5.2. Cableado de fibra óptica subterráneo y/o aéreo

Cable blindado subterráneo. Se utiliza en planta externa o instalaciones externas en las infraestructuras. Debe ser de manera subterránea y se necesita que el cableado de fibra óptica soporte el ingreso a lugares de difícil acceso, manteniendo en todo momento las características físicas de dicho material. El cable blindado resiste satisfactoriamente esfuerzos de compresión de pesos determinados (según el material de recubrimiento y las características físicas de la fibra óptica dadas por el fabricante), algo necesario en las instalaciones bajo tierra o subterráneas. En estos tipos de instalaciones, en las áreas donde los agentes externos (humedad, peligro de daño mecánico, etc.) amenazan la integridad física del conductor, se suele dotar al mismo de un recubrimiento metálico para una óptima protección.

Otro lugar donde existes instalaciones con cables blindados es en los centros de datos, donde los cables se instalan debajo del piso y corren el riesgo de grave daño mecánico; para ambientes interiores puede ser que la cubierta no sea metálica sino únicamente de algún material para proteger la fibra óptica..

Recubrimiento del cable. Es la capa exterior de la fibra óptica que se elige para que resistan los efectos del medioambiente en el lugar de instalación del cable. Los cables que se instalan en exteriores suelen ser de polietileno negro (PE), que resisten la exposición a la humedad y a la luz solar. Los cables que se instalan en interiores suelen tener recubrimientos con componentes que retarden la propagación de las llamas. Comúnmente, estos conductores tienen colores que sirven para la correcta identificación de la fibra que recubre.

Tipo de cable de fibra óptica de acuerdo a su lugar de instalación:

Estructura ajustada

- Cable simplex y dúplex
- Cable de distribución
- Cable *breakout*

Cable de estructura holgada

- Cable tipo cinta
- Cable blindado

Este tipo de instalación tiene el objetivo de garantizar al usuario una alta confiabilidad en la transmisión de canales de voz, datos, CaTV, entre otros. Las construcciones de los cables y las instalaciones atienden a los requerimientos mínimos establecidos en la norma SDT-235.350.718, la cual considera todos los aspectos relevantes para la correcta realización de una instalación de fibra óptica subterránea.

Los cables dieléctricos con armadura de fibra de vidrio para conductos y de manera subterránea se utilizan para redes FTTH y de largo recorrido. Estos cables están indicados para la instalación mediante tendido o instalación soplada en el suelo. La presencia de la armadura de fibras de vidrio también ofrece un rendimiento retardante de causas de daño mecánico por agentes externos debido al lugar donde están conectados los conductores.

Los conductores de fibra óptica que deseen ser instalados de manera subterránea deberán de cumplir con el normativo IEC/EN 60794. Este indica los parámetros necesarios para la correcta construcción del cableado de fibra óptica de manera subterránea, a manera de tener un mejor acercamiento al cableado que cumple con la normativa citada. Se brindará información acerca del cableado que cumple con los lineamientos establecidos por norma.

Figura 17. **Especificaciones técnicas cableado fibra óptica**

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS					
Capacidad - Número de fibras	12	24	36	48	72
Modularidad ¹	12 fibras por módulo				
Número de módulos	1	2	3	4	6
Diámetro externo, mm	9,6	11	11	12,5	14,3
Fuerza de tracción, máx/perm, daN	90 / 45	135 / 65	145 / 70	170 / 85	235 / 115
Resistencia al aplastamiento, daN/cm	40	40	40	40	40
Radio de curvatura mini/radio de torsión, mm	105 / 105	130 / 130	150 / 150	150 / 150	175 / 175
Peso del cable, kg/km	95	125	127	155	190
Longitud de suministro indicativa, m/tipo de bobina	4100/F	4100m/F	4100m/F	4100m/G	4100m/G
Referencia del cable, X = tipo de fibra	819A12X	819A24X	819A36X	819A48X	819A72X

Fuente: Ejemplo fibra óptica multimodo y monomodo. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_%C3%B3ptica. Consulta 17 de diciembre de 2017

Cable aéreo. Los cables aéreos se utilizan en instalaciones en planta externa en lugares elevados postes o estructuras externas. Pueden estar enlazados a un cable mensajero o a otro cable y poseen elementos de refuerzo de metal o de aramida, que permiten que soporten su propio peso o elementos de refuerzo que los sostiene.

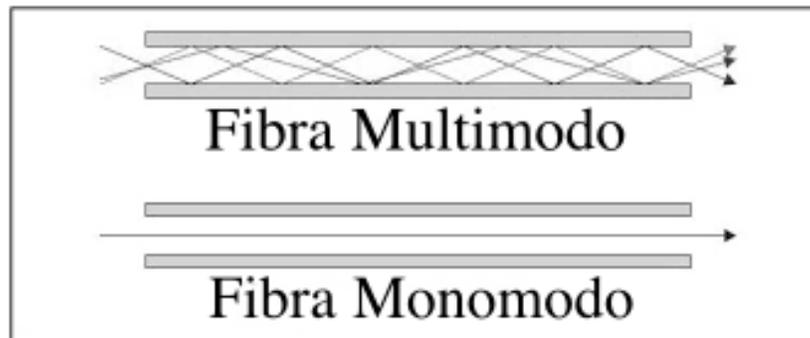
El blindaje de este conductor también debe estar correctamente conectado a tierra. Un cable aéreo tiene amplia utilización en su modalidad OPGW, que es un cable de distribución de alto voltaje que contiene fibra óptica en su interior. Debido al material con el cual está construida, la fibra óptica no se ve afectada por los campos eléctricos y magnéticos sin comprometer los servicios de comunicación de la red. Este tipo de cable se utiliza en el hilo de guarda de las torres de alta tensión y baja con el objetivo de realizar tareas y empalmes o terminaciones (ver apartado 1.3.4.4. Aislamiento eléctrico).

2. CAPÍTULO II

2.1. Tipos de fibra óptica

Las diferentes trayectorias que puede seguir un haz de luz en el interior de una fibra óptica se denominan modos de propagación. Según el modo de propagación hay dos tipos de fibra óptica: **multimodo y monomodo**.

Figura 18. **Ejemplo fibra óptica multimodo y monomodo**



Fuente: Ejemplo fibra óptica multimodo y monomodo. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_%C3%B3ptica. Consulta: 17 de diciembre de 2017.

2.1.1. Fibra multimodo

Es aquella en la que los haces de luz pueden circular por más de un modo o camino. Esto supone que no llegan todos los haces a la vez a su lugar de destino (receptor).

Una fibra multimodo puede tener más de mil modos de propagación de luz. Se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 2 km; son simples de diseñar y económicas. El núcleo de una fibra multimodo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud que el revestimiento. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión. Dependiendo el tipo de índice de refracción del núcleo, hay dos tipos de fibra multimodo:

- Índice escalonado: fibra que contiene un núcleo con un índice de refracción constante en toda la sección cilíndrica, con alta dispersión modal.
- Índice gradual: fibra con un índice de refracción que no es constante, con menor dispersión modal. El núcleo se constituye de distintos materiales

2.1.2. Fibra monomodo

Tipo de fibra óptica que ofrece la mayor capacidad de transporte de información. Tiene una banda de paso del orden de los 100 GHz/km. Los mayores flujos de información se consiguen con este tipo de fibra, que también es la más compleja de implementar. Es una fibra óptica en la que solo se propaga un modo de luz. Se logra al reducir el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño (8,3 a 10 micrones) que solo permite un modo de propagación. Su transmisión es paralela al eje de la fibra.

A diferencia de las fibras multimodo, las monomodo permiten alcanzar grandes distancias (hasta 400 km máximo, mediante un láser de alta intensidad) y transmitir elevadas tasas de información (10 Gbit/s).

2.2. Cable de fibra óptica

Está compuesto por un grupo de fibras ópticas por el cual se transmiten señales luminosas (haces de luz). Las fibras ópticas comparten su espacio físico con hilos de aramida (material de refuerzo) que le proporcionan la necesaria resistencia a la tracción, para su correcta instalación. Estos cables son una alternativa a los coaxiales en la industria electrónica y telecomunicaciones. Actualmente, en el campo de la instrumentación de control industrial es utilizado como medio transductor para fabricar instrumentación de sistemas de control industrial y automatización. Así, un cable con ocho fibras ópticas tiene un tamaño mucho más pequeño que los utilizados habitualmente; puede soportar las mismas comunicaciones que 60 cables de 1 623 pares de cobre o cuatro cables coaxiales de ocho tubos, todo ello con una distancia entre repetidores mucho mayor. Gracias a su extrema robustez ante efectos externos, es ideal para todo tipo de instrumentación de control industrial.

Otro aspecto relevante es que el peso del cable de fibra óptica es muchísimo menor que el de los coaxiales: una bobina del cable de ocho fibras citado puede pesar alrededor de 30 kg/km, lo que permite efectuar tendidos de 2 a 4 km de una sola vez, mientras que con los cables de cobre, no son prácticas distancias superiores a 250-300 m. El cable de fibra óptica no se suele emplear tal y como se obtiene tras su proceso de creación (tan solo con el revestimiento primario). Para su utilización dentro del ambiente industrial hay que dotarla de más elementos de refuerzo que permitan su instalación sin poner en riesgo al vidrio que la conforma. Es un proceso difícil de llevar a cabo, ya que el vidrio es quebradizo y poco dúctil. Además, la sección de la fibra es muy pequeña, por lo que la resistencia que ofrece a romperse es prácticamente nula. Es, por tanto, necesario protegerla mediante elementos adicionales, comúnmente, cables de refuerzo.

2.2.1. Instalación y explotación de fibra óptica

Referente a la instalación y explotación del cable de fibra óptica, el personal técnico típicamente se encuentra frente a la cuestión esencial de qué tensión es la máxima que debe admitirse durante el tendido para que el cable no se rompa y se garantice una vida media de unos 20 años, aproximadamente. Por ello se tratarán las principales formas en las cuales la industria moderna dota al cableado de fibra óptica de la protección necesaria para cumplir su objetivo en los sistemas de comunicaciones y de control industrial.

2.2.2. Elementos y diseño del cable de fibra óptica

De acuerdo con su diseño, existen dos tipos de cable de fibra óptica:

- Cable de estructura holgada
- Cable de estructura ajustada

Cable de estructura holgada. Empleado tanto para exteriores como para interiores, consta de varios tubos de fibra que rodean un miembro central de refuerzo, provisto de una cubierta protectora. Cada tubo de fibra, de dos a tres milímetros de diámetro, lleva varias fibras ópticas que descansan holgadamente en él. Los tubos pueden ser huecos o estar llenos de un gel hidrófugo que actúa como protector antihumedad e impide que el agua entre en la fibra. El tubo holgado aísla la fibra de las fuerzas mecánicas exteriores que se ejerzan sobre el cable. Su núcleo se complementa con un elemento que le brinda resistencia a la tracción, que bien puede ser de varilla flexible metálica o dieléctrica como elemento central, o de hilaturas de aramida o fibra de vidrio situadas periféricamente.

Cable de estructura ajustada. Diseñado para instalaciones en el interior de los edificios, es más flexible y con un radio de curvatura más pequeño que el que tienen los cables de estructura holgada. Contiene varias fibras con protección secundaria que rodean un miembro central de tracción, todo ello cubierto de una protección exterior. Cada fibra tiene una protección plástica extrusionada directamente sobre ella, hasta alcanzar un diámetro de 900 μm al rodear al recubrimiento de 250 μm de la fibra óptica. Esta protección plástica, además de servir como protección adicional frente al entorno, provee un soporte físico que serviría para reducir su coste de instalación al permitir reducir las bandejas de empalmes.

2.2.3. Elementos estructurales del cable de fibra óptica

Los elementos estructurales son generalmente cables de diferentes materiales, cuyo objetivo es proporcionar el núcleo alrededor del cual se sustentan las fibras ópticas, ya sean trenzadas alrededor de él, o dispersándose de forma paralela al mismo en ranuras practicadas sobre el elemento con ese fin.

2.2.4. Elementos de refuerzo del cable de fibra óptica

Tienen por objetivo soportar los esfuerzos de tracción a los que está sometida la fibra óptica durante su instalación, para que ninguna de sus fibras sufra una elongación superior a la permitida. También deben evitar posibles torsiones y han de ser materiales flexibles que faciliten su instalación; como se

emplearán kilómetros de ellos, han de tener un coste asequible. Se suelen utilizar materiales como el acero, Kevlar y, en algunas ocasiones, fibra de vidrio de diferente diámetro de sección transversal construida para reforzar el cableado de fibra óptica.

2.2.5. Funda de cable de fibra óptica

Por último, todo cable de fibra óptica posee una funda, la cual generalmente es de material plástico cuyo objetivo es proteger el núcleo que contiene el medio de transmisión frente a fenómenos externos a este, como la temperatura, humedad, fuego, golpes externos, etc. Dependiendo de para qué sea destinada la fibra óptica (comunicaciones industriales, instrumentación industrial), la composición de la funda variará para proveer una mejor protección a la fibra. Por ejemplo, si va a ser instalada en canalizaciones de planta exterior, debido al peso y a la tracción bastará con un revestimiento de polietilenos extruidos. Si el cable va a ser aéreo, donde solo importa la tracción en el momento de la instalación, nos preocupará más que la funda ofrezca resistencia a las inclemencias del tiempo (lluvias, viento, heladas, etc.). Si será instalada de manera subterránea, se desea una funda que, aunque sea más pesada, soporte golpes y aplastamientos externos (protección mecánica). En el caso de las fibras submarinas, la funda será una compleja superposición de varias capas con diversas funciones aislantes.

Si la fibra óptica será utilizada como medio transductor en instrumentación de control industrial, se debe estudiar el ambiente al cual estará expuesta la instrumentación y, de esta manera, seleccionar de una manera eficiente el tipo de protección.

2.2.6. Pérdida en los cables de fibra óptica

La fibra óptica tiene implícitas pérdidas que, a pesar de ser muy pequeñas al momento de ser implementado un sistema de comunicación o instrumentación de control industrial, deben ser tomadas en cuenta para un mejor aprovechamiento del recurso y así aprovechar los máximos beneficios que ofrece este material en el ámbito industrial.

Pérdidas de la fibra óptica por absorción. Una de las formas principales de pérdida de señal en la fibra óptica es cuando la luz viaja a través de las impurezas (partículas de metal o humedad). Tales partículas, en la fibra óptica, pueden bloquear parte de la luz, absorberla y disiparla en forma de calor, lo que resulta en pérdidas. Así, la pérdida de la absorción puede ser definida como la porción de pérdida de señal debido a su conversión en otras formas de energía, tales como calor.

Existen dos tipos de pérdidas por absorción:

- Absorción intrínseca
- Absorción extrínseca

Ambas pérdidas serán definidas a continuación, para conocer de primera mano los problemas que se podría afrontar al utilizar fibra óptica en la instrumentación de control industrial moderno.

Absorción intrínseca: es el tipo de pérdida causada por todas las impurezas e imperfecciones de la fibra óptica; la principal causas de pérdidas intrínsecas. Solo se pueden superar cambiando el vidrio de sílice en las longitudes de onda de la gama de operación de 700 nanómetros (nm) a 1 600 nm. Para la sílice en las regiones de longitud de onda de interés para la comunicación óptica, las colas de absorción de infrarrojos hacen contribuciones insignificantes.

Absorción extrínseca: es causada por la presencia de impurezas en la fibra óptica, principalmente debido a iones metálicos tales como Fe^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} o presencia de iones hidroxilo (OH); es decir, silicio-hidroxilo (Si-OH) dentro de la fibra. Para las pérdidas más bajas (<1 dB/km), las impurezas metálicas deben estar por debajo de una parte por billón.

Pérdidas por dispersión de la fibra óptica

Se conoce que la propagación de la luz dentro de la fibra óptica se basa en la reflexión interna total. Cualquier irregularidad, incluso las que ocurren a nivel molecular en la superficie de la fibra, puede hacer que la luz vaya en direcciones aleatorias, lo cual se traduce en pérdidas de dispersión que se pueden dividir en dos categorías.

- Dispersión lineal
- Dispersión no lineal

Pérdidas de dispersión lineales

Dentro de las pérdidas por dispersión lineal para el material de la fibra óptica se puede mencionar:

Dispersión de Rayleigh: es una de las principales causas de las pérdidas de fibra óptica. En estado fundido, las moléculas de sílice se mueven al azar y se congelan en un solo lugar, en estado sólido. Esto provoca fluctuaciones en la densidad y, por lo tanto, las fluctuaciones del índice de refracción se producen a lo largo de la fibra. La dispersión de la luz por esta causa se conoce como dispersión de Rayleigh y es el 96% de las pérdidas de fibra óptica.

Dispersión de Mie: dispersión de la luz; también puede ocurrir si las faltas de homogeneidad en la fibra son comparables a la longitud de onda guiada. Es debido a las imperfecciones en la estructura cilíndrica de la guía de ondas, tales como irregularidades en la interfaz núcleo-revestimiento. También por

diferencias de índice de refracción a lo largo de la longitud de fibra, diámetro, fluctuaciones y las burbujas que pudiesen haberse producido en la fabricación de la fibra óptica.

Pérdidas de dispersión no lineales

Este tipo de pérdidas se produce debido a la dispersión inelástica de un fotón a otro de energía más baja. Es decir, la energía de la señal luminosa se transfiere a otra ola de mayor longitud de onda, pero de menor energía. La diferencia de energía se traduce en un fotón. La modalidad de dispersión no lineal es de dos tipos:

- Dispersión estimulada Raman (SRS)
- Dispersión estimulada Brillouin (SBS)

Estimulada de Brillouin (SBS): llega a frecuencias más altas cuando la modulación de la luz ocurre debido a la vibración térmica dentro de la fibra que se traduce en SBS. La dispersión produce un fotón acústico que resulta en un desplazamiento de frecuencia óptica de alrededor de 10 GHz conocido como desplazamiento de Stokes.

Dispersión estimulada Raman (SRS): es similar a la dispersión de Brillouin, con la diferencia de que en lugar de un fotón acústico se genera uno óptico. Puede ocurrir tanto en dirección hacia adelante como hacia atrás y puede tener un umbral de óptica de hasta tres veces la magnitud en comparación con la dispersión de Brillouin. Tiene un desplazamiento de frecuencia de alrededor de 13 THz.

Pérdidas por flexión

Como su nombre lo sugiere, este tipo de pérdidas se producen debido a la flexión de la fibra óptica, ya que altera el camino de la señal luminosa. Es de dos tipos.

- Macrocurvaturas
- Microcurvaturas

Macrocurvaturas: el plegado de las fibras ópticas en curvas cerradas se conoce como macrocurvaturas. Esto crea un ángulo demasiado agudo que parte la luz, que ya no se refleja de nuevo en la fibra y se escapa del revestimiento, lo que resulta en pérdida de señal. La pérdida óptica aumenta a medida que el radio de la fibra disminuye. Diferentes fibras ópticas tienen diferentes especificaciones en cuanto a las curvas permisibles sin pérdida significativa de la señal. Para el estándar de fibra G.657.B.3 el radio se ha estandarizado al nivel de 5 mm.

Microcurvaturas: curvas pequeñas que son causadas por pellizcos o apretados de la fibra, lo que conduce a deformaciones en la estructura de la misma. Esto se traduce en el desplazamiento de la luz y, por lo tanto, hace que ocurra la pérdida de señal en la fibra óptica.

Pérdidas de dispersión en la fibra óptica

La dispersión se describe como la ampliación de los pulsos de luz. Es el resultado de las propiedades físicas del sistema. Es de tres tipos:

- Dispersión modal
- Tipo de dispersión material
- Dispersión de la guía de ondas

Dispersión modal: se produce en fibras multimodo y monomodo. En las fibras multimodo, ya que tiene un tamaño de núcleo más grande que puede guiar varios modos simultáneamente. Cada modo entra en la fibra óptica en diferentes ángulos y viaja a una distancia diferente hacia el receptor. Durante el tiempo de propagación de las ondas de luz puede ocurrir la superposición de las señales, de ahí que causan distorsiones en las señales.

Dispersión material: se produce porque la propagación de la luz depende de la interacción de esta con el índice de refracción de cada material de fibra.

Dispersión de la guía de ondas: este tipo de dispersión se produce principalmente en fibras monomodo. Ocurre debido a que una parte del recorrido de la luz se hace en el revestimiento y la mayor parte de dicho recorrido está en el interior del núcleo. Por la diferencia en el índice de refracción de ambos núcleos y revestimiento, la luz viaja a diferentes velocidades según el medio que le guía; por tanto, causan la dispersión de luz en el receptor.

Pérdidas del conector de fibra óptica

Este tipo de pérdidas se producen en la interconexión de las dos fibras ópticas. Puede suceder si la conexión de la fibra no está alineada, tiene espacio de aire, un diámetro desigual o ha inclinado el eje.

2.3. Empalmes y conectores de cables de fibra óptica

La interconexión y el acoplamiento de las fibras ópticas requieren de especial cuidado, ya que en una instalación se desea reducir al mínimo las pérdidas causadas por uniones de fibras ópticas necesarias en el sistema.

Las uniones pueden ser fijas o temporales; la primera unión se lleva a cabo por un empalme permanente, y la segunda utiliza conectores que pueden ser removibles. El tipo de unión por elegir depende de las necesidades de la instalación. El incremento en las pérdidas de un enlace es el factor más importante que genera cualquier unión de fibras ópticas, por lo cual deben considerarse sus causas y la magnitud de sus efectos.

2.3.1. Empalmes de fibra óptica elaborados manualmente (empalmes)

En el mundo de los conectores de cobre, el empalme puede ser una simple pareja de alambres unidos y soldados, pero los empalmes de la fibra óptica son una tarea mucho más complicada. Capacitación especial, práctica y equipo especial, junto con paciencia y una buena coordinación son necesarios para hacer empalmes de óptima aceptación técnica. Los dos métodos básicos para los empalmes son mecánicos y fusión.

Empalmes mecánicos (elastoméricos): cuando se tiene enlaces de fibra óptica de corta distancia donde se pueden tolerar pérdidas considerables, se suele utilizar empalmes mecánicos. En estos, las fibras ópticas son unidas por medios mecánicos como ranuras en forma de varillas (se puede agregar una sustancia epóxica para adherir las fibras y además actuar como acoplador óptico).

Características de este tipo de empalme:

- Las fibras se manejan con herramienta manual
- Ambas fibras se unen con una guía de empalme
- El epóxico no es dañino al manipularlo
- Kit manual
- Su costo no es muy elevado
- Se puede utilizar para fibras multimodo

Empalme por fusión: empalme por fusión es el método más utilizado. Esencialmente, consiste en aplicar calor en una zona específica entre las fibras por unir, suavizándolas y fusionándolas. Las fibras ópticas deben prepararse en los extremos para que estén planas y perpendiculares al eje al limpiar la fibra de grasa y polvo.

2.3.2. Empalmes de fibra óptica mediante equipo (conectores)

Cuando se requiere unir dos fibras ópticas en forma rápida y temporal se utilizan los conectores. Estos, con base en sus principios de diseño, se pueden dividir en dos tipos:

- De acercamiento mecánico de precisión en los extremos
- De acercamiento óptico de las fibras por unir

En el primer caso, se utilizan estructuras que requieren de precisión lateral, azimutal y longitudinal para lograr el alineamiento de la fibra. En el segundo caso, se utilizan lentes para ayudar en el alineamiento de las dos fibras que serán unidas, logrando mejores tolerancias angulares.

Los conectores más utilizados son los de acercamiento mecánico. En este tipo se encuentran muchas variedades que combinan costos, pérdidas ópticas, durabilidad, etc. Se puede enlistar el proceso de conectorización de fibra óptica. A continuación, se presentan los pasos por seguir:

- Preparar la fibra
- Cortar la cubierta externa
- Cortar el buffer primario junto con el Kevlar
- Poner epóxico dentro del conector
- Poner el conector hasta que tope en el buffer primario
- Calentar el conector para secar el epóxico

3. CAPÍTULO III

3.1. Aplicaciones de la fibra óptica

La investigación sobre sensores con fibras ópticas se ha desarrollado bastante desde la década de los 80. Aunque dicha instrumentación no es utilizada con mucha frecuencia dentro de los sistemas de control industrial, en la actualidad ya existen muchas compañías que comercializan la tecnología a tal punto que no es difícil encontrar productos para muchas aplicaciones y monitorear gran cantidad de variables de interés aprovechando el uso de fibra óptica como material transductor.

Los actuales sensores con fibra presentan una serie de ventajas que los hace competitivos con los sensores tradicionales, como las siguientes:

- Seguridad: no existen materiales conductores que provoquen cortos o induzcan voltajes.
- Tamaño pequeño y poco peso: útil en aplicaciones de vuelo (giróscopos) o lugares donde la instalación sea costosa.
- Inmunidad a la radiación electromagnética y emisión de radio frecuencia.
- Velocidad de respuesta: útil en aplicaciones de gran precisión ($<1 \mu\text{s}$)
- El sensor puede ser muy pequeño, or ejemplo, en aplicaciones médicas (fibroscopio).

Algunas de las desventajas de los sensores con fibra son:

- Fragilidad: se requiere de muchos cuidados en el encapsulado del sensor.

- Los emisores y receptores pueden presentar dificultades de alineación y una vez instalados se pueden desalinear con vibraciones o golpes.
- Sensibles a varios factores al mismo tiempo; por ejemplo, presión y temperatura.
- El ancho de banda espectral de los emisores está muy limitado al infrarrojo.
- Costo: algunos componentes pueden alcanzar precios altos.

3.2. Comunicaciones a través de fibra óptica

El cableado de fibra óptica tiene varias aplicaciones dentro del ámbito industrial. Una de ellas es la comunicación de equipo de automatización industrial, en el área de proceso y comunicaciones de equipo de protección eléctrica, en el área de transmisión y distribución eléctrica, subestaciones eléctricas y sistemas de control de centrales generadoras de energía eléctrica (hidroeléctrica, solar, eólica, gas, térmica, geotérmica). El análisis de este material de ingeniería en el ámbito de las comunicaciones industriales no se encuentra detallado en este trabajo de investigación, pero no debemos dejar de manera aislada este uso muy homologado de la fibra óptica, ya que en muchas instalaciones industriales será indispensable para la comunicación industrial.

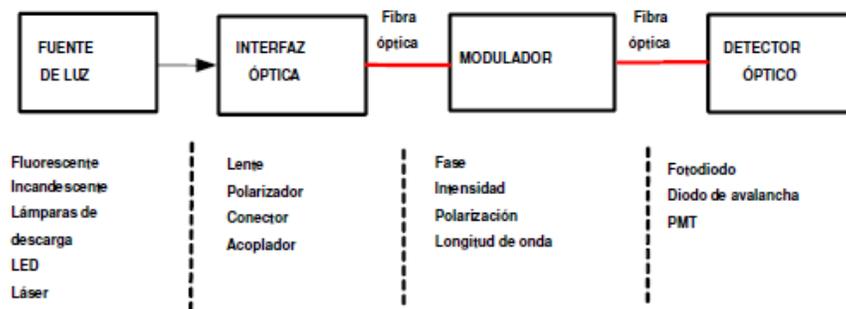
3.3. Sensores que utilizan fibra óptica

Los sensores de fibra óptica están formados básicamente de:

- Una fuente de luz (led, infrarrojo, láser, etc.)
- Una fibra óptica

- Un modulador que altera la luz de forma proporcional a la perturbación de todo-nada (magnitud física a medir)
- Un fotodetector

Figura 19. Elementos básicos de un sensor de fibra óptica

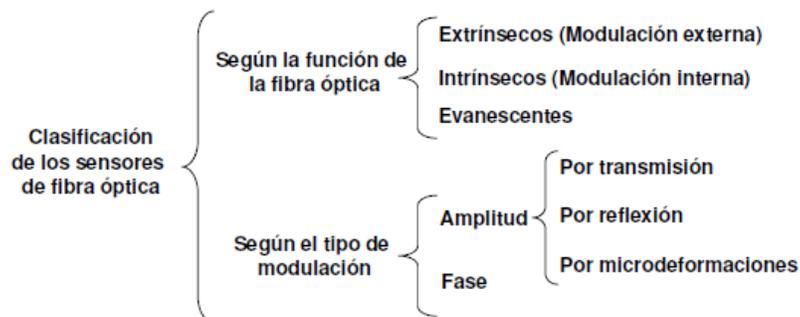


Fuente: Elementos básicos de un sensor de fibra óptica].

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta 19 de diciembre de 2017

Los sensores de fibra óptica se clasifican de la manera siguiente:

Figura 20. Clasificación de los sensores de fibra óptica



Fuente: Clasificaciones de los sensores de fibra óptica.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 20 de diciembre de 2017.

3.3.1. Sensores según la función de la fibra óptica

Los sensores de fibra óptica pueden clasificarse de acuerdo a la función de la fibra, de la manera siguiente:

3.3.1.1. Sensores extrínsecos o de modulación externa

Son sensores en los que por la fibra óptica se modula un elemento externo bajo la acción de la magnitud por medir o del fenómeno por detectar.

3.3.1.2. Sensores intrínsecos o de modulación interna

Son sensores en los que al medir modifica las características ópticas de la fibra, directamente o a través de un recubrimiento. Dichas modificaciones producen variaciones en algún parámetro de la radiación.

3.3.1.3. Sensores evanescentes

Son sensores en los que la parte de la fibra óptica está desprovista de la capa reflectora externa, lo que permite detectar ciertos elementos químicos como el hidrógeno; a través de su influencia en el campo evanescente se utiliza especialmente en óptica integrada.

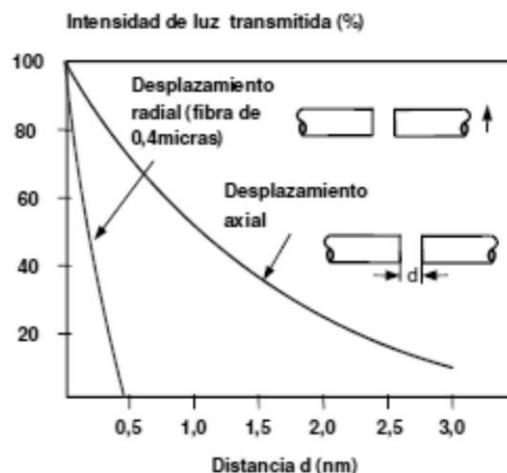
3.3.2. Sensores según el tipo de modulación

Los sensores de fibra óptica también pueden clasificarse según el tipo de modulación. Esta instrumentación detecta la variación de la cantidad de luz asociada con la magnitud por medir. Utilizan elementos ópticos y circuitos muy simples, normalmente con fibras multimodo, de la manera siguiente:

3.3.2.1. Amplitud por transmisión

Se basa en la reducción de energía por la transmisión de la radiación óptica a través del canal. Se utiliza en la medida de desplazamientos axiales y radiales, con mayor sensibilidad en los segundos. También se utilizan en la medida de la presión acústica (hidrófonos).

Figura 21. Amplitud por transmisión de los sensores de fibra óptica



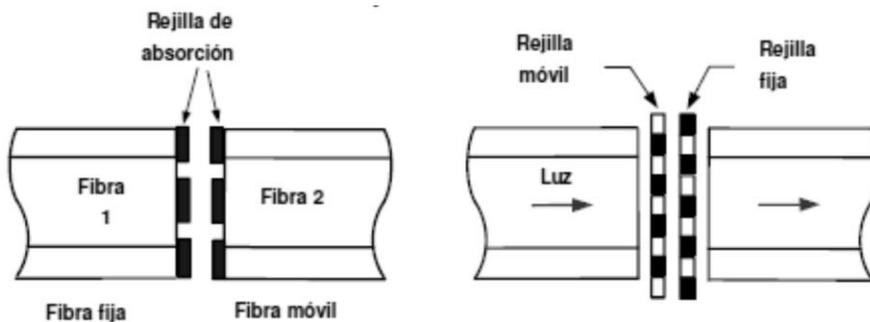
Fuente: Amplitud por transmisión de los sensores de fibra óptica.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 21 de diciembre de 2017.

Para aumentar la sensibilidad se emplean rejillas de absorción colocadas en lugares específicos:

- En las caras de la fibra: en este caso se mueve una de las fibras.
- Entre ambas fibras: en este caso las fibras están fijas y se produce un movimiento relativo de las rejillas entre sí.

Figura 22. **Rejillas para aumentar sensibilidad de instrumentación**



Fuente: Rejilla para aumentar sensibilidad de instrumentación.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 21 de diciembre de 2017.

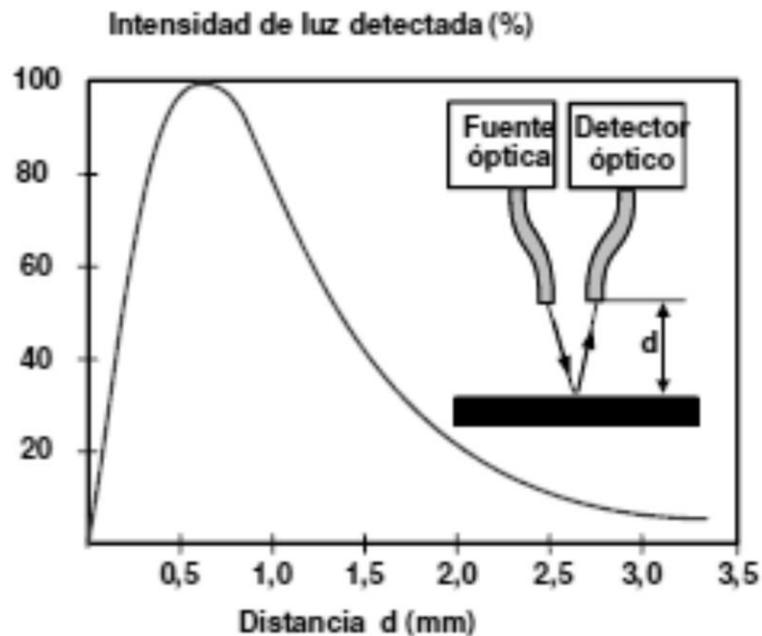
Una variante de la modulación por transmisión con alta sensibilidad es la basada en la anulación de la reflexión interna total. Se colocan dos fibras con una pequeña separación entre ellas y se utiliza la condición límite para la detección de movimientos de estructuras mecánicas o arquitectónicas.

3.3.2.2. **Modulación de amplitud por reflexión**

El haz se transmite hacia una superficie reflectante que lo dirige hacia un detector óptico. La intensidad de la luz reflejada depende de la distancia entre la fibra y la superficie.

A distancias pequeñas la intensidad crece y a medida que la distancia aumenta, la intensidad decrece, según $1/d$ al cuadrado. Esta característica hace que este tipo de sensor se utilice en la medida de desplazamientos de presión (diafragma), nivel, temperatura, entre otros.

Figura 23. **Modulación amplitud por reflexión**



Fuente: Modulación amplitud por reflexión.

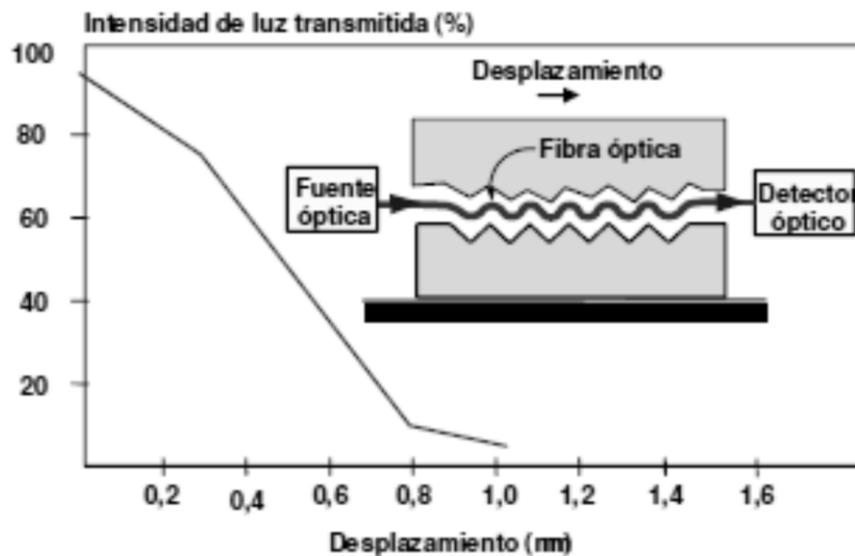
http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 21 de diciembre de 2017.

3.3.2.3. **Modulación de amplitud por microdeformación**

La intensidad de luz transmitida depende del valor de una magnitud física que provoca pequeñas deformaciones en la fibra óptica.

Las deformaciones hacen que no se produzca la reflexión total y que se generen pérdidas. En general, la sensibilidad aumenta con el número de puntos de deformación y/o el espacio entre ellos. Frecuentemente se utiliza para medir presiones y pequeños desplazamientos.

Figura 24. **Modulación por microdeformación**



Fuente: Modulación por microdeformación.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 22 de diciembre de 2017.

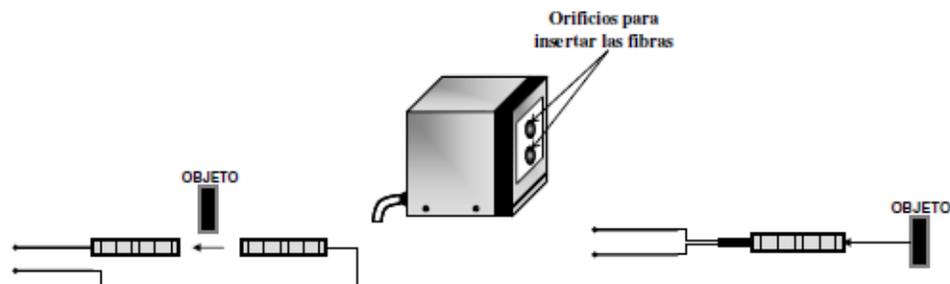
3.3.3. **Modulación de amplitud extrínseca por interrupción de luz**

Otro tipo de instrumentación de fibra óptica es aquel que está basada en el principio de interrupción del haz de luz que se está transmitiendo. Los ejemplos más comunes son los siguientes:

3.3.3.1. Fotocélulas de fibra óptica

Son sensores extrínsecos, implementados en general con fibras multimodo de salto de índice. Su carcasa se instala en la zona más adecuada y la luz se transmite al punto de detección mediante una fibra óptica. Se pueden utilizar con fotoceldas de barrera de luz, de reflexión sobre espejo y de reflexión sobre objeto en lugares de difícil acceso.

Figura 25. Ejemplo fotocelda de fibra óptica



Fuente: Ejemplo fotocelda de fibra óptica.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 22 de diciembre de 2017.

3.3.3.2. Modulación de amplitud por variaciones de la fibra óptica (Intrínseca)

Se basan en la modificación de la composición química de la fibra. Pueden ser:

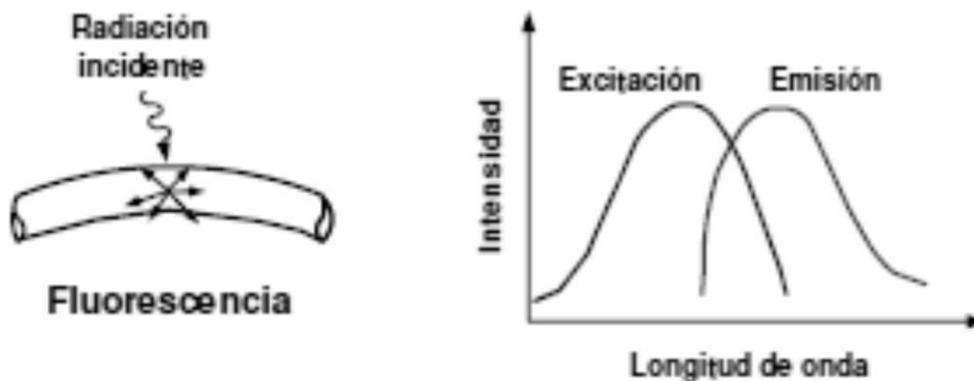
Modificación del espectro de absorción (medidas de temperatura)

Se impurifica el cristal de la fibra para hacer que su espectro de absorción sea sensible a la temperatura (los índices de refracción del núcleo y de la cubierta se aproximan al aumentar la temperatura).

Modificación de la fluorescencia (medidas de radiación)

Se impurifica la fibra para conseguir su fluorescencia. La radiación incidente que se quiere medir estimula fluorescencia.

Figura 26. **Modulación de amplitud por variaciones de fibra óptica**

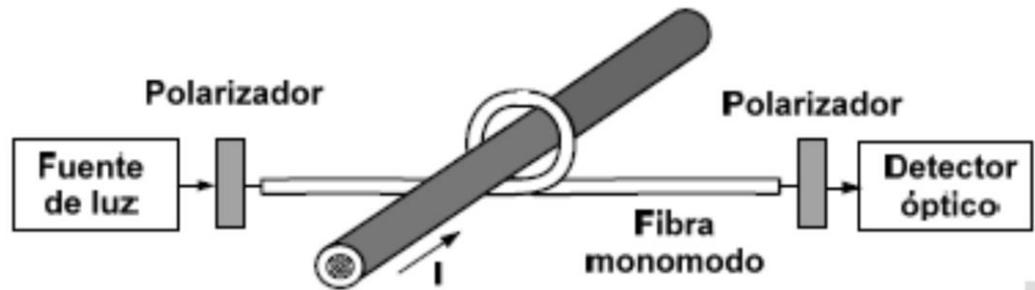


Fuente: Modulación de amplitud por variaciones de fibra óptica.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 22 de diciembre.

Un ejemplo de aplicación de los sensores de fibra óptica intrínsecos es la medida de la corriente eléctrica que circula a través de un conductor. Dicha corriente genera un campo magnético que produce el giro del plano de polarización de la luz enviada por una fuente de luz. A la salida de la fibra óptica, la luz pasa por un segundo polarizador que entrega a su salida una radiación luminosa que es proporcional al campo magnético y, por tanto, a la corriente que se quiere medir.

Figura 27. **Modulación de amplitud por variaciones de fibra óptica**



Fuente: Modulación de amplitud por variaciones de fibra óptica.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf

El mecanismo de fluorescencia se utiliza principalmente en análisis químicos, específicamente en la medida de la concentración de oxígeno disuelto, pH, etc. En general, la utilización de la fibra óptica en los análisis químicos facilita la realización de análisis *in situ* que no afectan al proceso, porque el tamaño de la muestra puede ser extremadamente pequeño. Su principal inconveniente es que la luz ambiente modifica el resultado de la medida y que el tiempo de respuesta puede ser relativamente alto. Otros mecanismos de modulación son la modificación del índice de refracción, el cambio de la polarización, etc.

3.3.4. Sensores de fibra óptica basados en la modulación de la fase

La modulación de fase no se puede detectar directamente debido a que la frecuencia de la luz es demasiado alta (10^{14} Hz) para que los sensores ópticos puedan responder. Por ello se utilizan técnicas interferométricas mediante las cuales la modulación de fase se convierte en modulación de amplitud.

Generalmente se utilizan dos fibras monomodo y elementos ópticos y circuitos relativamente complejos. Presentan numerosas ventajas: flexibilidad geométrica, aislamiento electromagnético, gran ancho de banda y elevada resolución.

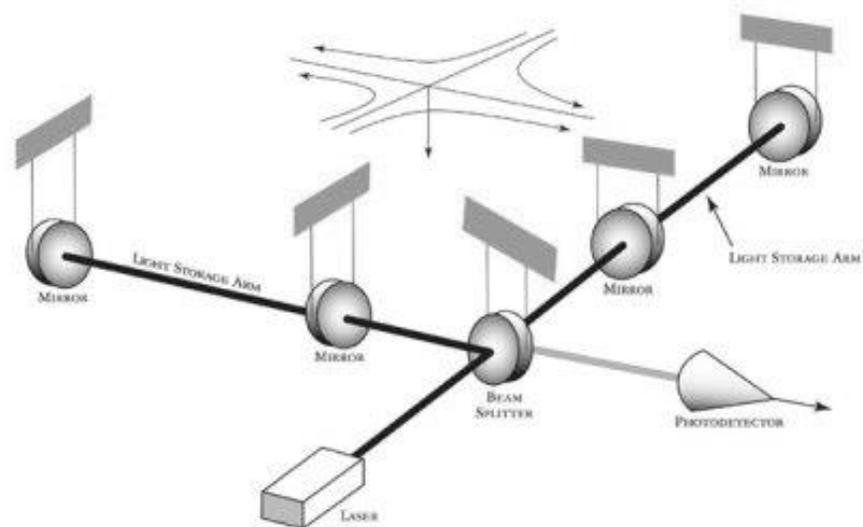
Los cuatro tipos de interferómetros más utilizados son:

- Interferómetro de Mach-Zehnder
- Interferómetro de Michelson
- Interferómetro de Fabry-Perot
- Interferómetro de Sagnac

Interferometría: técnica óptica utilizada ampliamente en astronomía que consiste en combinar la luz proveniente de diferentes receptores. Se basa en la utilización del principio de interferencia de la luz: dos ondas de luz que coinciden en fase, se amplifican; mientras que dos ondas en oposición de fase, se cancelan.

Interferómetros: utilizan una única fuente real para producir dos fuentes a partir de ella. Las fuentes virtuales pueden ser producidas por división de frente de onda y por división de amplitud. En el primer caso, se usan porciones del frente de onda primario, bien sea directamente como fuentes secundarias virtuales o en combinación con otros dispositivos ópticos. En el segundo caso, el haz primario se divide en dos haces secundarios que viajan por diferentes caminos antes de recombinarse e interferir. Los interferómetros se utilizan para medir longitudes de onda y pequeños ángulos.

Figura 28. **Interferómetro de amplitud**



Fuente: Interferómetro de amplitud.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 22 de diciembre de 2017.

Elementos de los interferómetros de fibra óptica

Acoplados direccionales: dispositivos divisores de haz basados en el acoplamiento entre núcleos de dos fibras adyacentes.

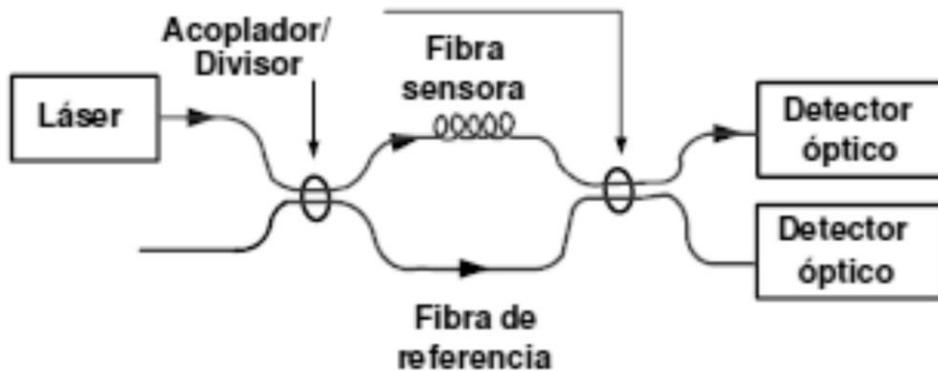
Espejos: espejos de alta calidad, aunque de baja reflectividad. Se pueden conseguir cortando el extremo de la fibra óptica adecuadamente.

3.3.5. Tipos de interferómetros

Interferómetro de Mach-Zehnder: la luz procedente de un diodo láser se divide por igual entre dos fibras monomodo, una que censa y una de referencia. El desplazamiento de fase en la fibra sensora se produce mediante cambios de longitud y de su índice de refracción.

Si las longitudes de onda de ambas fibras son exactamente iguales o difieren en un número entero de longitudes de onda, los recombinados en el acoplador están en fase y la intensidad es máxima. Si, en cambio, los dos rayos están desfasados $t/2$, el rayo recombinado tiene un valor mínimo de intensidad.

Figura 29. **Ejemplo interferómetro Mach-Zehnder**

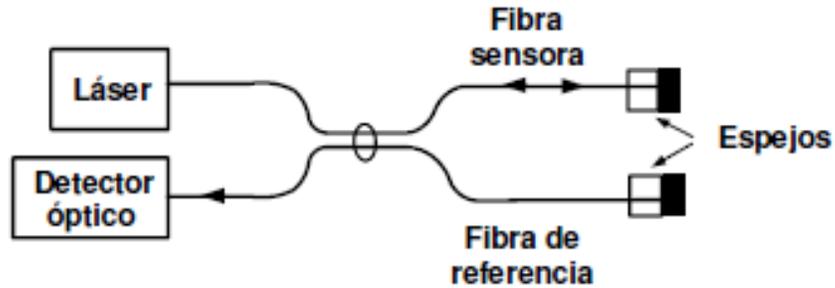


Fuente: Ejemplo interferómetro Mach-Zehnder.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 2 de enero de 2018.

Interferómetro de Michelson: se basa en un interferómetro de Mach-Zehnder en el que las fibras terminan en dos espejos que reflejan la luz hacia el detector, a través del acoplador. De esta forma se elimina uno de los acopladores, aunque la luz realimenta también al laser y se comporta como una fuente de ruido.

Figura 30. **Ejemplo interferómetro Michelson**

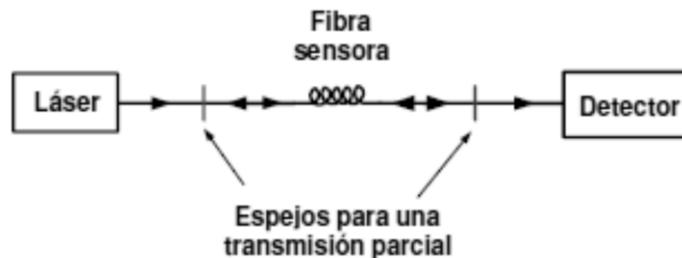


Fuente: Ejemplo interferómetro Michelson.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 02 de enero de 2018.

Interferómetro de Fabry-Perot: no existe fibra de referencia en este interferómetro. El rayo de luz se refleja parcialmente en el detector y llega de vuelta al láser. La porción de luz transmitida (generalmente un 5%) llega al segundo espejo, en el que una parte se refleja de nuevo y otra se transmite al detector óptico (otro 5%). Se obtiene una sensibilidad doble de la de los dos interferómetros anteriores.

Figura 31. **Ejemplo interferómetro Fabry-Perot**

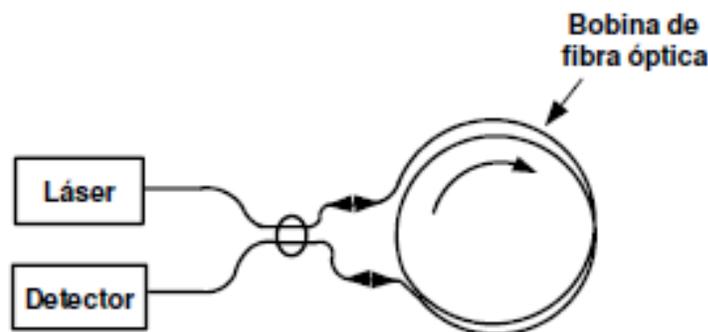


Fuente: Ejemplo interferómetro Fabry-Perot.

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 02 de enero de 2018.

Interferómetro de Sagnac: el rayo de luz se introduce mediante un acoplador a través de los dos extremos de una fibra monomodo arrollada en forma de bobina. Si la bobina está inmóvil, la luz tarda el mismo tiempo en recorrer el camino en ambas direcciones. Sin embargo, si la bobina gira en una determinada dirección, el tiempo de propagación de la luz que se propaga en dicho sentido es mayor, debido a que el camino que recorre es más largo y los rayos que se recombinan están desfasados. Esta técnica se utiliza para medir velocidades de rotación (giroscopios), ya que el desfase depende de la velocidad de giro.

Figura 32. **Ejemplo interferómetro Sagnac**



Fuente: Ejemplo interferómetro Sagnac

http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf. Consulta: 02 de enero de 2018.

3.4. **Antecedentes de instrumentación utilizando fibra óptica**

Los primeros trabajos en el campo de la instrumentación de control industrial se realizaron para conseguir, en la óptica, resultados similares a los que se obtienen en la instrumentación de control industrial utilizada para ese momento.

Sin duda alguna, los resultados fueron sorprendentemente mejores a los de los equipos comúnmente utilizados, debido a las múltiples ventajas técnicas de este material. La mayoría de instrumentación de este tipo basa su funcionamiento en el confinamiento y guía de las ondas luminosas a través de películas o capas delgadas de fibra óptica. Combinando estas películas con otras estructuras, la luz puede ser modulada, filtrada, concentrada e incluso convertida en una radiación láser.

Tipo de guías de onda: aunque no hay clasificación aceptada universalmente, las guías de onda se pueden clasificar, de acuerdo con su comportamiento, en:

- Pasivas: tienen propiedades ópticas constantes y se utilizan para dividir el haz de luz, curvarlo, entre otros.
- Activas: poseen elementos que generan o amplifican un haz de luz, como por ejemplo, un láser.
- Pasivas dinámicas: tienen propiedades ópticas variables cuyo nivel se puede modificar mediante diversos efectos físicos como el electroóptico, el acústico-óptico y el termo-óptico. El electroóptico es ampliamente utilizado porque el LiNbO_3 es un compuesto químico cuyo índice de refracción cambia significativamente cuando se le somete a un campo eléctrico.

3.4.1. Ejemplos de instrumentación de control industrial utilizada en la actualidad

Dentro de la instrumentación que utiliza fibra óptica como medio transductor y que es utilizada en la actualidad para sistemas de control industrial y tareas de automatización de procesos, se pueden ejemplificar las siguientes:

- Sensores de temperatura
- Sensores de presión
- Sensores de posición
- Sensores de registro de marcas de color
- Sensores de detección de objetos pequeños

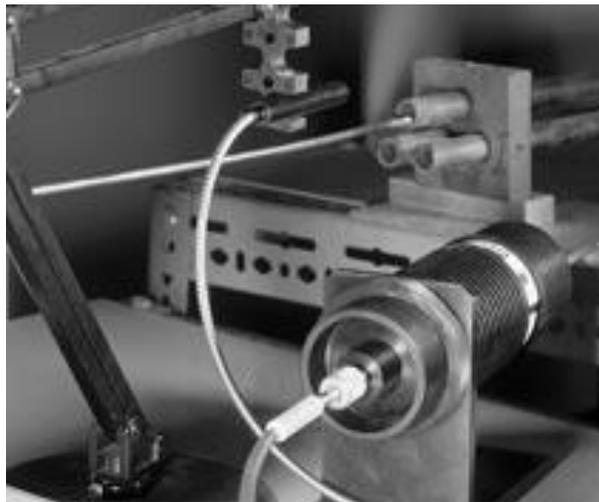
Esta instrumentación de control industrial se vale de las múltiples ventajas técnicas que presenta la fibra óptica, como material de ingeniería, robustez, pocas pérdidas, aislamiento eléctrico, rapidez de respuesta, etc. Por ello, a lo largo del desarrollo de esta investigación se otorgarán ejemplos de instrumentación ya usados en la labor de ingeniería, juntamente con los principios básicos de funcionamiento de este tipo de instrumentación de control industrial. Además, en la descripción de estos ejemplos se resaltarán las ventajas que presentan estos equipos contra los equipos comúnmente utilizados en los sistemas de control industrial.

3.4.1.1. Sensores de temperatura

Esencialmente, un sensor de temperatura es un instrumento encargado de la conversión de las variaciones de temperatura de algún objeto o lugar en señales digitales o analógicas, con el propósito de integrar tales señales dentro del lazo de control. Los sensores de temperatura basados en fibra óptica tienen un rango de operación bastante amplio que oscila entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ e incluyen amplias opciones de comunicación industrial. Este tipo de instrumentación ha encontrado un lugar predominante en la medición de temperatura en procesos de control industrial destinados a producción de vidrio, transformación de piezas en caliente, calderas y, en algunas ocasiones, turbinas.

Estos procesos imponen condiciones de trabajo muy agresivas u hostiles, aspectos que la fibra óptica resiste sin ningún problema.

Figura 33. **Sensor de temperatura basado en fibra óptica**



Fuente: Micronor Inc. *Sensor de temperatura basado en fibra óptica.*

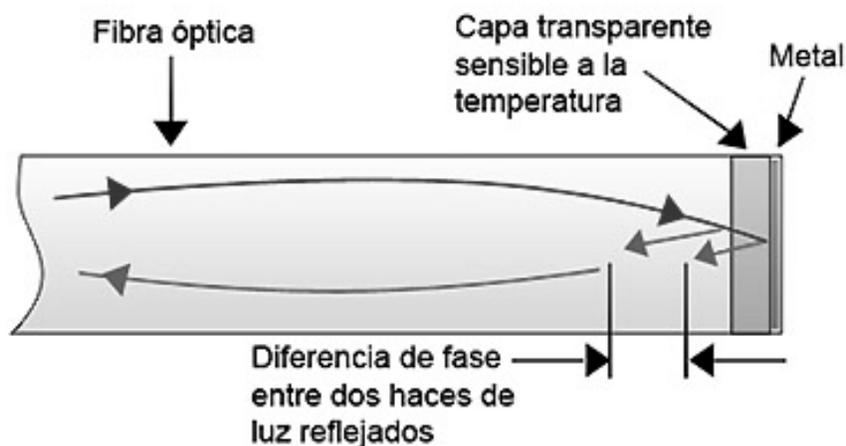
<https://www.fibraopticahoy.com/sensor-temperatura-fibra-optica/>. Consulta: 03 de enero de 2018

Este tipo de instrumentación con fibra óptica como material transductor basa su funcionamiento en un acondicionador de señal, el cual posee una fuente de luz de banda ancha continua en la fibra óptica de 200 μm del sensor. Este ilumina un cristal GaAs (arseniuro de galio) montado en la punta de la fibra óptica. El cristal absorbe longitudes de onda por debajo de su hueco de banda y refleja las longitudes superiores. La región de transición entre el espectro reflejado y transmitido depende de la temperatura (con una variación de unos 0,4 nm por grado Kelvin). El analizador de espectro óptico interno del sensor comprueba la señal óptica reflejada y, entonces, indica el valor de temperatura correspondiente. Esta técnica de medición posibilita medidas estables y precisas a largo plazo sin necesidad de calibración periódica.

Es una de las muchas áreas donde los sensores de temperatura aportan mejores prestaciones que otras alternativas. Un ejemplo de aplicación se encuentra en la monitorización de la temperatura interna de transformadores de aceite, con una esperanza de vida de más de 20 años.

Un sensor de temperatura por fibra óptica aporta una solución de monitorización de temperatura discreta que opera con precisión en lugares donde no pueden funcionar sensores basados en electrónica (termopares o RTD). Su diseño pasivo sin metales proporciona inmunidad a la interferencia electromagnética (*EMI*), a la interferencia de radiofrecuencia (RFI), microondas, alta tensión, campos magnéticos extremos, radiación, elementos químicos y atmósferas explosivas. Este método funciona bien para superficies que no emiten luz, pero están calientes por debajo de unos 400 °C.

Figura 34. **Funcionamiento sensor de temperatura fibra óptica**



Fuente: Micronor Inc. Funcionamiento sensor temperatura fibra óptica.

<https://www.fibraopticahoy.com/sensor-temperatura-fibra-optica/>. Consulta: 04 de enero de 2018.

Tabla IV. **Detalle técnico sensor de temperatura basado en fibra óptica**

Especificaciones	
Voltaje de alimentación	12 VDC
Corriente nominal	350 mA
Rango de temperatura	-200° C a +300° C
Resolución	0,1° C
Exactitud	+/- 0,2° C
Peso	140 gramos

Fuente: elaboracion propia.

3.4.1.2. Sensores de presión

Los sensores de presión o transductores de presión son muy habituales en cualquier proceso y/o sistema de automatización industrial. Su objetivo es transformar una magnitud física en una eléctrica; en este caso, transforman una fuerza por unidad de superficie en un voltaje equivalente a esa presión ejercida. La instrumentación comúnmente puede medir la presión absoluta y relativa. Los sensores de presión de fibra óptica basan su funcionamiento en el uso de interferómetros para la medición de los cambios de presión de manera fácil y con alto grado de sensibilidad. Los ingenieros de investigación en diferentes áreas industriales ahora pueden mejorar la tecnología de procesos y productos al monitorear el rendimiento de propiedades específicas a lo largo del tiempo, que proporcionarán información precisa sobre los cambios en la presión durante el proceso de fabricación, la operación o durante la vida del producto. El sensor de presión óptica de fibra basa su funcionamiento en la tecnología probada de interferómetro Fabry-Perot. El diseño único de los sensores se basa en la medición de deflexión sin contacto de un diafragma de acero inoxidable, a diferencia de las técnicas de medición de esfuerzos más convencionales. La presión crea una variación en la longitud de la cavidad Fabry-Perot. Un

acondicionador de señal de fibra óptica puede medir consistentemente la longitud de la cavidad con alta precisión bajo todas las condiciones adversas de temperatura, EMI, humedad y vibración.

Figura 35. **Ejemplo interferómetro Michelson**



Fuente: Direct Indutry. Sensor de presión relativa basado en interferómetro.

<http://www.directindustry.es/prod/fiso-technologies/product-16668-211306.html>. Consulta: 04 de enero de 2018.

Tabla V. **Detalle técnico sensor de presión basado en fibra óptica**

Especificaciones	
Rango de presión	30 psi a 10000 psi (170 a 69000kPa)
Resolución	0,00625% típico
Exactitud	0,25% a escala total
Tipo de conector	Conector ST (conector opcional para aplicaciones de largo alcance)
Rango de operación	-20°C to 60°C (-4°F to 140°F)

Fuente: elaboración propia.

3.4.1.3. Sensores de posición

La necesidad de detectar la presencia de objetos está vinculada al correcto desempeño de una máquina o proceso, dada la importancia de conocer exactamente dónde se ubica un objeto y/o parte de una maquinaria.

Su objetivo es, entonces, saber si un objeto se encuentra en un determinado punto. Ya sea para contar piezas, movilizarlas o accionar otros mecanismos con base en la posición del objeto, los sensores de proximidad son una pieza fundamental en la industria. Dentro de los lazos de control industrial, la posición de objetos o piezas de máquinas son variables comúnmente medidas; de allí la razón por la cual un sensor de posición tiene un lugar muy importante dentro del campo de la automatización industrial. Los sensores de posición podrían catalogarse en dos instancias: movimiento lineal y movimiento angular. A continuación, se abordarán las características de un sensor de movimiento angular. En muchas aplicaciones se encontrarán objetos sólidos, piezas de maquinaria que describen un movimiento angular que debe ser medido con suma precisión.

En la mayoría de los casos, debido a la particularidad del movimiento, se requiere de un sensor con una precisión y tiempo de respuesta excepcionales. Los sensores de posición angular basados en fibra óptica tienen un principio de funcionamiento que emplea una novedosa técnica óptica embebida en un sensor pasivo y un conector activo. Ambos están conectados por un par de fibras ópticas que se encargan de llevar la luz desde el control hasta el sensor y luego traerla de vuelta con la información de posición.

El controlador transmite una “ráfaga de luz” al disco de código en el sensor que modula los componentes espectrales de la luz recibida en función de la posición angular del objeto que se está monitoreando.

La información de dicha posición se grafica o “serigrafía” en el espectro óptico y se devuelve al controlador para una lectura precisa.

Figura 36. **Ejemplo interferómetro Michelson**



Fuente: Micronor. *Sensor posición angular*. Consulta: 06 de enero de 2018.

Tabla VI. **Detalle técnico sensor de posición basado en fibra óptica**

Especificaciones	
Rango de presión	30 psi a 10000 psi (170 a 69000kPa)
Resolución	0,00625% típico
Exactitud	0,25% a escala total
Tipo de conector	Conector ST (conector opcional para aplicaciones de largo alcance)
Rango de operación	-20°C to 60°C (-4°F to 140°F)

Fuente: elaboración propia.

3.4.1.4. Sensores de registro de marcas de color

Este tipo de instrumentación es utilizado en muchas aplicaciones de control industrial. La detección de registro de marcas de color es ampliamente utilizada en industria o procesos automatizados para soluciones de etiquetado, enmarchamado o empaquetado de productos.

Estos lazos de control tienen la particularidad de trabajar a velocidades muy elevadas, lo que hace muy necesario tener instrumentación que pueda trabajar a esta velocidad sin comprometer la confiabilidad del sistema de control y continuar. Los sensores de marcas de registro a menudo son conocidos como sensores de contraste de color. Este tipo de instrumentación actúa como detector de color al identificar el contraste de color por muy sutil que sea. Principalmente se utiliza para inspeccionar las marcas de registro, usando uno, dos o tres leds de color.

Este sensor basa su funcionamiento en la reflexión de los haces de luz sobre el objeto que se desea monitorear. Al sensor se le coloca un valor de referencia para su óptimo funcionamiento. Este emite un haz de luz (*red, green, blue* – RGB); la cantidad de luz de reflejada sobre el objeto se compara con el valor previamente establecido y así permite establecer el color del objeto que está frente al sensor. Los haces de luz emitidos y reflejados se transportan a través de fibra óptica, lo cual asegura un tiempo de respuesta muy corto y un óptimo desempeño ante velocidades de trabajo elevadas.

Tabla VII. **Detalle técnico sensor de marcas de color basado en fibra óptica**

Especificaciones	
Material de la carcasa	ABS resistencia a impactos
Voltaje de operación	10 – 30 VDC
Corriente nominal	100 mA
Tiempo de respuesta	Hasta 700 microsegundos
LED transmisor	Blanco 400 a 700 nanómetros - visible
Temperatura ambiente	-10° C a +55° C
Grado de protección	IP67
Peso	40 gramos

Fuente: elaboración propia.

3.4.1.5. Sensores de detección de objetos pequeños

Sensores de fibra óptica para la detección de objetos pequeños son aptos y ampliamente utilizados para aplicaciones de empaquetado, verificación de piezas en áreas de difícil acceso o espacios confinados. Estos sensores constan de una unidad de amplificación de luz y un cable de fibra óptica que se puede instalar en el área de detección, lo que permite el ajuste remoto de la sensibilidad y, de esta manera, obtener una óptima respuesta ante variaciones mínimas de la variable que se está monitoreando (Distancia). Su funcionamiento es a partir de un fotodetector basado en la fotoconductividad (fibra óptica). Esta instrumentación de detección de objetos pequeños opera electrónicamente como cualquier otro sensor dentro del sistema de control industrial, con la particularidad que la luz emitida y recibida es transportada por una fibra óptica, cuyo extremo —siempre de dimensiones muy pequeñas y con diferentes formas— puede ser instalado en lugares extremadamente demandantes u hostiles. Esto permite, dado al pequeño tamaño de la fibra óptica, detectar objetos diminutos, haciendo instalaciones especiales con sensores normales. Su principio de funcionamiento se basa en la reflexión de la luz emitida por el sensor al objeto que se desea monitorear, lo que provee la información necesaria concerniente a la presencia del objeto. Esta clase de instrumentación se utiliza especialmente cuando el espacio es reducido o existen grandes exigencias de alcance, resistencia térmica, resistencia de los materiales o un montaje flexible, riesgo de explosión o inmersión en líquidos. Tiene una alta resistencia a los golpes y vibraciones que la hace adecuadas en las partes móviles de la máquina, entre otras aplicaciones.

Tabla VIII. **Detalle técnico sensor de objetos pequeños basado en fibra óptica**

Especificaciones	
Voltaje de operación	12 – 24 VDC
Corriente nominal	25 – 30 mA
Tiempo de respuesta	500 microsegundos
LED transmisor	Rojo 660 nanómetros - visible
Temperatura ambiente	-25° C a +55° C
Grado de protección	NEMA 1, 12, 13 - IP65
Peso	40 gramos

Fuente: elaboración propia.

Las fichas técnicas de los sensores ejemplificados en este trabajo de graduación están en el apartado de anexos.

3.5. Comparativa de instrumentación de fibra óptica con tecnologías convencionales

En este apartado se hará un resumen de propiedades básicas de la instrumentación que utiliza fibra óptica como medio transductor. También se comparará la instrumentación que utiliza fibra óptica con la que comúnmente se utiliza en los lazos de control industrial. A manera de ejemplo, se comparará un (01) sensor de temperatura de tecnología convencional con un (01) sensor fibra óptica. Los valores utilizados están basados en hojas técnicas obtenidas específicamente para este fin demostrativo, información que puede ser revisada con más detalle en el apartado de anexos.

A continuación se observa la comparación entre sensores de temperatura de tecnología convencional versus fibra óptica

Tabla IX. **Comparación entre instrumentación de fibra óptica vrs. instrumentación de tecnología convencional**

Características	Tecnología convencional			Fibra óptica		
Robustez	Entornos agresivos			Entornos agresivos		
	Alta	Media	Poca	Alta	Media	Poca
Resistencia mecánica	Golpes y vibraciones			Golpes y vibraciones		
	Alta	Media	Poca	Alta	Media	Poca
Tipo de montaje	Versatilidad para montaje			Versatilidad para montaje		
	Alta	Media	Poca	Alta	Media	Poca
Sensibilidad	Sensibilidad a interferencia externa			Sensibilidad a interferencia externa		
	Alta	Media	Poca	Alta	Media	Poca
Precisión	Precisión para la medida			Precisión para la medida		
	Alta	Media	Poca	Alta	Media	Poca
Error	Grado de error en la medida			Grado de error en la medida		
	Alta	Media	Poca	Alta	Media	Poca
Conectividad	Opciones de conectividad			Opciones de conectividad		
	Alta	Media	Poca	Alta	Media	Poca
Rango de medición	Rango de valores para medir			Rango de valores para medir		
	Amplio		Limitado	Amplio		Limitado
Tiempo de respuesta	Velocidad para detectar cambios			Velocidad para detectar cambios		
	Alta	Media	Poca	Alta	Media	Poca
Tiempo de vida estimado	Vida útil			Vida útil		
	Alta	Media	Poca	Alta	Media	Poca
Mantenimiento	Tareas de mantenimiento			Tareas de mantenimiento		
	Alta	Media	Poca	Alta	Media	Poca

Fuente: Elaboración Propia.

4. CAPÍTULO IV

4.1. Innovación de fibra óptica en instrumentación industrial

La instrumentación que utiliza las propiedades físicas, mecánicas y ópticas de la fibra óptica ha revolucionado, robustecido y mejorado los lazos de control industrial. Con este material se pueden realizar un sinnúmero de aplicaciones, no solo en el ámbito industrial sino también en otras áreas como la medicina, seguridad, diseño de interiores, etc.

La fibra óptica, específicamente dentro del ámbito de la automatización industrial, juega un papel muy importante porque prácticamente existe en casi cualquier lazo de control. Se emplea no solo para establecer las comunicaciones entre los diversos equipos del sistema de control sino que también la instrumentación se vale de este noble pero poderoso material. Un sistema de automatización correctamente diseñado es aquel que permite, de manera fácil y sencilla, mejoras en sus equipos con el fin de entregar un valor agregado al sistema de control.

Sin lugar a dudas, la implementación de instrumentación que utilice fibra óptica como material transductor es una mejora considerable para un sistema de control moderno, por las múltiples propiedades que aporta al sistema de control.

4.2. Ventajas de la instrumentación con fibra óptica

Las ventajas que aporta la instrumentación de control industrial con fibra óptica como material transductor a los sistemas de control o automatización industrial son diversas e importantes, no solo en el aspecto técnico, sino que en el ámbito financiero al momento de implementar un sistema de control.

A manera de resumen se tabularán los aspectos técnicos más relevantes de este material de ingeniería, con el objetivo de centralizar y brindar al lector un panorama conciso de los múltiples beneficios con que contaría el sistema o lazo de control que se desea implementar al momento de tomar esta instrumentación como una opción dentro del sistema.

4.3. Costo-beneficio de la instrumentación que utiliza fibra óptica

Una de las principales razones por las cuales la instrumentación de fibra óptica no ha tenido el auge o aceptación de una manera generalizada, es por el costo. Si se toma como base la comparación de la tabla 6, donde se evidencian las ventajas técnicas que la fibra óptica aporta al sistema de control, más el punto de vista financiero, se podrá analizar los beneficios de utilizar esta instrumentación en los lazos de control modernos. Importante: debido a la amplia gama de precios existentes en el mercado, se representará el precio de la instrumentación en un rango para resumir la diversidad de precios del mismo tipo.

Tabla X. **Comparación entre la instrumentación de fibra óptica vrs. instrumentación de tecnología convencional**

Instrumentación	Tecnología convencional – precio	Fibra óptica - precio
Temperatura	\$ 70,00 – \$ 85,00	\$ 100,00 – \$ 150,00
Presión	\$ 40,00 – \$ 700,00	\$ 1000,00 – \$ 1250,00
Movimiento angular	\$ 100 - \$ 200,00	\$ 300,00 – \$ 40,00
Detección marcas de color	\$ 140,00 – 160,00	\$ 180,00 – \$ 220,00
Detección objetos pequeños	\$ 180,00 – \$ 200,00	\$ 320,00 – \$ 400,00

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La instrumentación que utiliza fibra óptica como medio transductor posee un gran potencial y aporta confiabilidad, robustez y versatilidad al sistema de control en el cual se encuentra implementada. Al aprovechar al máximo las propiedades de este material se obtiene un lazo de control con amplios y correctos tiempo de respuesta ante mínimas variaciones de cualquier variable que se estuviese monitoreando. Posee, además, un amplio número de posibilidades del cual dispone el personal técnico o de ingeniería encargado del diseño, construcción e implementación del sistema de control o proceso.
2. A raíz de las grandes exigencias de los sistemas de control actuales y los procesos críticos que se monitorean constantemente con lazos de control, contar con la instrumentación adecuada no es cuestión de opciones; se trata del uso consiente de la mejor tecnología para aportar al proceso el mejor control disponible y, de esta manera, contar con un lazo de control del cual se podrá extraer el mejor provecho aun en las condiciones más adversas. Con este fin, se entregó una base clara y concisa de la instrumentación que utiliza fibra óptica como medio transductor al momento de ser implementado en un lazo de control industrial.
3. Regularmente, los sistemas de control están destinado al monitoreo de procesos en los cuales las condiciones de operación son tan adversas que solo se requiere de equipos e instrumentación que se adapten a los ambientes hostiles sin comprometer en ninguna forma la certeza y exactitud

de los parámetros monitoreados. Es allí precisamente donde destacan las características de mayor interés en la fibra óptica, por su gran adaptabilidad a entornos hostiles sin comprometer en ninguna forma la exactitud del lazo de control.

4. Se informó al personal técnico y de ingeniería acerca de las ventajas de instrumentación con fibra óptica como material transductor, sus características y el tiempo de respuesta ante mínimas variaciones que presenta el proceso que se está monitoreando. La instrumentación objeto de esta investigación técnica ha demostrado contar con un tiempo de respuesta que encaja muy bien ante los requerimientos para implementar un sistema de control confiable y versátil sin entorpecer la correcta labor del sistema de control.
5. Tomar en cuenta los factores no técnicos pero que influyen de forma directa como el costo, calidad y cantidad de equipos necesarios para la implementación del sistema. La fibra óptica brinda las opciones necesarias para la correcta selección de la instrumentación sin comprometer de alguna manera el aspecto financiero del sistema por implementar.
6. Un sistema de control implementado y desarrollado con instrumentación de control industrial tiene las ventajas de ser un lazo de control versátil, robusto y con una respuesta excepcional ante mínimas variaciones a pesar de estar en ambientes hostiles o extremadamente demandantes y, de esta manera, tener la completa seguridad de que la instrumentación responderá ante las exigencias más severas a la que está sometido el sistema.

RECOMENDACIONES

1. El nuevo uso de tecnología de vanguardia trae consigo nuevos retos en cuanto al aprendizaje, familiarización e implementación de la instrumentación con fibra óptica. Por ello, se debe dotar al personal técnico y de ingeniería con una guía básica para la correcta selección, adquisición e implementación de esta instrumentación en los lazos de control. Esto ayudaría a que los ingenieros encargados del diseño, implementación y puesta en marcha del sistema de control tengan una gran confiabilidad y que el tiempo de implementación y operación sobrepasan a los ya habituales y robustos equipos.
2. Tomar en cuenta todos los aspectos técnicos-económicos detallados en este trabajo de graduación para una correcta implementación de esta tecnología en el diario ejercicio profesional de ingeniería, si las condiciones son favorables para una optimización en el área de automatización y control industrial.
3. Comúnmente, todos los sistemas de control o lazos de control, después de cierto tiempo de estar en operación, se ven en la necesidad de hacer mejoras considerables a los elementos que integran dicho lazo de control. Es allí donde el personal técnico y de ingeniería, una vez analizado este trabajo de graduación, tendrá la suficiente información técnica para tomar en consideración este tipo de equipos para las mejoras pertinentes en el sistema de automatización o a futuro dentro de dicho sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. CÓRDOVA, MAXIMILIANO. *Procesos de fabricación de fibras ópticas*. Universidad de Belgrano Buenos Aires. Departamento de Investigación. 2003. 61 p.
2. DEMO E-DUCATIVA CATEDU. *Índice de Refracción*. [en línea] <http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3236/html/21_ndice_de_refraccin.html> [Consulta: diciembre de 2017].
3. Español Wikipedia. *Ley de Snell*. [en línea] <https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Snell> [Consulta: diciembre de 2017].
4. _____ . *Propagación de ondas*. [en línea] <<https://es.wikipedia.org/wiki/Luz>> [Consulta: diciembre de 2017].
5. E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación de Vigo. *Sensores optoelectrónicos. Departamento de Tecnología electrónica*. [en línea] <http://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_05-OPTOELECTRONICA_1_.pdf> [Consulta: 03 enero 2018].
6. VARGAS, IBRAHIM. *Sistemas de fibra óptica*. Universidad de San Luis Gonzaga de ICA. 2001. 40 p.

7. Web Física. *Descripción de la propagación de ondas*. [en línea]
<<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/descripcion/descripcion.html>.> [Consulta: diciembre de 2017].

ANEXO

Anexo 1. Hoja datos sensor de temperatura con fibra óptica

FIBER OPTIC SIGNAL CONDITIONER FOTEMP1-OEM-MNT

DESCRIPTION

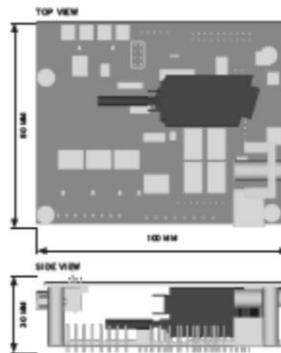
The FOTEMP-OEM-MNT is a small form factor PCB-sandwich module designed for low cost insertion of high precision GaAs-based fiber optic temperature sensor technology into OEM applications where common electrical temperature sensors and thermocouples cannot be used.

This OEM product is compatible with all TS series fiber optic temperature probes. The sensors are entirely non-metallic and electrically passive, providing immunity to EMI, RFI, NMR, high voltage, microwaves and radiation.

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Number of channels	1
Power supply	12 VDC
Power supply	350 mA
Measuring Range	-200°C to +300°C (Actual depends on calibration)
Accuracy	±/ - 0.2 °C
Resolution	0.1 °C
Sampling rate	4 Hz
Digital Interface	Standard: RS232/USB/SPI
Analog Interface	Optional: 4-20mA
Protocol	ASCII over RS232, USB SPI emulates TI TMP123 See FOTEMP-Assistant data sheet for ASCII protocol details
Data logging	Supplied with FOTEMP-Assistant software. Excel compatible.
Optical Interface	SI, compatible with all TS series fiber optic temperature probes
Temperature	Storage: -20°C to +70°C Operating: 0°C to +50°C
Weight	140g
Dimensions	100 x 80 x 30 mm
Warranty	2 years
Calibrations	Standard: -40°C to +300°C Optional: -200°C to +300°C One point user calibration via software
Calibration Interval	Under normal use, the instrument does not require recalibration. When sensors and cables are changed, a One-Point Calibration is required. Recommended cal interval is 12 months for ISO systems.

DIMENSIONS



Ordering Info

FOTEMP1-OEM-MNT

Standard single-channel signal conditioner with built-in USB, RS232 and SPI interfaces

FOTEMP1-OEM-MNT-4

Standard USB/RS232/SPI interfaces + 4-20mA analog output

TS series temperature probes available from stock:

TS2-02	TS2 General Purpose, Length=2m
TS2-06	TS2 General Purpose, Length=6m
TS3-10MM-02	TS3 General Purpose, L1=10mm, L=2m
TS3-10MM-06	TS3 General Purpose, L1=10mm, L=6m
TS4-02	TS4 Harsh Chemicals, Length=2m
TS4-06	TS4 Harsh Chemicals, Length=6m
TS5-20MM-02	TS5 Medical, L1=20mm, Length=2m
TST2-02	TSTRAFO Transformers, Length=2m

Other temperature sensor lengths and configurations available upon request.

Contact Micronor to discuss your OEM application and quantities.



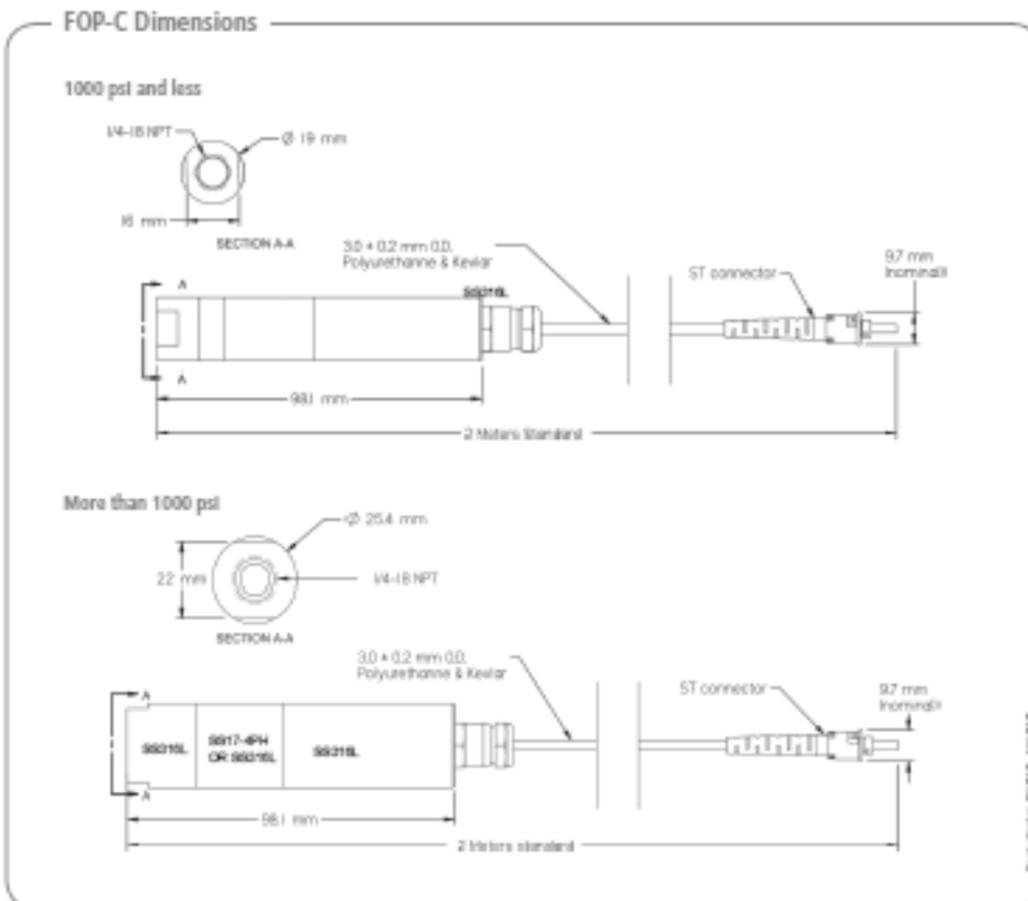
Fuente: Micronor Inc. (2016). Sensor de temperatura basado en fibra óptica.

<https://www.fibraoptica hoy.com/sensor-temperatura-fibra-optica/>. Consulta: diciembre 2017

Anexo 2. Hoja datos sensor de objetos pequeños

Specifications	
Pressure range	From 30 psi to 10 000 psi (170 to 69 000 kPa)
Resolution ¹	0.00625% typical with averaging
Accuracy	0.25% of full scale
Connector type	ST connector (optional connector for long range applications)
Operating temperature	-20°C to 60°C (-4°F to 140°F)

¹. Signal conditioner dependent.



Sensor de objetos pequeños basado en fibra óptica.

<https://ab.rockwellautomation.com/es/Sensors-Switches/Fiber-Optic-Sensors/Slim-Fiber-Optic-Sensors>. Consulta: diciembre 2017

Anexo 3. Hoja datos sensor de marcas de color

Sensores de color de la serie CRT			Sensores de luminiscencia de la serie LRT		
Datos ópticos	CRT 442	CRT 20B	Datos ópticos	LRT 8	LRT 440
Rango de detección	12,5 mm	12,5 / 60 mm	Rango de detección	0 – 200 mm	0 – 300 mm
Tamaño punto de luz	1,5 x 6,5 mm	4 x 2 mm / 13 x 13 mm	Tamaño punto de luz	3 – 40 mm	10 – 25 mm
Emisor	RGB	RGB	Emisor	UV	UV
Tiempos			Tiempos		
Tiempo de respuesta	0,5 ms	85 / 145 µs	Tiempo de respuesta	0,35 ms	0,83 ms
Frecuencia de conmutación	1,500 Hz	6 / 3,5 kHz	Frecuencia de conmutación	1,5 kHz	0,6 / 6 kHz
Ajustes			Ajustes		
Teach-in	X	X	Teach-in	–	–
Nivel Teach-in	–	X	Nivel Teach-in	–	–
Easy Tune	–	–	Easy Tune	–	–
IO-Link	–	–	IO-Link	–	–
Potenciómetro	–	–	Potenciómetro	X	–
Botones	–	–	Botones	–	X
Opciones			Opciones		
Funciones por pin 2	X	X	Funciones por pin 2	–	–
Prolongación impulso	–	X	Prolongación impulso	–	–
Configuración	–	X	Configuración	–	–

Sensor de marcas de color basado en fibra óptica.

<https://industrial.omron.mx/es/products/mark-and-colour-sensors>. Consulta: diciembre 2017

Anexo 4. Hoja datos sensor de objetos pequeños

IMPORTANT: SAVE THESE INSTRUCTIONS FOR FUTURE USE.

Description

The Bulletin 42FA Slim Fiber Optic sensors are useful for applications where compact Fiber Optic sensing is required. Only 8mm x 10mm in diameter, these sensors offer range and response times similar to much larger Fiber Optic sensors.

Bulletin 42FA Slim Fiber Optic sensors are supplied with a DIN rail mounting bracket. Over 40 compatible standard plastic fiber optic cables are available.

Features

- Dual LED indicators: output (red), stability (green)
- Visible red light source
- Selectable light or dark operate
- Can be DIN rail mounted

Wiring

NPN Output

PNP Output

Connector

Features (continued)

- Reverse polarity protection
- False pulse protection
- Transient noise protection

General Specifications

Relative Humidity	85% max
Ambient Temperature	-13°F to +131°F (-25°C to +55°C)
Housing Material	Nylon
Operating Environment	NEMA 1, 12, 13 and IP65
Approvals	UL listed and CSA certified, class 2 source required
Weight	40 grams (1.4 oz) 42FA-P2LNA-A2 42FA-P2LPA-A2
	68 grams (2.2 oz) 42FA-P2LNA-P3 42FA-P2LPA-P3

Dimensions—mm (inches)

Pico Quick-Disconnect Versions

42FA-P2LPA-P3
42FA-P2LNA-P3

Cable Versions

42FA-P2LPA-A2
42FA-P2LNA-A2

Sensor de objetos pequeños basado en fibra óptica.

<https://www.sick.com/es/es/fotocelulas/fibra-optica-y-sensores-con-fibra-optica/c/g188251>.

Consulta: diciembre 2017