



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE MAR DEL PLATA



FACULTAD DE
INGENIERÍA

Proyecto Final

“Monitoreo Remoto de Magnitudes Mecánicas de un motor eléctrico por medio de Fibra Óptica”

Autores: Martínez Ario Eitel
Ingeniería electromecánica

Suttora Pablo
Ingeniería eléctrica

Tutores: Ing. Dimenna Claudio
Ing. Arenas Gustavo

Diciembre 2006

Calificación:



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE MAR DEL PLATA



FACULTAD DE
INGENIERÍA

Proyecto Final

“Monitoreo Remoto de Magnitudes Mecánicas de un motor eléctrico por medio de Fibra Optica”

Autores: Martínez Ario Eitel
Ingeniería electronecánica

Suttora Pablo
Ingeniería eléctrica

Tutores: Ing. Dimenna Claudio
Ing. Arenas Gustavo

Diciembre 2006

Calificación:

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración a nuestros tutores el Ingeniero Claudio Dimenna jefe del departamento de ingeniería eléctrica y electromecánica y al Ingeniero Gustavo Arenas investigador del laboratorio de laser del departamento de física.

Como así también la desinteresada colaboración del Ingeniero Raúl Rivera y el Ingeniero Walter Gemin ambos investigadores del laboratorio de adquisición de datos del departamento de electrónica, todos miembros de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Sin su colaboración tanto técnica como moral no hubiese sido posible realizar nuestra tesis.

No podemos dejar de agradecer a nuestros familiares y amigos por su incondicional apoyo y comprensión sobre todo debido a la gran cantidad de horas dedicadas a nuestro trabajo y restadas a todos ellos.

Gracias a todas las personas que nos quieren y nos alentaron a seguir adelante sobre todo en aquellos momentos donde nos parecía imposible encontrar las soluciones a los problemas.



Índice

1) Introducción.....	4
2) Reseña histórica de los sistemas ópticos.....	7
3) Conceptos ópticos e información básica.....	18
4) Enlaces por fibra óptica.....	26
5) Composición y tipos de fibras.....	28
6) Uso de la fibra en aplicaciones industriales.....	31
7) Fabricación de la fibra.....	34
8) Cables ópticos empalmes conectores.....	44
9) Emisores y receptores ópticos.....	56
10) Conceptos básicos sobre las lentes.....	78
11) Aplicaciones del laser y la fibra en la TV por cable.....	83
12) Aplicaciones experimentales con fibra óptica.....	84
13) Técnicas de medición.....	85
14) Caracterización del emisor y del receptor.....	88
15) Ensayo laboratorio de laser por reflexión de la luz.....	91
16) Ensayo laboratorio de maquinas eléctricas por reflexión de la luz.....	93
17) Adquisición de datos.....	97
18) Problemas del sensor por reflexión de la luz.....	100
18) Ensayo laboratorio de laser por transmisión de la luz.....	102
19) Ensayo laboratorio de maquinas eléctricas por transmisión de la luz.....	105
20) Problemas del sensor usando transmisión sin el PIC.....	108
21) Adquisición de datos con el microcontrolador.....	109
22) Ensayo laboratorio de maquinas eléctricas por transmisión con el PIC.....	114
23) Evaluación económica.....	121
24) Impacto ambiental.....	123
25) Conclusiones.....	124
26) Referencias.....	125



Introducción

A medida que progresa el desarrollo humano y tecnológico, aumenta la necesidad de transmitir grandes cantidades de información a largas distancias. Como unidades de medida de estas magnitudes se puede usar, respectivamente, el MHz y el Km. Distintos medios de transmisión tienen diferentes capacidades de transmisión. A un cable de cobre de un par se le asigna generalmente una capacidad de transmisión de 1 MHz.Km, a un radio-enlace o un cable coaxial una capacidad de aproximadamente 100 MHz.Km, mientras que a una fibra de modo único (monomodo) aproximadamente 100 GHz.Km.

En consecuencia por medio de un sistema de fibra óptica, se puede transmitir una gran cantidad de información, a distancias moderadas, como en sistemas de datos, o puede transmitirse moderada cantidad de información sobre largas distancias, como en telecomunicaciones.

La ausencia de metal en la fibra óptica y su bajo peso, la hacen muy apta para aplicaciones en severas condiciones de servicio, como por ejemplo, en trenes, buques o aviones. El cable de fibra óptica puede ser tendido, con ventajas, próximo o incluso dentro de cables de energía eléctrica aun de alta tensión.

Debido al gran desarrollo tecnológico en la fabricación de la fibra, se ha conseguido un cable de muy bajas pérdidas, menor tamaño y bajo peso, además se han logrado emisores y receptores de gran velocidad de respuesta, los cuales son muy apropiados para la transmisión de datos digitales a gran velocidad, lo que hace indispensable su aplicación en el área de telecomunicaciones. También en el campo de la ingeniería eléctrica y electromecánica, debido a todas estas ventajas su uso es cada vez mayor, además una de las propiedades más importantes es la de ser inmune a las interferencias electromagnéticas.

Entre las ventajas y desventajas más importantes que presentan las fibras ópticas tenemos las siguientes:

Ventajas

Insensibilidad a la interferencia electromagnética, como ocurre cuando un alambre telefónico pierde parte de su señal a otro. Las fibras no pierden luz, por lo que la transmisión es también segura y no puede ser perturbada. Carencia de señales eléctricas en la fibra, por lo que no pueden dar sacudidas ni otros peligros. Son convenientes por lo tanto para trabajar en ambientes explosivos. Livianidad y reducido tamaño del cable capaz de llevar un gran número de señales. Sin puesta a tierra de señales, como ocurre con alambres de cobre que quedan en contacto con ambientes metálicos. Compatibilidad con la tecnología digital. Fácil de instalar. Bajas pérdidas.

Gran Ancho de Banda. Tamaño y Peso Reducido. Inmunes a EMI. Seguridad.

Material base abundante. No le afecta ningún tipo de interferencia. Puede pasar el cable de fibra al lado de conductores que transportan grandes cantidades de energía.

Son fáciles de conseguir en el mercado. Alcance máximo por tramo de Fibra Óptica Multimodo 2.000 Mtrs y Monomodo 8.000 Mtrs. Grandes Velocidades en la transmisión de datos (500 Mhz). No requieren cañería de protección mecánica y



eléctrica dedicada. Comparte una bandeja con cables de energía, aún de alta tensión o frecuencia, o al aire con mínimas fijaciones. La Fibra es una tecnología probada, sencilla sumamente estandarizada y de altísima confiabilidad.

Los cables submarinos ofrecen algunas ventajas respecto de las comunicaciones por satélite: Tienen una vida de más de 25 años mientras que la de los satélites es de 10; funcionan bien independientemente del clima y disturbios magnéticos, mientras que los receptores y transmisores para comunicaciones vía satélite son afectados por el clima, lluvias, tormentas, etcétera; su tecnología admite reparaciones y mantenimiento, mientras que en los satélites normalmente es muy complicado.

La innovación más importante en la última década en los cables submarinos es la introducción de fibra óptica. Las ondas ópticas conducidas por tales cables dan la vuelta a la tierra en fracciones de segundos. El primer cable intercontinental, el TAT 8 transporta más de 32 mil conversaciones al mismo tiempo aparte de una masa de datos, que puede ser enviada a intervalos. Sus altos costos de inversión comparado con el cable coaxial (que se introdujo en los cincuenta y que ahora son tendidos donde la frecuencia de su uso o crecimiento es bajo), son compensados con el incremento de la capacidad. Los cables de fibra óptica normalmente pueden ser operados sin amplificadores y debido a su diminuto diámetro de 25 a 30 mm son de peso liviano, más elásticos y fáciles de enterrarse. Aunque su pequeñez los hace más sensibles a las mordidas de los tiburones, son protegidos por cubiertas especiales para resistir esos peligros.

Además de los países industrializados como Inglaterra, Canadá, Rusia, Estados Unidos y Francia, el tendido de cables submarinos es realizado por otros como Singapur y México, mediante su participación en proyectos comunes de distintas empresas.

Desde agosto de 1993, Teléfonos de México es socio mayoritario, del sistema de cable submarino Columbus II. Este cable es de fibra óptica entró en servicio en diciembre de 1994, con capacidad para 23 mil canales telefónicos y para transmitir 90 mil conferencias simultáneamente. Sus amarres se encuentran en Cancún, México; West Palm Beach, Estados Unidos; Saint Thomas e Islas Vírgenes, EE.UU.; Isla Gran Canaria, España; Isla Madeira, Portugal; y Palermo, Italia. En el proyecto participaron 58 compañías de telecomunicaciones de 41 países, entre las que se encuentran Telefónica de España, AT&T, Italcable y Companhia Portuguesa Radio Marconi.

Las ventajas que brindan las transmisiones por cables submarinos ha llevado a una intensa competencia entre empresas constructoras y operadoras de los mismos, así como con las de comunicaciones por satélite. La compañía estadounidense American Telephone and Telegraph (**AT&T**), compite con International Telecommunications Satellite (**INTELSAT**) por la preeminencia en las comunicaciones intercontinentales. AT&T ha intensificado la construcción de cables submarinos: cinco por todo el mundo. En octubre de 1990 empezó a construir junto con la empresa japonesa Kokusai Denjim Denmwa un cable transpacífico, con capacidad para proveer hasta 600 mil líneas telefónicas y entró en operación en 1996. A mediados de 1992 puso en operación un sistema de comunicación submarina intercontinental denominado TAT-10, que utiliza cables de fibra óptica, conduce 80 mil conversaciones telefónicas simultáneas y enlaza directamente a los Estados Unidos, Alemania y los Países Bajos. De ninguna manera los cables submarinos han sido desplazados por otras tecnologías y por el contrario se han consolidado como una importante opción de comunicación para largas distancias. En la actualidad, la competencia entre diferentes sistemas de comunicación es común, y frente a los satélites, por ejemplo, tienen algunas ventajas



por los menores riesgos durante la instalación y el mayor tiempo de duración de las redes.

Desventajas

Algunas desventajas del servicio de fibra óptica son: la limitación para conectarse a Internet desde más de un lugar, el costo inicial y una cuota mensual más alta. Además de:

Fragilidad de las fibras. Disponibilidad limitada de conectores. Dificultad de reparar un cable de fibras roto en el campo. Los problemas que limitan el caudal (tanto en modo **NVC** como en modo solitón) no vienen solamente de las fibras. Los amplificadores ópticos también tienen sus límites impuestos por fenómenos físicos fundamentales. Se trata en primer lugar de las fluctuaciones erráticas de la intensidad de la señal. Estas se deben a los fotones inevitablemente emitidos por los átomos de erbio de las fibras dopadas, además de los que contribuyen a la amplificación de la señal. Este "ruido" parásito de emisión espontánea se acumula a lo largo de todo el enlace. Es la causa del límite de 10 Gbit/s sobre 10.000 km mencionado anteriormente. Se puede disminuir por filtrado óptico. También aquí tienen los solitones una ventaja, ya que soportan un filtrado relativamente severo. Entonces es posible una transmisión de 20-40 Gbit/s a 10.000 km por un solo canal de longitud de onda.

Tanto en modo NVC como en modo solitón las técnicas progresan continuamente. Por lo tanto es aventurado hacer un pronóstico sobre las capacidades últimas de uno u otro de estos sistemas de comunicaciones. A cada récord de transmisión, se descubren nuevos efectos limitantes, y nuevas innovaciones para cada uno. En cualquier caso los caudales extraordinarios citados más arriba, de 80-100 Gbit/s, ya demostrados en el laboratorio, equivalen a varios millones de conexiones telefónicas simultáneas en una sola fibra. Estos caudales, que están muy por encima de las necesidades del mercado, abriendo perspectivas prácticamente ilimitadas a las futuras autopistas de la información.

Las **fibras ópticas** presentan limitaciones químicas que adquieren mayor intensidad para determinadas longitudes de onda, a los efectos de la irradiación, determinándose que los láseres de elevada potencia pueden motivar cierto deterioro.

La irradiación conduce a modificar el color del material transparente de las fibras, produciendo su oscurecimiento. El vidrio irradiado está constituido por menor cantidad de sílice y más óxido de plomo. El cuarzo en estado de extrema pureza se halla menos afectado por la irradiación, pero existe mayor dificultad en convertirlo en fibras. Aún cuando resulten de costo elevado, las fibras de sílice fundida dopadas con germanio presentan muy buena resistencia a la irradiación, pero el tiempo de restauración de una capacidad transmisora del 50% de la capacidad inicial resulta inferior al de ciertas fibras de material sintético.

Las limitaciones térmicas difieren en alto grado, según se trate de fibras realizadas a partir del vidrio o a partir de materiales sintéticos. Estos han sido previstos para temperaturas que van desde -40 hasta +80 grados centígrados.

Ya que el calor puede proceder de distintas fuentes, es conveniente hacer uso de sistemas de filtraje que actúen para la protección de las fibras frente a una eventual elevación del calor. Las fibras hechas de vidrio no son afectadas por ello hasta +120 grados centígrados, precisando ser protegidas de luz infrarroja.



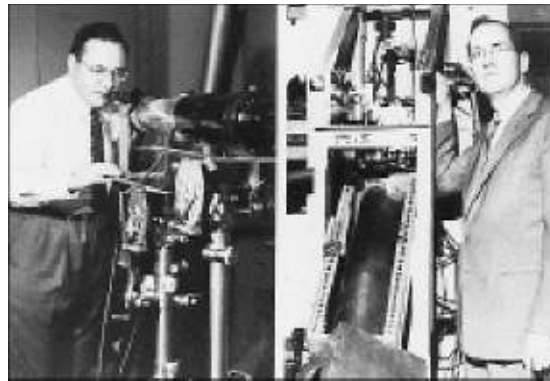
Reseña histórica de los Sistemas Ópticos

La física en el siglo XX:

Las investigaciones que con el tiempo darían lugar al láser tuvieron su origen en una rama de la física actualmente conocida como mecánica cuántica. En 1900, Max Planck formuló la hipótesis de que los átomos excitados emitían energía en paquetes discretos, a los que denominó cuantos, y no como una emisión continua de energías, tal y como proponía la teoría de ondas de la radiación electromagnética entonces imperante. Planck nunca investigó las implicaciones de este concepto, lo que sí hizo Albert Einstein 5 años después al sugerir que la luz misma no estaba compuesta por ondas, sino por paquetes de energía (a los que después se denominó fotones); cuanto mayor es la frecuencia de la luz, mayor es el nivel energético del fotón. Einstein demostró cómo en determinadas condiciones los electrones podían absorber y emitir la energía de los fotones y, en una nueva investigación que le haría ganar el Premio Nobel, utilizó esta demostración para explicar lo que se denominó el efecto fotoeléctrico (la descarga de electrones de la materia por el impacto de la radiación, especialmente de la luz visible).

No todos estaban de acuerdo con la teoría de Einstein de la luz como partícula; la discusión continuaría un par de décadas. Pero incluso antes de que los físicos aceptaran que la luz era de algún modo tanto onda como partícula, Einstein ya había descubierto otro fenómeno. De acuerdo con el modelo de átomo de Niels Bohr, expuesto en una serie de documentos en 1913, los electrones ocupan órbitas específicas alrededor del núcleo que están determinadas por los niveles de energía de los electrones. Un electrón sólo puede absorber la cantidad exacta de energía que se necesita para transferirlo de una órbita a otra específica más alta y emite una cantidad específica de energía al pasar de una órbita a otra más baja. Esto explicó por qué los átomos de un gas determinado como, por ejemplo, el neón, emiten un patrón concreto de longitudes de onda y por qué las lámparas de descarga de vapor como las que se basan en mercurio o sodio tienen un color característico.

Los átomos que están en un estado excitado, es decir, aquellos cuyos electrones están en órbitas de mayor energía, volverán con el tiempo y de forma espontánea a su estado de mínima energía o fundamental, desprendiéndose de la energía almacenada en el proceso. En un sistema de átomos dado, esta emisión espontánea ocurre al azar y los fotones de energía se emiten en direcciones aleatorias. Einstein reconoció que si los átomos en estado excitado se encuentran con fotones de luz con la cantidad adecuada de energía (es decir, una cantidad igual a la diferencia entre los estados de mayor y menor energía), se puede originar una reacción de emisión en cadena que aumentaría la



Fuente: www.monografias.com Fuente: www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/tec_007520-09.html#TopOfPage

intensidad de la luz que está pasando, como si los electrones, deseosos de capturar los fotones entrantes, soltaran los que ya tienen almacenados. Además, todos los fotones se emitirían en la misma dirección que los fotones entrantes. Este proceso se denomina "emisión estimulada".

El único problema era que la amplificación por emisión estimulada sólo ocurriría si el número de átomos en estado excitado era mayor que el número de átomos en estado de mínima energía, lo que resultaba ser justamente lo opuesto a la situación normal; es decir, la emisión estimulada requería lo que se conoce como una inversión de población: provocar que una población completa de átomos entre en estado excitado, normalmente mediante su exposición a la luz.

Avancemos hasta el año 1951. Charles Townes era el director del laboratorio de radiación de la Universidad de Columbia, donde se continuaban las investigaciones iniciadas durante la Segunda Guerra Mundial acerca de la física de microondas. Townes, que estaba trabajando en la espectroscopia de microondas, estaba ansioso por utilizar longitudes de onda corta en el intervalo del submilímetro. Para ello, necesitaba reducir los osciladores mecánicos que se utilizaban entonces para generar microondas en el intervalo del centímetro, un problema que parecía insoluble hasta que se le ocurrió utilizar moléculas.

Durante los 2 años siguientes, Townes trabajó con James Gordon y Herbert Zeiger en la creación de dicho sistema. A finales de 1953, se dieron a conocer los resultados de sus investigaciones. Enviaban un haz de amoníaco a través de un campo eléctrico que desviaba las moléculas de menor energía y enviaba las moléculas de mayor energía a otro campo eléctrico; la exposición al segundo campo provocaba que todas las moléculas de amoníaco de mayor energía pasaran casi simultáneamente al estado fundamental, emitiendo fotones de microondas que tenían la misma frecuencia y circulaban en la misma dirección. Townes llamó a este dispositivo "máser" (siglas de "microwave amplification by stimulated emission of radiation"), que significa amplificación de microondas mediante emisión estimulada de radiación. A medida que Townes seguía experimentando con estos dispositivos "máser", era cada vez más evidente que la emisión estimulada podía funcionar con longitudes de onda más cortas de infrarrojos y hasta de luz visible. Se decidió acuñar el término "láser" para este dispositivo, siendo "l" la inicial de "luz". En su intento por desarrollar una teoría de la acción del láser más completa, Townes se puso en contacto con su cuñado, Arthur Schawlow, uno de los físicos de los Laboratorios Bell, uno de los principales centros norteamericanos de investigaciones de física y materiales.



Aprovechamiento de la potencia de la luz. Arthur Schawlow de los Laboratorios Bell (izquierda) y Charles Townes, de la Universidad de Columbia, publicaron "Infrared and Optical Masers" (Másters infrarrojos y ópticos) en 1958, un artículo que abrió el camino a los posteriores avances y estudios sobre la tecnología láser y sus aplicaciones. (Lucent Technologies).

A finales de 1958, el estudio de Townes-Schawlow, "Infrared and Optical Masers" (Másters infrarrojos y ópticos), fue publicado en Physical Review, una de las principales revistas de física. Este estudio incitó a una serie de científicos a intentar crear un dispositivo láser; en



Fuente: www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/tec_007520-09.html#TopOfPage

junio de 1960, el físico Theodore Maiman del laboratorio de investigaciones de Hughes Aircraft Company, lo logró mediante un rubí sintético.

Theodore Maiman con su láser de rubí en 1960. Los primeros láseres solían ser muy grandes y frágiles, y propensos a recalentarse. Los trabajos que se realizaron posteriormente acerca de semiconductores permitieron obtener diseños con un gran número de mejoras. (Hughes Research Laboratories, Inc.)

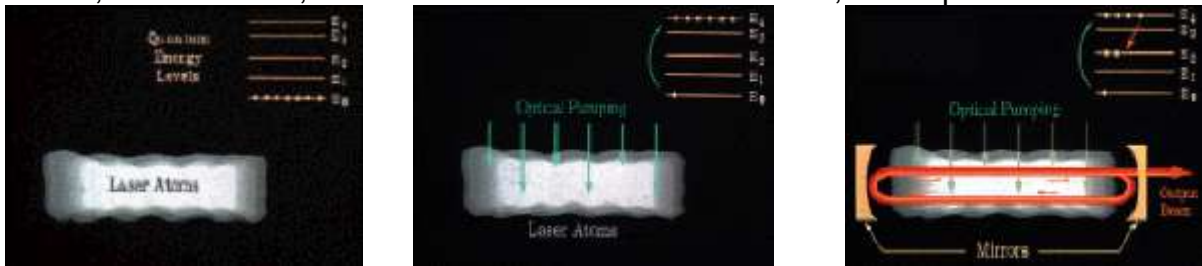
Los láseres, que emiten haces de luz con una mayor concentración que otras fuentes de luz, atrajeron inmediatamente el interés. En un experimento realizado en 1962, se dirigió un rayo láser de 1 pie (30,5 cm) de diámetro hacia la luna, a 240.000 millas (386.232 km) de distancia, el rayo sólo iluminó un área superficial de dos millas (3,2 km) de diámetro. Un rayo de luz normal se extendería en mayor medida al recorrer la misma distancia e iluminaría un área de 25.000 millas (40.232 km) de diámetro. Los periodistas recibieron esta nueva tecnología con gran entusiasmo y la describieron como una "luz fantástica" precursora de una nueva era. Los productores de cine presentaban a los láseres como armas de destrucción, especialmente en la película de James Bond "Goldfinger". Los científicos señalaron el gran potencial de los láseres en las comunicaciones y otros campos.

Sin embargo, a los primeros láseres todavía les faltaba mucho para satisfacer estas expectativas. Para llevar a cabo la inversión de población que permitía activar el láser se necesitaban bombas ópticas como, por ejemplo, lámparas de "flash", que sólo podían producir un impulso de energía en lugar de luz láser continua y no utilizaban eficazmente la corriente. En otra versión bastante diferente, desarrollada posteriormente en 1960 por

Ali Javan, de los Laboratorios Bell, se utilizaba un tubo de cristal que contenía una mezcla de los gases helio y neón. Este láser tenía un umbral de energía más bajo y no se recalentaba, pero el tubo de cristal era demasiado grande y frágil. Los primeros láseres se parecían a los tubos de vacío que se habían utilizado anteriormente en radios, televisores y en los primeros ordenadores. En 1960, los tubos de vacío dejaron paso a los transistores, que se caracterizaban por sus reducidas dimensiones y su alta fiabilidad. ¿Podrían suponer los láseres una nueva transición?

Láseres de semiconductores

Los transistores aprovechan las propiedades especiales de un tipo de materiales conocidos como semiconductores. La corriente eléctrica se origina con el movimiento de los electrones. Metales comunes como el cobre son buenos conductores de la electricidad debido a que sus electrones no están unidos estrechamente al núcleo del átomo y son atraídos libremente por una carga positiva. Otras sustancias como, por ejemplo, el caucho, son aislantes, malos conductores de la electricidad, dado que sus electrones no



Fuente: www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/tec_007520-09.html#TopOfPage

se mueven libremente. Los semiconductores, como su nombre indica, son algo intermedio entre estos dos conceptos; aunque normalmente se comportan como aislantes, es posible que en algunos casos conduzcan la electricidad.

- Cómo funcionan los láseres

- Un conjunto de átomos de láser con sus niveles cuánticos representados.
- El proceso de bombeo óptico, en el que un gran número de átomos atrapados se estimulan hacia un nivel de energía más alto.
- La emisión estimulada y la oscilación del láser.

Un rayo de luz, ajustado a la frecuencia de transmisión entre los dos niveles, se envía a través del conjunto de átomos, lo que provoca que aquellos que se encuentran en un nivel de energía más alto cedan su energía al rayo de luz. Los espejos alineados en cada extremo de la cavidad del láser forman un resonador óptico, lo que provoca que el rayo de salida sea altamente monocromático o altamente direccional.

Los primeros estudios sobre semiconductores se centraron en el silicio, pero el silicio en sí no puede emitir luz láser. La invención del transistor en 1948 por William Shockley, Walter Brattain y John Bardeen, de los Laboratorios Bell, estimuló el estudio de otros semiconductores. También proporcionó el marco conceptual que con el tiempo llevaría a la comprensión de la emisión de la luz en los semiconductores. En 1952, Heinrich Welker, de Siemens, Alemania, describió semiconductores de elementos de las columnas III y V de la tabla periódica como potencialmente útiles para dispositivos electrónicos. Uno de estos elementos, el arseniuro de galio o GaAs, sería muy importante en la búsqueda de



un láser de comunicación eficaz. Para su total explotación fueron necesarios una serie de estudios iniciales acerca del desarrollo capa por capa de los cristales de alta pureza, investigaciones de los defectos e impurezas (impurezas añadidas a una sustancia pura para cambiar sus propiedades) y el análisis de los efectos del calor sobre la estabilidad de los compuestos. Con estos avances, los grupos de investigación de General Electric, IBM y el Laboratorio Lincoln del Massachusetts Institute of Technology (Instituto de tecnología de Massachusetts) desarrollaron, en 1962, los láseres de GaAs.

Sin embargo, aún persistía un antiguo problema: el sobrecalentamiento. Los láseres que usaban un solo semiconductor, normalmente GaAs, no eran muy eficaces. Todavía requerían tanta electricidad para comenzar a activar el láser que, a temperatura ambiente normal se sobrecalentaban rápidamente; por otra parte, sólo era posible el funcionamiento por impulsos, lo cual no era práctico para la comunicación. Los físicos probaron varios métodos para eliminar el calor, tales como colocar los láseres encima de otros materiales que eran buenos conductores de calor, pero no tuvieron éxito. Posteriormente, en 1963, Herbert Kroemer, de la Universidad de Colorado, propuso un enfoque distinto: construir un láser compuesto de un sándwich de semiconductores, con una fina capa activa colocada entre dos capas de materiales diferentes. Al limitar la acción del láser a una fina capa activa, se requeriría muy poca corriente y el calor desprendido se mantendría en niveles aceptables.

Dicho láser no se podía construir simplemente introduciendo la capa activa, como un pedazo de queso entre dos rebanadas de pan. Los átomos de los cristales de semiconductores están colocados en forma reticular, con los electrones formando enlaces químicos. Para crear un láser de semiconductores de varias capas con los enlaces necesarios entre los átomos, el dispositivo tenía que desarrollarse como una sola unidad, llamada cristal multicapa.

En 1967, los investigadores Morton Panish e Izo Hayashi, de los Laboratorios Bell, sugirieron la posibilidad de crear un cristal multicapa adecuado utilizando una forma modificada de GaAs, en la que unos cuantos átomos de aluminio sustituirían parte del galio, en un proceso llamado "doping". El compuesto modificado, AlGaAs, tenía separaciones atómicas que serían diferentes a las de GaAs en una proporción de 1 en 1.000. Los investigadores propusieron que, al crecer en cada lado de la capa fina de GaAs, el AlGaAs restringiría la actividad del láser a la capa de GaAs. Todavía se necesitaban varios años de trabajo, pero el camino hacia los láseres de "estado sólido" (dispositivos de semiconductores en miniatura que funcionan siempre a temperatura ambiente) ya estaba abierto.

Todavía quedaba un obstáculo: cómo transmitir señales luminosas a largas distancias.

Las ondas de radio de longitud de onda larga se propagan libremente por el aire, atravesando niebla y fuertes lluvias fácilmente. Pero la luz de láser de longitud de onda corta rebota en el vapor de agua y en otras partículas de la atmósfera hasta tal punto que se dispersa o bloquea. Un día nublado podría interrumpir un enlace de comunicación por láser. Por tanto, la luz necesitaba de un conducto, de forma análoga a las líneas telefónicas.

Surgen las fibras ópticas

Las fibras ópticas ofrecían una alternativa, aunque a mediados de los años 60 no estaba nada claro que la respuesta se encontrase en esta dirección, y otras posibilidades se consideraban seriamente. La luz se canaliza por fibras de vidrio mediante una propiedad denominada reflexión interna total. En 1820, Augustin-Jean Fresnel ya conocía las



ecuaciones por las que se rige la captura de la luz dentro de una placa de cristal lisa y su ampliación a lo que entonces se conocía como cables de vidrio fue obra de D. Hondros y Peter Debye en 1910. Sin embargo, no fue hasta 1964, cuando Stewart Miller, de los Laboratorios Bell, dedujo maneras detalladas de demostrar el potencial del cristal como medio eficaz de transmisión a larga distancia.

Aunque ya se conocían filamentos delgados como el pelo que transportaban luz a distancias cortas y que ya se utilizaban en la industria y en la medicina para transportar luz a lugares que de otra forma serían inaccesibles, la luz perdía normalmente hasta el 99% de su intensidad al atravesar distancias tan cortas como 30 pies (9 metros) de fibra.

En 1966, Charles Kao y George Hockham, de los Laboratorios de Standard Telecommunications en Inglaterra, afirmaron que se podía disponer de fibras de transparencia mucho mayor. En un artículo teórico, demostraron que las grandes pérdidas características de las fibras existentes se debían a impurezas diminutas presentes en el cristal, principalmente agua y metales, en lugar de a limitaciones intrínsecas del cristal. Pronosticaron que la pérdida de la luz en las fibras podría disminuir enormemente de 1.000 decibelios a menos de 20 decibelios por kilómetro. Con esta mejora, se podrían colocar amplificadores para aumentar la señal luminosa a intervalos de kilómetros, en lugar de metros, a distancias comparables a las de los repetidores que amplificaban las señales débiles en las líneas telefónicas convencionales.

Al igual que con el trabajo de Townes y Schawlow de la década anterior, el artículo de Kao-Hockham estimuló a una serie de investigadores a producir dichas fibras de baja pérdida. El gran avance se produjo en 1970 en Corning Glass Works, cuando Donald Keck, Peter Schultz y Robert Maurer lograron fabricar con éxito una fibra óptica de cientos de metros de largo con la claridad cristalina que Kao y Hockham habían propuesto. Poco después, Panish y Hayashi, de los Laboratorios Bell, mostraron un láser de semiconductores que podía funcionar continuamente a temperatura ambiente, y John MacChesney y sus colaboradores, también de los Laboratorios Bell, desarrollaron independientemente métodos de preparación de fibras.

En 1970, los científicos Donald Keck, Robert Maurer y Peter Schultz de Corning Glass Works fabricaron con éxito el primer lote de fibras ópticas con la transparencia suficiente para que la comunicación de fibra óptica fuese una realidad. (Corning Inc.)

Estas actividades marcaron un punto decisivo. Ahora existían los medios para llevar las comunicaciones de fibra óptica fuera de los laboratorios de física al campo de la ingeniería habitual. Durante la siguiente década, a medida que continuaban las investigaciones, las fibras ópticas mejoraron constantemente su transparencia. En 1980, las mejores fibras eran tan transparentes que una señal podía atravesar 150 millas (240 km) de fibra antes de debilitarse hasta ser indetectable. Si los mares del mundo fuesen tan transparentes, se podría navegar por las zonas más profundas del Pacífico y observar el fondo del océano tan fácilmente como el fondo de una piscina.

Pero las fibras ópticas con este grado de transparencia no se podían fabricar usando métodos tradicionales. El gran avance se produjo al darse cuenta de que el cristal de sílice puro, sin ninguna impureza de metal que absorbiese luz, solamente se podía fabricar directamente a partir de componentes de vapor, evitando de esta forma la contaminación que inevitablemente resultaba del uso convencional de los crisoles de fundición. El progreso ahora se centraba en seleccionar el equilibrio correcto de componentes del vapor y optimizar sus reacciones. La tecnología en desarrollo se basaba principalmente en el conocimiento de la termodinámica química, una ciencia perfeccionada por tres generaciones de químicos desde su adopción original por parte de Willard Gibbs en el siglo XIX.



Los sistemas prácticos toman forma

Pese a todo, hacía falta algo más que una buena fibra para construir sistemas de comunicaciones de nivel comercial. Los láseres, que necesitaban tener una vida útil de hasta 1.000.000 de horas, todavía no eran muy fiables y fallaban tras unas cuantas horas de funcionamiento. Además, aún no existía ninguna forma económica de producir láseres fiables en las cantidades que se necesitarían.

Para sortear estas necesidades, se demostró que era posible dejar a un lado el uso de láseres. Un tipo de dispositivo más simple era el diodo emisor de luz o LED (del inglés Light-Emitting Diode), parecido a las luces indicadoras rojas y verdes de un radiocassette o un vídeo. Los LEDs demostraron que eran adecuados para transmitir un número limitado de llamadas telefónicas a lo largo de distancias moderadas, pero carecían de la eficacia y de la capacidad necesarias para los servicios de larga distancia y transoceánico.

Una vez más, era necesario recurrir al trabajo del laboratorio de investigación. Al mismo tiempo que Panish y Hayashi estaban realizando sus trabajos innovadores en cristales multicapa, dos de sus colegas de los Laboratorios Bell, J.R. Arthur y A.Y. Cho, idearon un método diferente de desarrollo de cristales, llamado epitaxia de rayo molecular o MBE (del inglés Molecular-Beam Epitaxy). "Epitaxia" es el desarrollo de cristales de un mineral sobre la superficie de los cristales de otro mineral y el método MBE era tan preciso que



Fuente: www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/tec_007520-09.html#TopOfPage

permitía colocar una capa de material semiconductor de espesor medido en átomos. Al reducir los electrones y la luz que emitían, esta capa extremadamente fina demostró su gran eficacia para generar la actividad del láser a la vez que se utilizaba menos corriente eléctrica, y lo que era aún mejor, los nuevos dispositivos de MBE consiguieron tener una vida útil de 1.000.000 de horas.

Recurriendo a la comprensión básica de la formación de cristales desarrollada en la década anterior por científicos de la Universidad de Bristol y de los Laboratorios Bell, las investigaciones de diferentes métodos de producción y diferentes compuestos de semiconductores continuaron durante los años 70 y en los años 80. En 1975, la tecnología de láser estaba suficientemente desarrollada para permitir que se realizaran pruebas de funcionamiento en las principales ciudades. Desde sus orígenes en la física cuántica teórica de Albert Einstein, la comunicación de fibra óptica se controlaba actualmente en las cuestiones prácticas de producción, instalación y reparación. Los ingenieros estaban especialmente preocupados por la reparación: el empalme de las fibras ópticas rotas sería una tarea semejante a cortar un pelo del cabello y luego colocarlo de nuevo en el mismo sitio.

La primera prueba se realizó en AT&T en Atlanta en 1976. Los equipos de trabajo instalaron dos cables de fibra óptica, cada uno de los cuales medía 2.100 pies (630



metros) de largo y contenía 144 fibras, tirando de ellos a través de conductos subterráneos estándar, para lo que se requería que los cables pudieran sortear curvas cerradas. Para alivio de todos, no se rompió ninguna fibra durante la instalación, ni las curvas cerradas degradaron su rendimiento. El servicio comercial comenzó al año siguiente en Chicago, donde un sistema de fibra óptica transportaba voz, datos y señales de vídeo a través de 1,5 millas (2,4 km) de cables subterráneos que conectaban dos oficinas de conmutación de la compañía telefónica de Illinois Bell Telephone Company.

Las fibras ópticas saltan a primera plana

La posibilidad de la instalación universal de sistemas de fibra óptica era estimulante. En los Estados Unidos, los derechos de paso de los ferrocarriles ofrecieron caminos cómodos para los cables de fibra de larga distancia, que eran tan resistentes que ni las fuertes vibraciones de los trenes pesados los perturbarían. El trabajo prosiguió lentamente al principio. En 1978, el total de fibra óptica instalada en el mundo era solamente de 600 millas (960 km). En 1980, AT&T presentó a la comisión federal de comunicaciones de EE.UU. (Federal Communications Commission) un proyecto de sistema de 611 millas (978 km) que conectaría las principales ciudades del corredor de Boston a Washington. Cuatro años después, cuando el sistema comenzó a funcionar, su cable, de menos de 1 pulgada (2,5 cm) de diámetro, proporcionaba 80.000 canales de voz para conversaciones telefónicas simultáneas. Para entonces, la longitud total de los cables de fibra únicamente en los Estados Unidos alcanzaba 250.000 millas (400.000 km), suficiente para llegar a la luna.

Pronto, cables similares atravesaron los océanos del mundo. El primer cable transatlántico comenzó a funcionar en 1988, usando un cristal tan transparente que los amplificadores para regenerar las señales débiles se podían colocar a distancias de más de 40 millas (64 km). Tres años después, otro cable transatlántico duplicó la capacidad del primero. Los cables que cruzan el Pacífico también han entrado en funcionamiento, ofreciendo un servicio telefónico fácil para el creciente comercio entre los Estados Unidos y Asia.

Las investigaciones básicas siguen siendo esenciales

Entre esos desarrollos acelerados, la investigación básica continuó produciendo mejoras importantes. En los primeros sistemas de fibra óptica, los amplificadores para regenerar señales débiles constituían un cuello de botella. Aunque se pudiesen utilizar dispositivos ópticos para detectar una señal de láser entrante, se necesitaba algún tipo de sistema de circuitos electrónicos para convertirlo en corriente eléctrica, amplificar la corriente y, a continuación, activar un nuevo láser para crear nuevamente la señal óptica. Esto limitaba el sistema a la capacidad de los amplificadores electrónicos, que era considerablemente inferior a la capacidad potencial de los láseres y las fibras ópticas.

Pero en 1985, en la Universidad de Southampton en Inglaterra, un físico llamado S.B. Poole descubrió una solución. Añadiendo una cantidad pequeña del elemento erbio al cristal utilizado en las fibras ópticas se podía construir un amplificador completamente óptico. Un filamento corto de cristal recubierto de erbio conectado con la fibra principal recibiría energía de una fuente externa y actuaría como un láser por sí mismo, amplificando las señales ópticas débiles sin usar componentes electrónicos.

Los colegas de Poole en Southampton, David Payne y P.J. Mears, y Emmanuel Desurvire de los Laboratorios Bell, procedieron a transformar el descubrimiento en amplificadores de fibra óptica eficaces y prácticos. En 1991, los investigadores de los Laboratorios Bell



demonstraron que un sistema completamente óptico tendría una capacidad de transporte aproximadamente 100 veces superior a la que se podía lograr con amplificadores electrónicos. Poco después, las empresas de comunicaciones europeas y norteamericanas instalaron cables totalmente ópticos a través del Atlántico y en el Pacífico un cable comenzó a funcionar en 1996.

Indiscutiblemente, el progreso ha sido notable y rápido. Aunque estos logros son impresionantes, se vislumbran en el horizonte avances aún más impresionantes. Aunque los sistemas de fibra óptica actuales funcionan como líneas troncales, transportando un gran número de canales de voz y datos entre centrales telefónicas, los especialistas de la industria hablan con pesar de la "última milla": desde la centralita hasta los hogares. El sistema telefónico actual atraviesa esta última milla con equipos de hilo de cobre convencionales, que proporcionan buenas conexiones de voz pero todavía no están capacitados para transportar grandes cantidades de datos a gran velocidad.

Las líneas de datos de gran velocidad para esa última milla ya están disponibles, y muchas empresas las tienen, pero generalmente son demasiado costosas para su uso doméstico hoy día. Sea cual sea la nueva tecnología que proporcione el último enlace crítico de personas con el resto del mundo, las investigaciones que la originen habrán surgido de científicos que buscan más allá de las necesidades inmediatas de una industria determinada, investigando procesos que aparentemente no están relacionados para comprender la naturaleza esencial del mundo.

El aprendizaje a distancia es tan solo una de las innovaciones mejoradas por el desarrollo de las comunicaciones de fibra óptica (Corning Inc.)

Cronología

A continuación se muestra la serie cronológica de eventos en la investigación que llevaron a las comunicaciones de fibra óptica.

1900

Max Planck inicia un campo nuevo de la ciencia, la física cuántica, demostrando matemáticamente que la materia irradia energía en paquetes discretos, a los que denomina cuantos.

1905

Albert Einstein desarrolla la teoría de Planck para explicar el efecto fotoeléctrico, demostrando que la luz está formada por paquetes, posteriormente llamados fotones. En 1921, Einstein recibió el premio Nobel por este descubrimiento.

1913

Niels Bohr formula un modelo del átomo en el que los electrones ocupan órbitas específicas, o estados de energía, alrededor del núcleo, determinados por los niveles de energía de los electrones.

1917

Einstein identifica un fenómeno denominado emisión estimulada.

1951-1953

Charles Townes, del Laboratorio de Radiación de la Universidad de Columbia, descubre cómo aprovechar la emisión estimulada para generar un rayo de microondas concentrado. Townes denominó a su invención "máser", siglas en inglés de la amplificación de microondas mediante la emisión estimulada de radiación. Townes compartió el premio



Nobel de 1964 por su trabajo con dos físicos soviéticos, N.G. Basov y A.M. Prokhorov, quienes habían ideado un concepto similar.

1958

Townes y Arthur Schawlow, de los Laboratorios Bell, publicaron su teoría sobre el comportamiento de la emisión estimulada con longitudes de onda más cortas, incluyendo las de la luz visible, dando origen al término "láser", siglas en inglés de la amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación.

1960

Theodore Maiman, de la empresa Hughes Aircraft, construye un láser usando un rubí sintético.

1962

Los grupos de investigación de General Electric, IBM y del Laboratorio Lincoln del MIT observan la actividad del láser de semiconductores usando arseniuro de galio (GaAs).

1963

Herbert Kroemer, de la Universidad de Colorado, propone reducir los requisitos de energía de los láseres y disminuir la producción de calor creando un "sándwich" de semiconductores con una capa activa fina colocada entre capas de otro material.

1966

Charles Kao y George Hockham, de los laboratorios Standard Communications de Inglaterra, publican un artículo que demuestra teóricamente que la pérdida de luz en las fibras de vidrio existentes se podía disminuir enormemente.

1970

Morton Panish e Izuo Hayashi, de los Laboratorios Bell, presentan un láser de semiconductores que funciona continuamente a temperatura ambiente. Donald Keck, Peter Schultz y Robert Maurer, en Corning Glass Works, informan de la creación de fibras ópticas que cumplen las predicciones realizadas por Kao y Hockham.

1976-1977

Comienzan las pruebas de fibras ópticas, basadas en procesos de diseño y preparación de fibras desarrollados en los Laboratorios Bell, en sistemas telefónicos de Atlanta y Chicago.

1984

Entra en funcionamiento el cable de fibra óptica de AT&T, que conecta las principales ciudades del corredor entre Boston y Washington.

1988

Se instala el primer cable de fibra transatlántico, usando un cristal tan transparente que los amplificadores están separados unas 40 millas (64 km).

1991

Emmanuel Desurvire, de los Laboratorios Bell, junto con David Payne y P.J. Meras, de la



Universidad de Southampton en Inglaterra, presentan los amplificadores ópticos, como parte integral del propio cable de fibra.

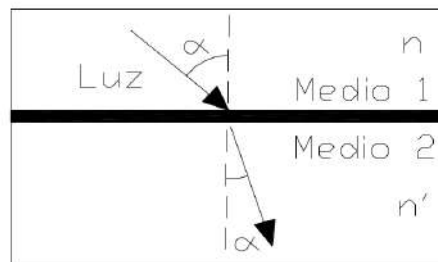
1996

Se instalan todos los cables de fibra óptica a través del Pacífico.

2000

La instalación completa alrededor del mundo ya se ha realizado.

Conceptos ópticos e información básica:

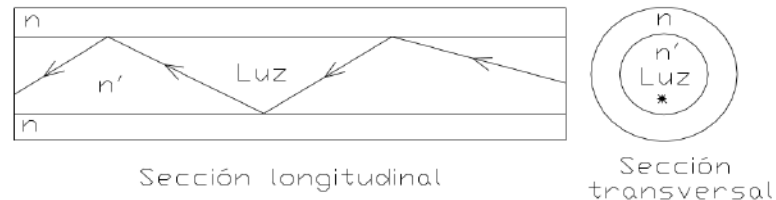


Antes de explicar directamente que es la fibra óptica, conviene repasar ciertos aspectos básicos de óptica. La luz se mueve a la velocidad de la luz en el vacío, sin embargo, cuando se propaga por cualquier otro medio, la velocidad es menor. Así, cuando la luz pasa de propagarse por un cierto medio a propagarse por otro determinado medio, su velocidad cambia, sufriendo además **efectos de reflexión** (la luz rebota en el cambio de medio, como la luz reflejada en los cristales) y de **refracción** (la luz, además de cambiar el módulo de su velocidad, cambia de dirección de propagación, por eso vemos una cuchara como doblada cuando está en un vaso de agua, la dirección de donde nos viene la luz en la parte que está al aire no es la misma que la que está metida en el agua). Esto se ve de mejor forma en el dibujo que aparece a nuestra derecha.

Dependiendo de la velocidad con que se propague la luz en un medio o material, se le asigna un Índice de Refracción "n", un número deducido de dividir la velocidad de la luz en el vacío entre la velocidad de la luz en dicho medio. Los efectos de reflexión y refracción que se dan en la frontera entre dos medios dependen de sus Índices de Refracción. La ley más importante que voy a utilizar en este artículo es la siguiente para la refracción (Ley de Snell):

$$n \cdot \text{sen}(\alpha) = n' \cdot \text{sen}(\alpha')$$

Esta fórmula nos dice que *el índice de refracción del primer medio, por el seno del ángulo con el que incide la luz en el segundo medio, es igual al índice del segundo medio por el seno del ángulo con el que sale propagada la luz en el segundo medio*. ¿Y esto para que sirve?, lo único que nos interesa aquí de esta ley es que dados dos medios con índices n y n', si el haz de luz incide con un ángulo mayor que un cierto ángulo límite o ángulo de Brewster (que se determina con la anterior ecuación) el haz siempre se reflejara en la superficie de separación entre ambos medios. De esta forma se puede guiar la luz de forma controlada tal y como se ve en el dibujo de abajo (que representa de forma esquemática como es la fibra óptica).



Como se ve en el dibujo, tenemos un material envolvente con índice n y un material interior con índice n' . De forma que se consigue guiar la luz por el cable. La Fibra Óptica consiste por tanto, en un cable de este tipo en el que los materiales son mucho más económicos que los convencionales de cobre en telefonía, de hecho son

materiales ópticos mucho más ligeros (fibra óptica, lo dice el nombre), y además los cables son mucho más finos, de modo que pueden ir muchos más cables en el espacio donde antes solo iba un cable de cobre.

Concluimos diciendo que, la Fibra Óptica consiste en una guía de luz con materiales mucho mejores que lo anterior en varios aspectos. A esto le podemos añadir que en la fibra óptica la señal no se atenúa tanto como en el cobre, ya que en las fibras no se pierde información por refracción o dispersión de luz consiguiéndose así buenos rendimientos, en el cobre, sin embargo, las señales se ven atenuadas por la resistencia del material a la propagación de las ondas electromagnéticas de forma mayor. Además, se pueden emitir a la vez por el cable varias señales diferentes con distintas frecuencias para distinguirlas, lo que en telefonía se llama unir o multiplexar diferentes conversaciones eléctricas. También se puede usar la fibra óptica para transmitir luz directamente.

Para finalizar, podemos decir que los rayos de luz son radiaciones electromagnéticas oscilantes (pero de longitud de onda más corta, es decir de mayor frecuencia). En definitiva, la fibra óptica es una “guiaondas” dieléctrica. Algunos tipos de fibras ópticas conducen determinadas frecuencias de luz mejor que otras.

$$\lambda = \frac{c(\text{velocidad de la luz})}{f(\text{frecuencia})} \quad (\text{Longitud de onda en metros}).$$

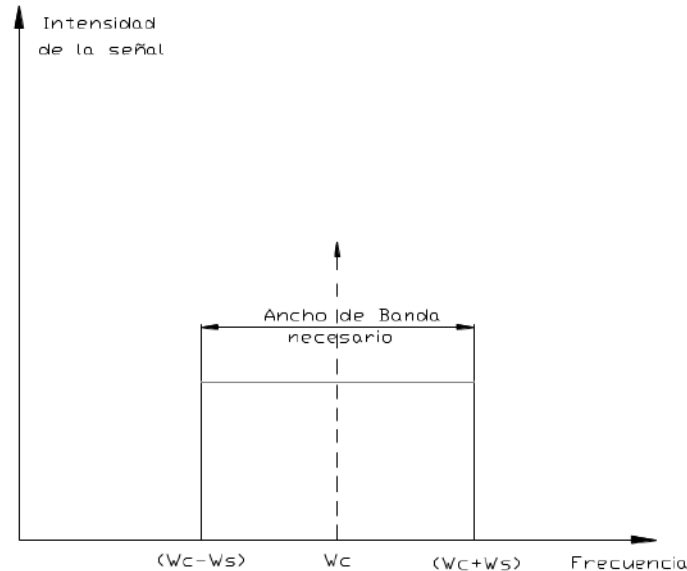
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/seg}$$

James Clerk Maxwell demostró que la luz es un componente del espectro electromagnético.



Un poco de historia

Modulación de amplitud (AM) mostrando la banda requerida



La manera de modular los rayos de luz para transmitir información se basa en los principios de la modulación de ondas de radio. Se ha demostrado que si se usa solamente una fracción del ancho de banda (B. W.) disponible cuando se utilizan frecuencias de luz, dicho canal podría transmitir todas las conversaciones telefónicas de cada persona del continente norteamericano al mismo tiempo.

Modulación de amplitud:

$$AM = A.(1 + m.e_{s(t)}).sen(\omega_c.t + \theta)$$

Ancho de banda de los canales de luz

En la transmisión por fibra óptica las frecuencias son muy altas, podemos llegar a tener gran cantidad de canales sin que se interfieran entre ellos.

Para $\lambda = 1060nm$, corresponde una frecuencia de luz de $f = 3 \cdot 10^{14} \frac{Hz}{seg}$. Para un canal de audio de 3Khz +/- 5Khz, al menos entrarían $1,6 \cdot 10^{14}$ canales de audio.

Fibras monomodo y multimodo:

$$\frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \sqrt{2n\Delta n} \leq 2,41 = \text{monomodo}$$

n: índice de refracción del núcleo

a: radio del núcleo

Δn : diferencia entre el índice de refracción del núcleo y la cubierta

En las fibras monomodo se transmite solo una frecuencia de luz.

Dispersión en fibras ópticas:



-Modos de propagación

Son ángulos de incidencia discretos para los rayos de luz, los números de longitudes de onda que entran dentro del cono de aceptación viajan a través de la fibra, algunos rebotando más que otros hasta salir de la fibra. Si hay una sola frecuencia de luz podría ser el rayo directo y dado que viaja por el núcleo sería monomodo (nunca hay una sola frecuencia de luz en la realidad).

Como el n depende de la frecuencia, distintas frecuencias tienen distintas velocidades de propagación y producen a la salida la dispersión de un pulso de entrada (dispersión cromática).

Cantidad de modos que pueden propagarse por la fibra óptica:

$$m = \frac{\left(\frac{\pi \cdot d_1}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2}{2} \quad (\text{para fibras multimodo})$$

m : número de modos de propagación

n_1 : índice de refracción del núcleo

d_1 : diámetro del núcleo

n_2 : índice de refracción de la cubierta

-Dispersión multimodal

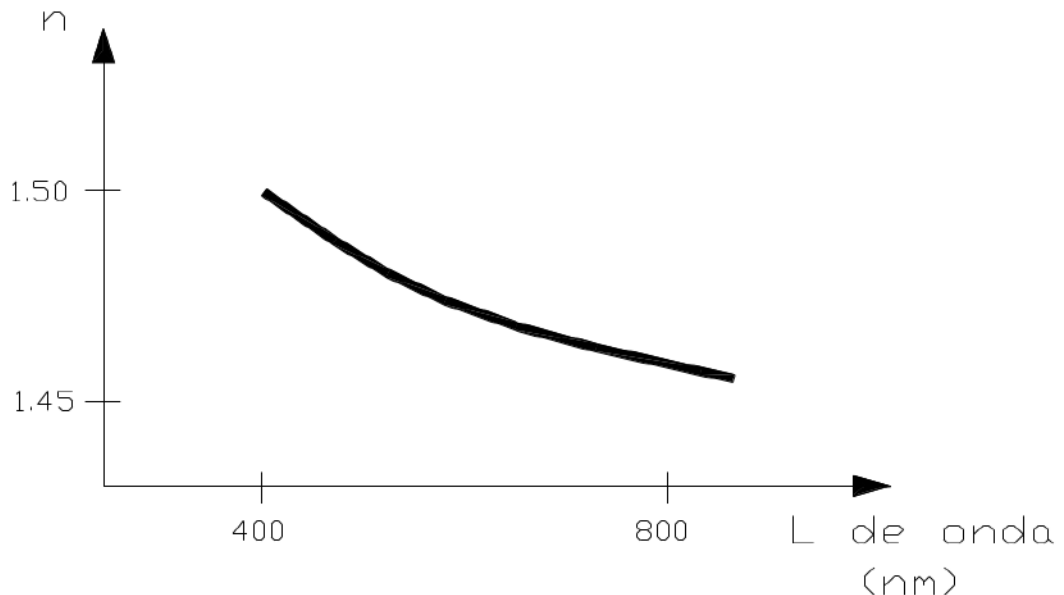
En el espectro electromagnético existe interferencia entre una onda y otra, hay un número determinado de caminos o modos, lo cual nos permite una completa transmisión entre entrada y salida.

$$BW = \frac{1}{\text{AnchoDelPulso}} \quad \text{Ancho de banda necesario para transmitir un pulso}$$

Existe un efecto llamado mezcla de modos: los modos interactúan entre sí, los retardos tienden a equilibrarse y todos los rayos tienden a llegar a la salida al mismo tiempo.

-Dispersión material o cromática

Un pulso de luz está compuesto por luces de diferentes longitudes de onda, dependiendo del ancho espectral de la fuente luminosa. El índice de refracción (n) depende levemente de la longitud de onda, y hace que la velocidad de propagación varíe un poco con la longitud de onda.



Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Pérdidas en las fibras ópticas

En altas frecuencias las pérdidas se producen principalmente por esparcimiento de Rayleigh, (luz de Tyndall) en bajas frecuencias principalmente por absorción infrarroja.

Las pérdidas de energía se deben a:

- El esparcimiento de Rayleigh
- Las pérdidas debidas a la filtración cuántica de los modos más cercanos a las frecuencias de corte dentro de la cubierta.
- El esparcimiento directo provocado por imperfecciones en la fibra, que son grandes en comparación con las longitudes de onda transmitidas.

Se producen pérdidas de luz a frecuencias determinadas debido a que los rayos se propagan en algún punto formando un ángulo mayor que el crítico de Brewster, de esta forma escapan a la cubierta y son absorbidos o atenuados drásticamente.

Cualquier cosa que provoque una discontinuidad o imperfección en la fabricación de una fibra, puede hacer que esta “disipe” energía en ese punto. Dependiendo de la frecuencia y modos de operación de la fibra a unas frecuencias pueden disipar y a otras no.

-Atenuación

La atenuación nos dice como se atenúa la luz a lo largo de la fibra y se mide normalmente en dB/Km, para una cierta longitud de onda.

Es la luz que no alcanza el otro extremo de la fibra o la ha abandonado o ha sido absorbida por ella (convertida en calor).

Lo siguiente contribuye a la dispersión:

- Dispersión de Rayleigh.
- Fallas de homogeneidad, imperfecciones.

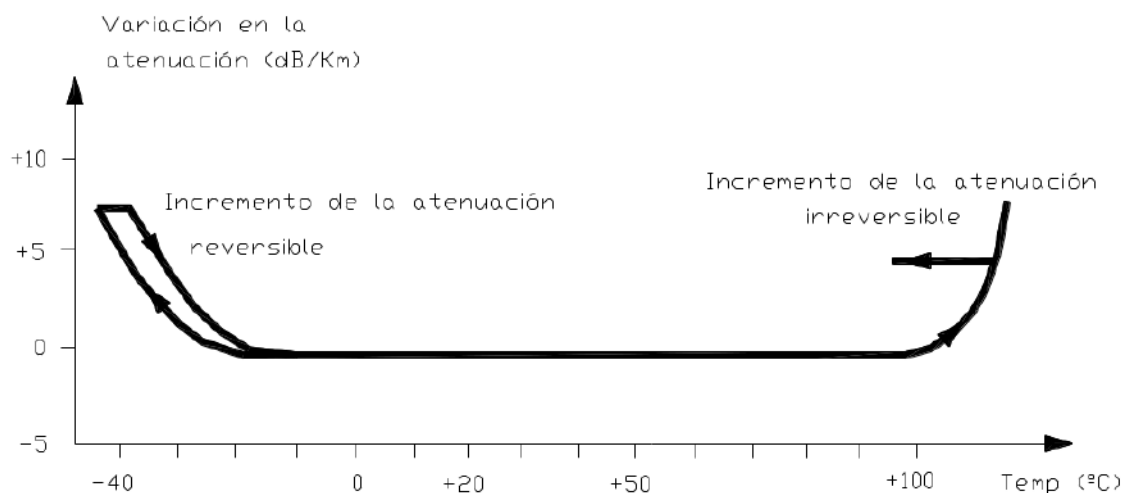


- Irregularidades en el diámetro del núcleo, curvaturas abruptas.
- Lo siguiente contribuye a la absorción:
- Absorción infrarroja (IR).
 - Absorción OH (hidróxido, humedad).
 - Iones metálicos.
 - Daños por tracción.
 - Absorción ultravioleta (UV).

-Dependencia de la atenuación con la temperatura

Cuando se excede el rango máximo de temperatura permitido, pueden ocurrir cambios irreversibles en las propiedades de transmisión de la fibra.

La atenuación en dB/Km, puede incrementarse en diversas magnitudes de 0°C a -40°C, si el cable de fibra no ha sido construido para este rango de temperatura.



Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Posibles aplicaciones en sistemas de fibra óptica

En sensores, robots, etc. Es conveniente que los sensores trabajen en el rango de frecuencia de la luz infrarroja, ya que ésta no se interfiere con la luz ambiental, por lo tanto si la luz cambia en el entorno donde se está utilizando el sensor, esto no provocará ningún cambio en el funcionamiento del dispositivo.

-Conceptos generales

Las imágenes son variaciones de la intensidad luminosa que incide sobre nuestros ojos. Se representan gráficamente las distintas longitudes de onda como líneas para mostrar como viaja la luz de la entrada a la salida de un elemento óptico. La red de difracción producirá líneas luminosas y oscuras.

Un sistema de fibra óptica no debe ocasionar la cancelación de los rayos de luz ya que las pérdidas aumentarían mucho, es decir, no puede actuar como polarizador de la luz.

Campos electromagnéticos en un medio dieléctrico:

El fenómeno es gobernado por las ecuaciones de Maxwell. En unidades MKS tenemos:

$$1) \nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \text{por ser un medio dieléctrico } j=0, \quad \Rightarrow \quad \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$2) \nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$3) \nabla \cdot D = - \rho = 0 \quad \text{por ser un medio dieléctrico } \rho=0, \quad \Rightarrow \quad \nabla \cdot D = 0$$

$$4) D = \epsilon_0 \cdot E + P$$

$$5) B = \mu_0 \cdot H + M \quad \text{por ser un medio dieléctrico } M=0, \quad \Rightarrow \quad B = \mu_0 \cdot H$$

$$6) \nabla \cdot B = 0$$

Aclaración: En un medio dieléctrico, el cual es no conductivo y no magnético
 $j = \rho = M = 0$

Donde $E(r, t)$ es el campo eléctrico, $H(r, t)$ es el campo magnético, $D(r, t)$ es el desplazamiento eléctrico, $P(r, t)$ es la polarización eléctrica, $M(r, t)$ es la magnetización y $B(r, t)$ es el campo de inducción magnética en el punto $r(x, y, z)$ y tiempo t , ϵ_0 y μ_0 son la permitividad y la permeabilidad del vacío respectivamente.

$$\text{De 1), 2), 3) y 4)} \quad \nabla^2 E - \nabla(\nabla \cdot E) = \nabla^2 E - \nabla_x \nabla E = - \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 D}{\partial t^2}$$

$$\text{Utilizando 2) y } c = \frac{1}{\mu_0 \cdot \epsilon_0} \quad \left[\nabla^2 E + \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = - \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \right]$$

En el dominio de las frecuencias (usando las transformadas de Fourier)

$$E(r, t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} E(r, \omega) \cdot e^{j\omega t} \partial \omega \quad P(r, t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} P(r, \omega) \cdot e^{j\omega t} \partial \omega$$

$$\nabla^2 E(r, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2} \cdot E(r, \omega) = - \mu_0 \cdot \omega^2 \cdot P(r, \omega)$$

$$\text{Si } P(r, \omega) = \epsilon_0 \cdot \chi^{(1)} \cdot E(r, \omega)$$

$$\nabla^2 E + k_0 \cdot \epsilon_r \cdot E = 0 \quad \text{donde: } k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi^{(1)} \approx n^2$$

Propagación de la luz en fibras ópticas:

$$\Delta^2 E + n^2(\omega) \cdot \frac{\omega^2}{c^2} \cdot E = 0 \qquad k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

en coordenadas cilíndricas:
$$\frac{\partial^2 E}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial E}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + n^2 \cdot k_0^2 \cdot E = 0$$

Solo dos de las seis componentes de E y H son independientes.

Tomamos E_z y H_z .

Solución:
$$E_z(r, \omega) = A(\omega) \cdot [F(\rho)]^{j\phi} e^{j\beta \cdot z}$$

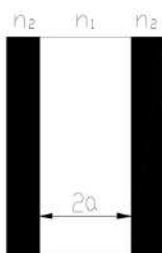
$$\frac{d^2 F}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dF}{d\rho} + \left[k^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right] \cdot F = 0 \qquad \text{donde: } k^2 = n^2 \cdot k_0^2 - \beta^2$$

$$F(\rho) = J_m(k \cdot \rho) \quad \text{para } \rho \leq a \quad \text{con } k = (n^2 \cdot k_0^2 - \beta^2)^{1/2}$$

$$F(\rho) = K_m(\gamma \cdot \rho) \quad \text{para } \rho > a \quad \text{con } \gamma = (\beta^2 - k_0^2 \cdot n^2)^{1/2}$$

$$n = \begin{cases} n_1 \dots \dots \text{para} \dots \dots \rho \leq a \\ n_2 \dots \dots \text{para} \dots \dots \rho > a \end{cases} \qquad n_2 \cdot k_0 \leq \beta \leq n_1 \cdot k_0 \quad \text{constante de propagación}$$

$$V^2 = a^2 \cdot k^2 = k_0^2 \cdot a^2 \cdot (n_1^2 - n_2^2) \quad \text{si } \gamma = 0 \qquad \text{Similarmente para } H_z$$

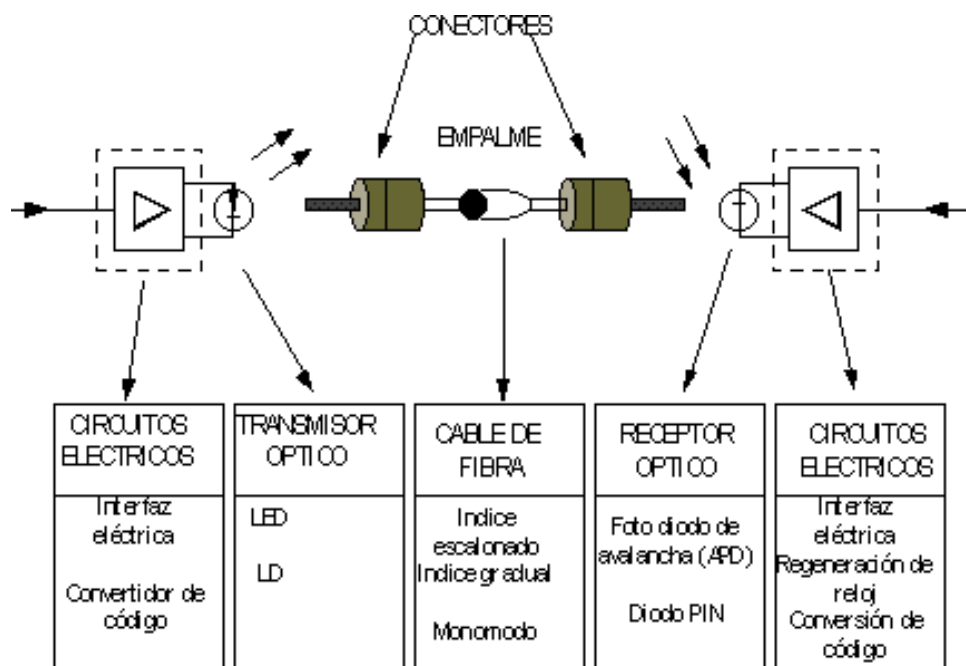


Enlaces por Fibra Óptica:

Sistema experimental de enlace por fibra óptica



Este sistema está formado por una fuente de luz, un medio para modular esa fuente, un sistema de transmisión (fibra óptica) y un receptor que convierte los impulsos de luz (suponiendo transmisión digital que es la que más predomina) en señales eléctricas, además de la conformación de los impulsos de luz a un formato adecuado. La fuente de luz es en este caso un láser de GaAlAs y como receptor fotodiodos de avalancha. La luz láser se monitorea, controla y modula eléctricamente. La ganancia del receptor se controla variando su alimentación. Un APD emplea su tensión de polarización para establecer un umbral de detección de los impulsos de luz incidentes.

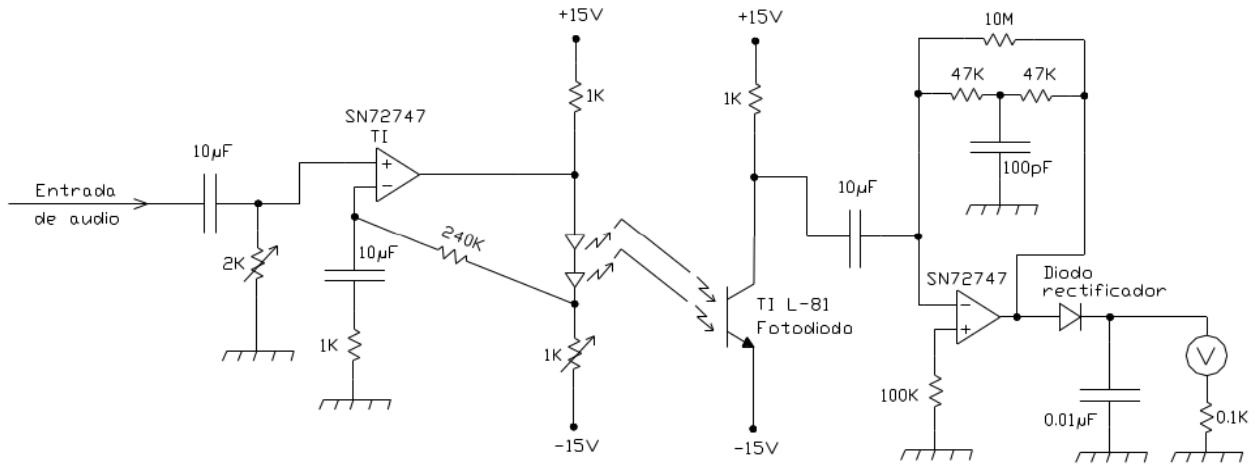


Enlace por Fibra Óptica

Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

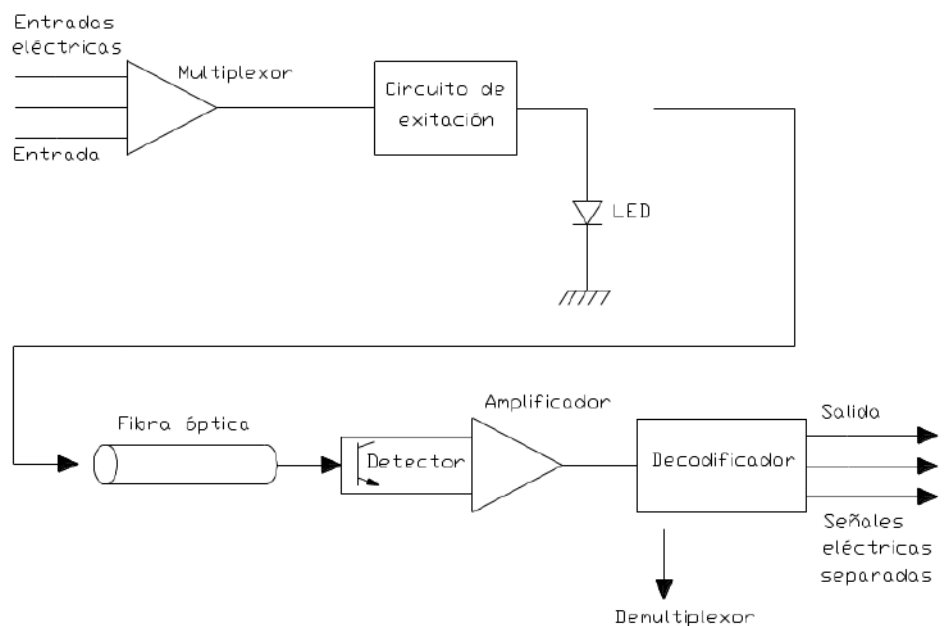
La razón por la cual la fibra óptica se volvió económicamente viable en los comienzos de la década de los 80's fue en parte que el LÁSER, construido en 1959, había alcanzado cualidades suficientemente buenas en lo que a expectativa de vida y precio se refiere y por otra parte, que las fibras ópticas habían alcanzado bajos valores de atenuación.

Circuito de un sistema de comunicación empleando rayos de luz



Se debe estabilizar una fuente transmisora de luz láser por medio de un control de temperatura, ya que el láser es muy sensible a los cambios de temperatura

Sistemas de comunicaciones por fibra óptica

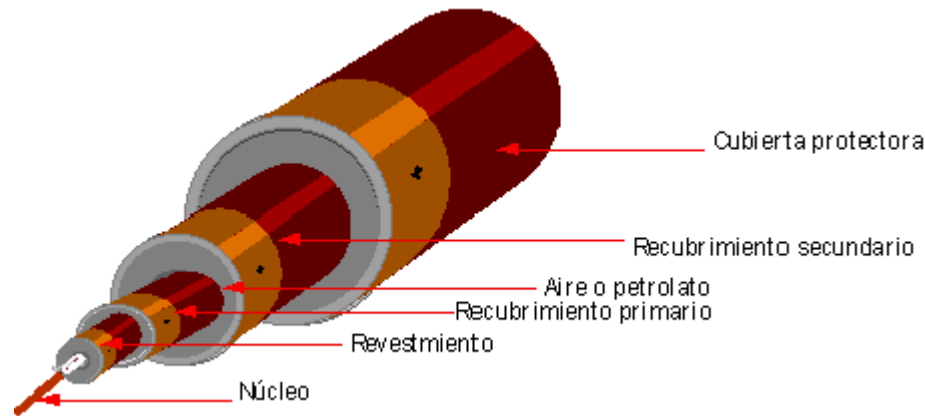


Fuente: Sistemas de comunicación (A. Bruce Carlson).

Composición y tipos de fibras



La fibra es tan pequeña y frágil, que se le ubica dentro de un cable, como se ve en la figura.



Cable de una fibra

El núcleo que consiste de vidrio de cuarzo, tiene un índice de refracción mas alto que el revestimiento de vidrio, cuarzo o plástico que lo rodea. A su vez la superficie del revestimiento esta protegida por una cubierta primaria de acrilato. La fibra esta protegida contra esfuerzos mecánicos debidos al cableado, instalación, cambios de temperatura, etc., ya que usualmente se coloca libre en el tubo que forma la cubierta secundaria.

Los aspectos principales para la propagación de luz en las fibras ópticas son:

- Que la pureza del material del núcleo sea tan alta, que la atenuación se mantenga dentro de los límites razonables.
- Que los rayos, que por una razón u otra tiendan a cambiar su dirección de propagación, se mantengan dentro del núcleo de la fibra.

La alta pureza fue un problema en el procesamiento del material de la fibra que ya ha sido resuelto. Se debe tener en cuenta que tanto el índice de refracción como la transparencia, varían con la longitud de onda y la temperatura. Una cierta perdida por dispersión de la fibra no puede ser evitada por razones teóricas. A mayores longitudes de onda las perdidas aumentan debido a la absorción de rayos infrarrojos (absorción del calor).

Los rayos son mantenidos en el núcleo debido a que el índice de refracción disminuye cuando aumenta la distancia desde el centro de una sección transversal imaginaria del núcleo de la fibra. Por esto el índice de refracción puede disminuir por pasos, como en la fibra con índice escalonado o hacerlo gradualmente como en la fibra con índice gradual. Las fibras ópticas son también unos medios especialmente adecuados para el transporte de impulsos digitales de alta velocidad.

Formados por finos tubos de vidrio plástico o cuarzo fundido metidos de varias milésimas de milímetro. Su nombre deriva del hecho de que son excelentes guías de onda para los impulsos lumínicos, y se emplean para transmitir informaciones de cualquier naturaleza transformadas en bits, en forma de ondas electromagnéticas de elevadísimas frecuencias, iguales a la de la luz.

Se utilizan concretamente frecuencias cercanas de infrarrojo, de unos 300 billones de hertzios, para las cuales tanto el vidrio como el cuarzo fundido son perfectamente transparentes, mientras que la envoltura de plástico es completamente opaca: de esta



forma, las fibras ópticas tienen la gran ventaja de evitar los fenómenos de interferencia electromagnética.

Las fibras se reúnen en cables, que poseen un número variable de ellas. Los más difundidos llevan 216 fibras, reagrupadas tres veces de seis en seis. Estos cables resultan incluso más baratos que los cables de cobre clásicos, y también son más ligeros manejables y fáciles de instalar.

Principales características de las fibras ópticas

- Una baja atenuación por Km cuando se transmite por las llamadas ventanas de transmisión, que están ubicadas en torno a los valores siguientes de longitud de onda: 0.8 μm , 1.3 μm y 1.55 μm . Esta última ventana es la que presenta menor atenuación.
- Total inmunidad al ruido y a las interferencias electromagnéticas, lo que constituye un medio especialmente útil en ambientes con alto ruido.
- Uso de potencias del orden de los mW, en comparación con otros medios de comunicaciones que requieren potencias mayores.
- Su pequeño tamaño y poco peso, hace de ellas medios de comunicaciones fáciles de instalar, especialmente cuando se trata de completar sistemas sobre ductos preexistentes, sobrecargados por otro tipo de medios que no es posible eliminar.

Principios de diseño de un cable de fibra óptica

Los principales puntos de diseño son la fragilidad del material, la sensibilidad óptica y los mecanismos de fabricación, instalación y servicio de dichos cables. Aplicando revestimientos adecuados se obtuvo la resistencia mecánica necesaria y las propiedades para el cableado de la fibra.

El diseño básico requiere que las fibras sean protegidas contra esfuerzos de tensión y radiales, condiciones de curvatura y problemas de entorno.

Tres tipos principales de fibras

La fibra clásica cuya fabricación es mas fácil, es la **Fibra Multimodo** de índice escalonado. Esta tiene una gran dispersión para reducirla se crearon otros tipos de fibras.

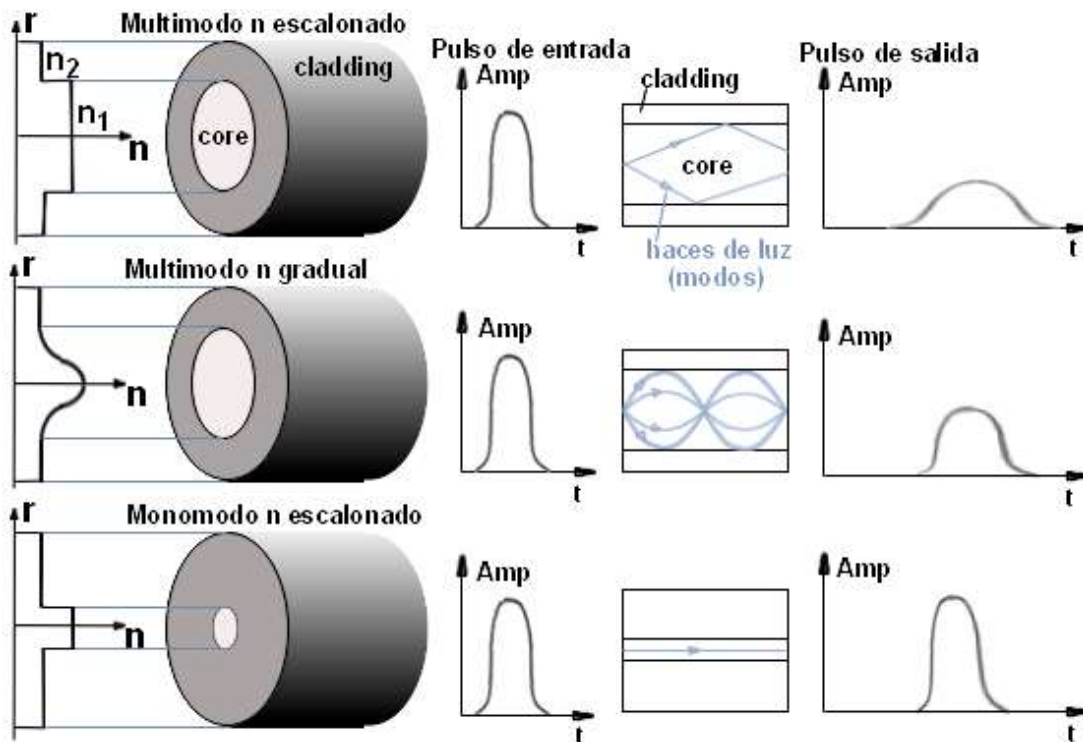
Fibra de índice escalonado: Tiene dispersión reducido ancho de banda y son de bajo costo, dado que resultan tecnológicamente sencillas de producir. La fibra de índice escalonado puede no tener cubierta; es la mas simple, pero también la de menor eficiencia. Esta fibra puede tener un diámetro $2a$ (a : radio del núcleo), hasta de un milímetro o mas. La fibra de índice escalonado de buena calidad posee cubierta.

Estas fibras, utilizadas por lo general para uniones de corta distancia, tienen diámetros del núcleo $2a$ que varían de 10 a 200 μm y diámetros de cubierta $2b$ que varían de 150 a 250 μm . Su apertura numérica es de alrededor de 0.3. Para un kilometro de fibra el retraso Dt varia de 20 a 2ns y la banda pasante de 20 a 200 Mhz.

La fibra de índice gradual: El índice de refracción n de la sección transversal del núcleo varia en forma gradual desde el centro hacia la vaina. Más costosas pero de gran ancho de banda. Se puede disminuir la dispersión haciendo variar lentamente el índice de

refracción entre el núcleo y el recubrimiento. La fibra de índice gradual es más difícil de fabricar y se utiliza en los enlaces de más alta capacidad de información. El perfil del índice es pseudoparabólico. El diámetro del núcleo $2a$ es generalmente de $50 \mu\text{m}$ y el de la cubierta de $125 \mu\text{m}$. La apertura numérica es alrededor de 0.2. El retraso está en una función de la optimización del perfil del índice, del ancho de banda espectral y de la longitud de onda de la fuente luminosa utilizada. Para un kilómetro de fibra, el retraso Dt varía de 800 a 200 ps y la banda pasante de 500 a 1500 Mhz.

La fibra monomodo: Las dimensiones del núcleo son comparables a la longitud de onda de la luz, por lo cual hay un sólo modo de propagación y no existe dispersión. Este tipo de fibra que promete en las telecomunicaciones a gran distancia con elevada eficiencia, todavía permanece en el campo de las investigaciones. En la fibra monomodo el diámetro del núcleo es tan pequeño que solo existe un modo de propagación, el diámetro del núcleo $2a$ es alrededor de 6 a $8 \mu\text{m}$, mientras que el diámetro de la cubierta es de $125 \mu\text{m}$. La diferencia relativa de índice D es del orden de 0.005. Para este tipo de fibra se consideran posibles bandas pasantes a los 50 Ghz por kilómetro.



Tipos de fibras

fuelle: www.yio.com.ar/fo/

Comparación entre fibras monomodo y multimodo

Las fibras de bajas pérdidas (monomodo) son caras y con NA pequeña, por lo que el alineamiento previo al acople debe ser realizado con gran exactitud, se utilizan en distancias largas.

Las fibras de altas pérdidas (multimodo), son de bajo costo y tienen una NA alta, poseen mayores facilidades para el empalme y una superior eficiencia de acoplamiento.

En la fibra de índice gradual la apertura numérica (NA) es mayor en las fibras de índice escalonado, lo que significa que en el caso de la fibra de índice gradual, es necesario un posicionamiento de la fuente de luz de mayor precisión.



Uso de las Fibras Ópticas en aplicaciones industriales

Para transmitir información es necesaria una banda de frecuencia del orden de los kilohertz. **Podría aumentarse la velocidad de transmisión aumentando el ancho de banda, alcanzando velocidades del orden de los gigahertz y aun así nos quedaría un ancho de banda suficiente para poder manejar un gran número de canales simultáneos.**

La Fibra Óptica como sensor

La fibra la podemos estirar, curvar, someter a una temperatura o incluso a la influencia de ondas electromagnéticas, las cuales pueden hacer cambiar la polarización de la luz.

Sensor de temperatura: Cuando sometemos a la fibra óptica a un aumento de temperatura el diámetro de la fibra aumenta, con esto varía el camino que siguen los rayos de luz dentro de ella y también el ángulo de refracción y reflexión, de tal forma que se produzca una variación en la cantidad de luz (o polarización de la luz) que viaja por la fibra. Midiendo la intensidad de luz en el extremo receptor obtenemos la variación de temperatura en la fibra.

Sensor de RPM: Utilizamos la fibra para llevar los rayos de luz a una rueda con una superficie pulida (o pequeño espejo) que refleje los rayos de luz sobre una “célula receptora” por cada revolución de la rueda; un contador digital puede censar fácilmente los impulsos electrónicos en que son convertidos los impulsos de luz y darnos la velocidad de rotación, la luz reflejada puede ser conducida por la fibra a un diodo receptor.

Medidor de nivel de fluidos: Consiste en colocar una fuente emisora de luz en un extremo del depósito de agua de vidrio transparente y alineada con ella en el otro extremo un diodo receptor. Cuando el fluido sube en el contenedor de vidrio se reducirá la luz, el fotodiodo no recibe luz y proporciona una salida negativa, cuando disminuye la luz pasará libremente, llegando al diodo receptor (PIN o APD) y obteniendo una tensión de salida que opere (abra) la válvula de control y complete el depósito.

Sensor mecánico de fibra óptica: La fibra óptica se puede usar como sensor de movimiento (presión) mecánico unida a la válvula de luz accionada piezoeléctricamente. El elemento piezoeléctrico responde a presiones generando una señal eléctrica que se aplica a una célula Kerr que contiene nitrobenzeno. Esta señal eléctrica hace que el nitrobenzeno sea transparente, así los rayos pasan por la célula Kerr y la fibra óptica, hasta el receptor donde la luz es convertida a señal eléctrica digital codificada proporcional.

Efectos relacionados con la fibra óptica

Si se emplea una fibra que tenga un núcleo de un material magnetostrictivo, cuando el núcleo se contraiga y se expanda o vibre por haber estado expuesto a algún campo magnético de intensidad variable, entonces la forma de la fibra variará ligeramente. Esto puede hacer que algunas partes de la luz que esté pasando a través de ella sufra un ligero cambio en su polarización respecto del resto del haz.

Refracción doble (birefringencia)

Un haz incide sobre un material y se divide en dos haces de luz. Si ambos vectores \hat{E} fueran iguales y de polarización opuesta se cancelan al combinarse, formando un rayo de luz inexistente. Esta división de rayos se debe a que los rayos viajan en el interior del cristal de calcita a velocidades diferentes ya que el n es distinto (n depende de λ). En resumen: existen cristales capaces de dividir y curvar los rayos de luz de diversas maneras. Se pueden separar varias frecuencias de luz (colores) por medio de cristales y prismas.

Interferómetro

En el se produce un refuerzo o cancelación del frente de onda. Por lo tanto, podría propagarse cualquier tipo de onda, dividirla, originar algún desplazamiento de fase de un haz debido a algo externo o a algo que se desea medir, y recombinar ambos haces y entonces observar cuanta interferencia tiene un haz con respecto al otro en esas condiciones. Por medio de algunos análisis es posible relacionar el efecto de la interferencia con números que representen los cambios en el mundo exterior, de forma que dichos cambios puedan ser medidos cuantitativamente. Se utiliza para detectar pequeños cambios de fase.

Efecto Pockels

Los cristales de niobato de litio provocan una rotación de la polarización de la luz proporcional a la magnitud del voltaje aplicado. Ahora lo que falta es usar alguna clase de sistema detector de efecto interferencia y comparar esta rotación con una referencia que no haya sido rotada. Conociendo la relación matemática entre la rotación de la polarización en grados y el voltaje que la origina, bastará con medir el valor de la rotación para poder determinar el voltaje que se aplicó al cristal. Utilizando métodos de interferometría podemos determinar dicha rotación de la polarización.

Aplicaciones de fibra óptica con laser

Los láseres de estado sólido son pequeños diodos semiconductores del tipo inyector. Los láseres de rubí de gas no sirven para trabajar en fibra óptica debido a su gran tamaño y su gran peso. Los diodos láser de estado sólido producen luz monocromática y polarizada.

Comparación entre canales de hilo de cobre y fibra óptica



En los sistemas de cobre tanto analógicos como digitales, es necesario gran cantidad de repetidoras y la susceptibilidad a las interferencias es muy alta.

Uso de lentes con fibra óptica

Se usan para introducir la luz en la fibra óptica. Un espejo parabólico enfoca los rayos de luz igual que una antena parabólica enfoca las ondas de radar.

Utilización de fibra óptica en entornos peligrosos

En el control de materiales inflamables o explosivos, el problema de las comunicaciones entre un emisor y un receptor se resuelve por medio de fibras ópticas, ya que por las mismas viaja la luz y no corriente eléctrica (que puede originar un incendio o explosiones) desde una fuente emisora al sensor y devuelve la luz reflejada a un detector remoto.

Fabricación de la fibra óptica



Elección de materiales

Una fibra óptica esta constituida por dos cilindros concéntricos de materiales dieléctricos. Para que haya propagación de la luz por reflexiones internas totales, el índice de refracción del material que constituye el cilindro interior (núcleo de la fibra) debe ser ligeramente superior al índice de refracción del material que constituye el cilindro exterior (cubierta de la fibra). El perfil del índice puede variar bruscamente en la interfaz nucleo-cubierta (fibra de índice escalonado) o aumentar gradualmente de la cubierta hacia el centro (fibra de índice gradual).

Los materiales que intervienen en la fabricación de fibras ópticas deben satisfacer un cierto número de características. En primer lugar deben ser elásticos para tomar la forma de la fibra. También deben ser transparentes para las longitudes de onda luminosa que se inyecten a la fibra. A causa de las fuentes y de los detectores de luz que se utilizan, esta gama de longitudes de onda varia de 0.6 a 1.6 μm . En una palabra, el material que constituye el núcleo debe tener un índice de refracción superior al material que constituye la forma de la cubierta.

Estos tres principales criterios, que no son los únicos, son suficientemente restrictivos, como para limitar la elección de vidrio, materiales plásticos y líquidos. La utilización de líquidos (como el tetracloruro de carbono CCl_4) se volvió obsoleta debido a las grandes dificultades técnicas. Las materias plásticas tienen una atenuación relativamente elevada a las longitudes de ondas utilizadas, por lo que los vidrios son los mejores materiales.

Los vidrios utilizables, es decir, los vidrios transparentes dentro de la gama de longitudes de onda entre 0.6 y 1.6 μm , están constituidos por mezclas de óxidos metálicos. Los principales óxidos que pueden tomar un estado vítreo, es decir, no cristalino, son los óxidos de silicio (SiO_2), de germanio (GeO_2), de fósforo (P_2O_5) y de boro (B_2O_3). A estos óxidos los cuales pueden formar estructuras amorfas (no cristalizadas), los vidrieros les llaman **elementos formadores**. Al mezclar los óxidos formadores con otros óxidos metálicos, llamados **elementos modificadores**, se pueden modificar ciertas propiedades físicas (temperaturas de fusión, índice de refracción) o químicas (solubilidad). Los principales óxidos modificadores son el oxido de sodio (Na_2O), el oxido de calcio (CaO), el oxido de bario (BaO) y el oxido de potasio (K_2O), son óxidos de metales alcalinos. Por medio de la mezcla de óxidos formadores con los modificadores, se puede crear una infinidad de vidrios que tienen todos diferentes propiedades físicas.

Fabricación de la fibra



Se calienta sílice y otros productos químicos hasta que se funden, se los remueve hasta formar una mezcla uniforme, se coloca uno de los extremos calientes a través de un agujero de un pequeño troquel metálico y se estira a través del agujero hasta que resulte el tamaño deseado, se debe añadir calor para mantener la correcta plasticidad del material, luego se lo pasa a través de un baño del revestimiento, luego se lo enfría y enrolla en un carrete. El punto de reblandecimiento suele estar entre 800 y 1200°C.

La fibra ideal debe tener las características siguientes:

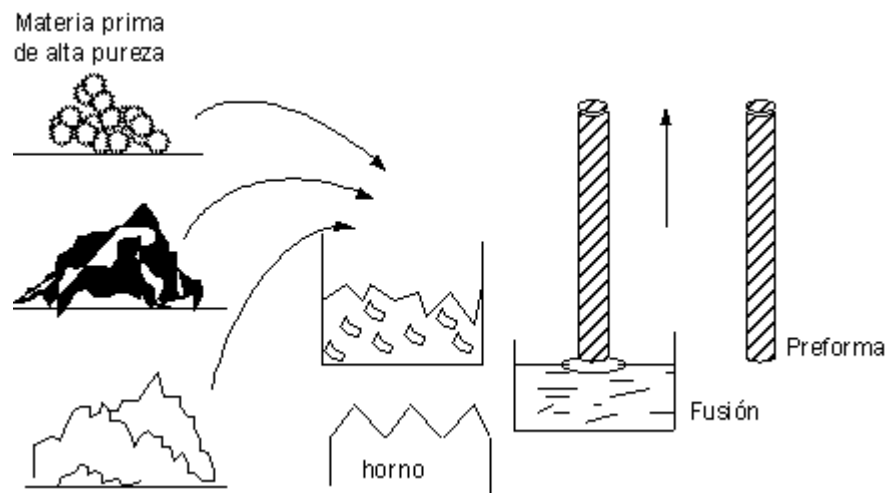
- Poseer un núcleo y una cubierta con índices diferentes
- Tener un núcleo y una cubierta concéntricas
- Tener un diámetro del núcleo constante en toda su longitud
- Tener un diámetro de la cubierta constante en toda su longitud
- Tener un perfil del índice optimizado lo que conduce a la mínima dispersión posible
- Tener una atenuación muy baja
- Ser lo mas larga posible
- Tener la mayor resistencia mecánica posible
- Ser lo mas barata posible

Esta fibra ideal no existe. La tecnología de fabricación sin embargo, tiende a optimizar todas las características. Según la utilización que se haga de la fibra, algunas de estas características tienen mayor o menor importancia. Es de esperar que haya diversas técnicas de fabricación, que respondan a las exigencias mencionadas con anterioridad.

Una Fibra Óptica se presenta en forma de un cilindro de material con índice de refracción n_1 (el núcleo) rodeado de otro cilindro concéntrico de material de índice n_2 (la cubierta). Esta estructura cilíndrica debe tener además la forma de una fibra, es decir, poseer un diámetro muy pequeño (generalmente 125 μm) y una longitud muy grande.

Existen varios métodos para fabricar fibras ópticas, pero todos se derivan de la llamada "Preforma", que es una varilla o tubo de aproximadamente 1 m de largo de cuarzo de alta pureza u otro tipo de vidrio. El cuarzo (silicio, SiO_2) existe en grandes cantidades en la tierra como la arena.

La demanda de alta pureza significa que todo el proceso de fabricación de la fibra ha de ser realizado en áreas limpias, especialmente diseñadas. Partiendo de la "Preforma", la fibra es estirada por diferentes métodos en longitudes que la hacen apta para su transporte e instalación como cable. Las longitudes son generalmente del orden de algunos kilómetros.



Proceso de producción de la fibra

Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Métodos para fabricar la fibra

Existen tres métodos para fabricar la fibra óptica, los cuales son:

- Deposición de vapores químicos, método interno (CVD).
- Deposición de vapores químicos, método externo (OCVD).
- Método del doble crisol (DC).

Método de deposición de vapores químicos

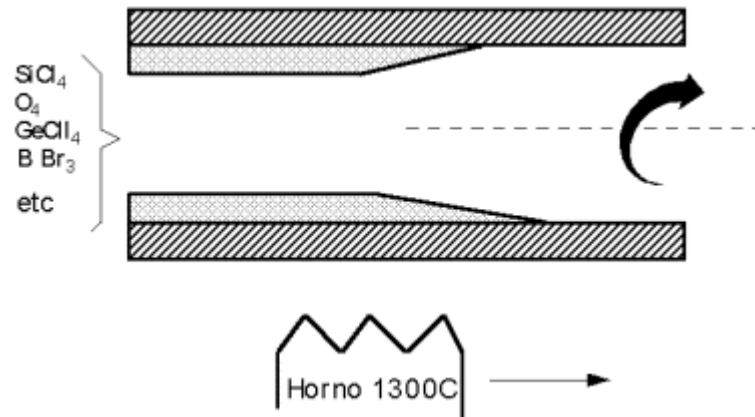
En este método en la pared interior de un pequeñísimo tubo de vidrio, se depositan una o muchas capas de un material especial. A continuación se calienta el tubo hasta que alcanza un grado de plasticidad suficiente como para colapsarse, convirtiéndose en una varilla. Lo único que resta es llevar la varilla a través del molde adecuado hasta que se reduzca al tamaño y diámetro adecuado. Se utiliza cuarzo fundido en el proceso de deposición. Se ha descubierto que el material del núcleo debe ser dopado con ciertos óxidos de forma que alcance un índice de refracción mayor que el del cristal que forma la cubierta, lo que se consigue utilizando sílice fundido que haya sido dopado con otros óxidos. El núcleo podría ser originalmente de sílice dopado con óxido de germanio.

Deposición de vapores químicos, método interno (CVD)

Este método produce fibras con baja atenuación y gran ancho de banda y es por lo tanto apto para la fabricación de fibras para telecomunicaciones.

El material de inicio es un tubo de cuarzo de alta pureza que es calentado y se mantiene en rotación mientras es atravesado por oxígeno, cloruros de silicio, germanio y bromuro de boro en fase gaseosa.

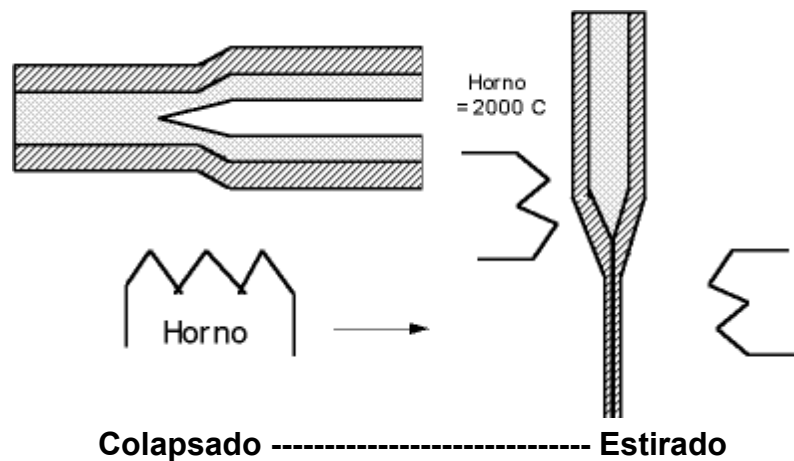
En la zona calentada tienen lugar las reacciones químicas y el cuarzo con impurezas controladas se deposita en el interior del tubo. El perfil de índice deseado para la fibra de índice gradual se obtiene por el nivel de impurezas controladas.



Método interno (CVD)

Fuente:Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

En un segundo calentamiento el tubo internamente recubierto, es colapsado transformándose en una varilla.



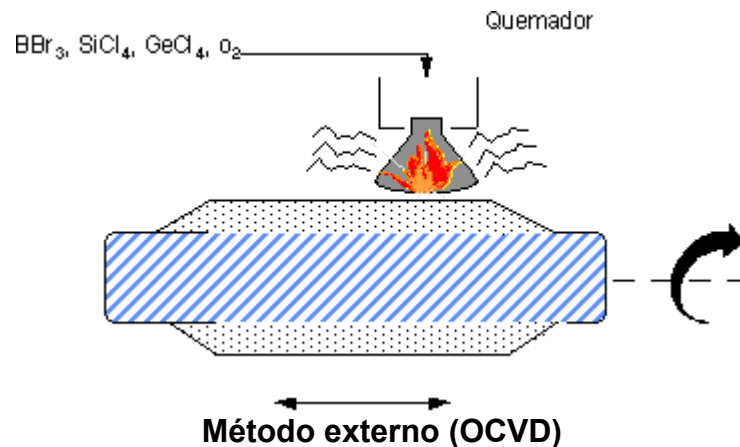
Colapsado ----- Estirado

Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Luego la fibra es estirada y provista de un recubrimiento primario de acrilato.

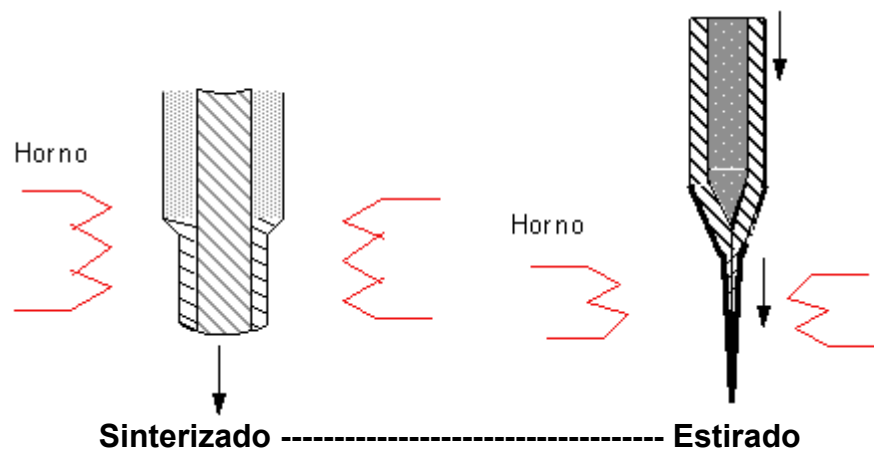
Deposición de vapores químicos, método externo (OCVD)

Por deposición en el exterior de la varilla, se puede producir la fibra con similar comportamiento.



Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Mediante un quemador se agregan los metales halogenados. Por rotación y por movimientos hacia atrás y hacia adelante, la varilla será recubierta por una capa que semeja un polvo.

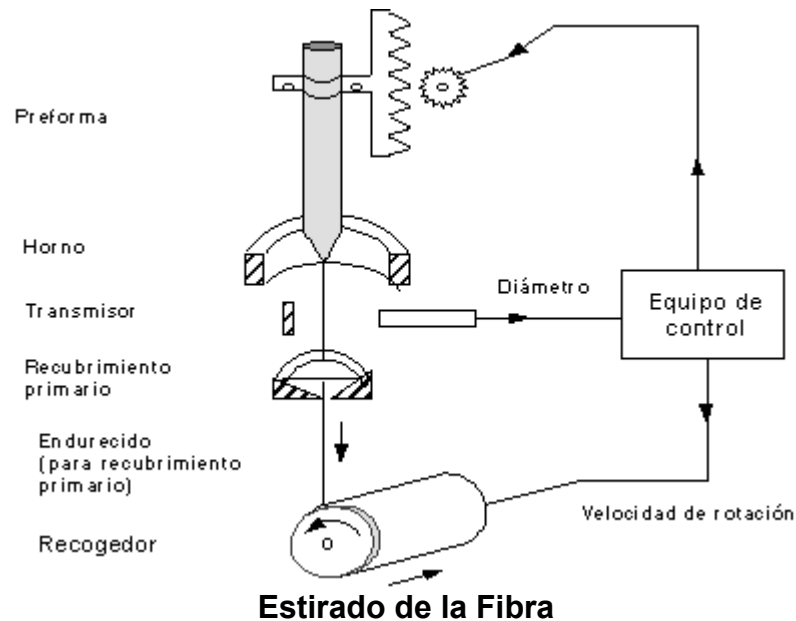


Fuente:Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Luego la varilla es sinterizada en un horno. Y por ultimo es estirada, por fusión al diámetro final de la fibra.

Método del doble crisol (DC) (con n índice gradual)

Por este método se obtienen fibras más económicas del tipo de índice escalonado. También se obtendrán fibras de índice gradual si se difunden los dos tipos de vidrio, uno dentro del otro.



Fuente:Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

El método del doble crisol es consecuencia de las técnicas vidrieras clásicas. Esta se compone de dos etapas sucesivas:

- La preparación de vidrios
- y el conjunto de fibras

El vidrio del núcleo se coloca en el interior de un crisol que tiene un agujero en el fondo y el material de la cubierta en el otro crisol que tiene un agujero concéntrico con el agujero del primero. Ambos vidrios comienzan a fluir y el vidrio de la cubierta envuelve y se funde al vidrio del núcleo. Ambos crisoles se alimentan con la preforma de vidrio con las composiciones químicas necesarias para obtener los n deseados. Por último la fibra es enrollada en tambores en que quedará almacenada para su uso.

Para calentar el material de la fibra por encima de los 2000°C se utilizan el horno de calentamiento por inducción y láseres especiales de CO_2 para calentar directamente las varillas.

Para la fabricación de la fibra óptica se utilizan por ejemplo silicato de cal sodada y cristales de borosilicato sódico. Estos se preparan a partir de óxido de silicio fundido y añadiendo a la fusión algún compuesto modificador. Los aditivos pueden ser carbonatos o nitratos que se descomponen para formar los óxidos en la fusión.

Ejemplo de fabricación de una fibra óptica: en crisoles de platino se funden una mezcla de óxido de silicio, carbonato sódico y carbonato cálcico de gran pureza, utilizando potencia de radio frecuencia (como en los hornos de microondas) para calentar el crisol. Una vez fundidas las sustancias se remueven con una “paleta” de platino a 1500°C . La mezcla se mantiene constante a esta temperatura (o se hace hervir a fuego lento) hasta que sobre la superficie aparezcan grandes burbujas. Finalmente, se remueve de nuevo con las paletas especiales hasta obtener la homogeneidad requerida y una pureza óptica. En este momento se reduce la temperatura en unos 200°C y se mantiene nuevamente a temperatura constante durante un cierto tiempo para permitir que las pequeñísimas burbujas que se hayan formado sean absorbidas por la mezcla fundida. La mezcla total se



deja enfriar a temperatura ambiente y se somete a ciclos caloríficos (calentamiento y enfriamiento) durante un período de tiempo entre 20 y 24 horas.

El calor debe ser uniforme, a la temperatura correcta, los materiales de gran pureza y la fusión no debe estar sujeta a impurezas externas.

Uno de los materiales utilizados para fabricar fibras ópticas es el cristal de borosilicato sódico dopado con óxido de talio. La cubierta esta formada por borosilicato sódico no dopado.

La técnica utilizada hace que a medida que las fibras están siendo formadas el material de la cubierta esté en contacto con el núcleo durante un tiempo cuando el material esta muy caliente. Lo que se consigue con ello es un intercambio de iones entre el sodio y el talio. Cuando así ocurre se forma un índice de refracción gradual.

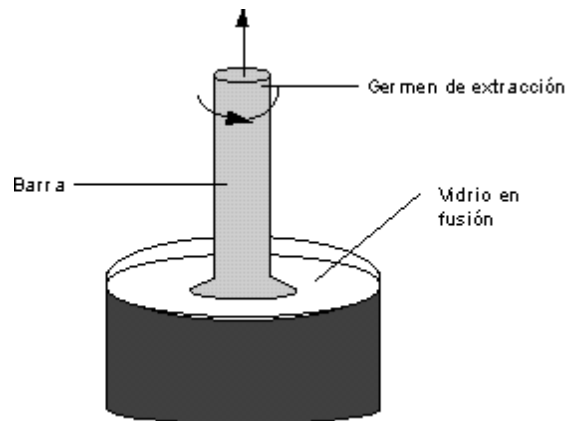
Otro material utilizado en el desarrollo de fibras ópticas es un material sintético, aunque realmente se trata de un óxido de silicio fundido. Las fibras sintéticas son preparadas a partir de sílice sintética por un proceso de evaporación de tetraclorido de silicio y la consiguiente oxidación o hidrólisis.

Preparación de vidrios compuestos.

Los vidrios utilizados son vidrios compuestos. Para fabricar una fibra, son necesarios dos diferentes vidrios, el primero sirve para la fabricación del núcleo y el segundo, en donde el índice de refracción es mas bajo, sirve para fabricar la cubierta.

Estos vidrios se fabrican a partir de polvos, que por lo general son de sílice ultra puro y de carbonatos que producen óxidos metálicos cuando se calientan a alta temperatura. Estos polvos de base deben ser muy puros y tener lo menos posible de impurezas metálicas. Los polvos escogidos se mezclan inmediatamente en las proporciones necesarias para obtener el vidrio del índice de refracción deseado. La mezcla se pone en un crisol y se calienta hasta su completa fusión. Existen diversos procedimientos para el calentamiento del crisol. Se le puede calentar por radiación al meterlo en el horno.

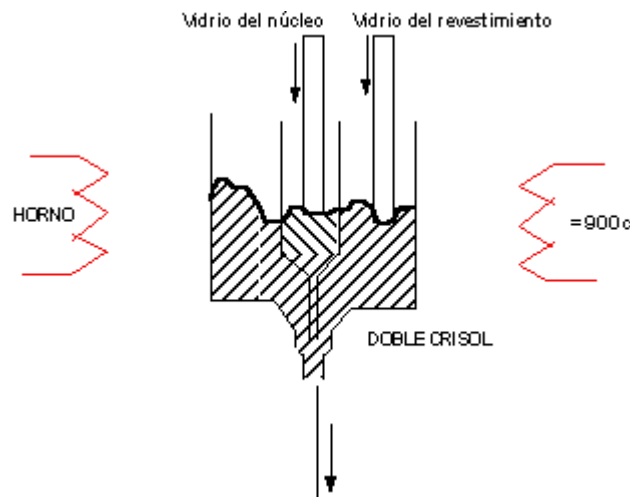
Si el crisol es conductor de electricidad (platino), puede calentarse por inducción eléctrica por medio de ondas de radiofrecuencia (100 kHz). También existe otro procedimiento fundado en la propiedad que tiene el vidrio de conducir la electricidad cuando alcanza una temperatura de 650°C. el crisol se pre-calienta, y después el vidrio se calienta directamente por inducción eléctrica; en este caso se utilizan ondas de radiofrecuencia de algunos megahertz. Este procedimiento tiene la ventaja de dejar relativamente frío el crisol, lo que disminuye el traspaso de impurezas del crisol al vidrio. Según la técnica empleada, los crisoles utilizados en general son de sílice ultra-puro o de platino. Cuando la mezcla esta fundida, se agita para obtener un vidrio de composición homogénea. Es importante para limitar la atenuación por difusión en la fibra. A fin de minimizar la acción de las impurezas metálicas en el fenómeno de absorción, se procede a controlar su estado de oxidación, ya sea haciendo borbotar el oxígeno en el vidrio en fusión, o agregando óxidos de arsénico y de antimonio a la mezcla. Después de esperar que todas las burbujas presentes en el vidrio en fusión se remonten a la superficie, se extrae del crisol el vidrio formado. Para hacerlo, se recurre al método de extracción.



Técnica de extracción

Fuente:Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Esta técnica, igualmente utilizada en la fabricación de monocristales, consiste en templar un germen en la mezcla en fusión y hacerlo subir lentamente. Las fuerzas de capilaridad hacen que el líquido siga al germen hacia una zona más fría en donde se solidifica. Así se saca lentamente todo el vidrio formado que ahora se presenta en forma de una barra cilíndrica. Después, para poder fabricar la fibra son necesarias dos barras de vidrio que tengan índices de refracción ligeramente diferentes y por lo tanto una composición diferente.



Fuente:Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Defectos de superficie, corrosión

Si la superficie de la fibra no está protegida puede ocurrir pequeños defectos de superficie, los cuales, por las fuerzas de tracción, crecen rápidamente.



abrasiones. El elemento más dañino para la fibra es el vapor de agua el cual produce fatigas o fallos a relativamente largo plazo.

Si se enrolla una fibra sobre la superficie de un tambor, para su almacenamiento, en el cual esta superficie puede no ser perfectamente plana, sus imperfecciones (partículas de polvo, trocitos de metal de tamaño microscópico o simplemente arañazos) pueden reducir la transmisión de luz y provocar pérdidas.

Los cables de fibra óptica pueden ser planos en forma de cinta como los utilizados en las computadoras o el cable circular convencional. Las fibras revestidas son enrolladas en forma helicoidal alrededor de un hilo central de acero revestido para darle mayor robustez. El conjunto tiene una capa de polímero protegiendo el interior; los extremos son encapsulados en uretano y finalmente cubierto por ejemplo con plástico de cloruro de polivinilo.



Cables ópticos empalmes conectores

Cables ópticos

Una fibra óptica, resultado del proceso de formación de fibras, se asemeja a un cabello largo; su diámetro exterior puede ser pequeño (de 100 a 150 μm) y puede utilizarse comercialmente en telecomunicaciones. Aunque teóricamente una fibra de vidrio o de sílice tiene gran resistencia, sus propiedades ópticas y mecánicas se ven muy afectadas por el medio ambiente, de modo que, es necesario cablear la fibra para mantener estables sus características de transmisión y facilitar la insolación del enlace óptico. Un cable de fibras ópticas o cable óptico puede contener una sola o muchas fibras. El cable óptico debe asegurar un medio ambiente adecuado para las fibras y facilitar su manejo.

Influencia de agente exteriores

La fibra desde su salida del horno hasta su instalación y su utilización en el campo, esta sometida a una serie de interacciones con agentes externos. Estos pueden influir al enrollar la fibra sobre tambores, durante las operaciones de cableado y de colocación del cable, así como en el transcurso de su utilización. Las interacciones son mecánicas o químicas. Es importante conocer la influencia de estos agentes externos sobre las propiedades ópticas y mecánicas de la fibra, con el fin de fabricar un cable con muy buena calidad.

Influencia de agente externos sobre las propiedades mecánicas.

Cuando una fibra esta sometida a una fuerza en sentido longitudinal, se dice que se ha aplicado un esfuerzo normal a la fibra. Por la acción de este esfuerzo normal, la fibra sufre un alargamiento o una dilatación lineal relativa, este comportamiento se explica por la presencia de pequeñas fisuras en la superficie de la fibra. Cuando se aplica una elongación relativa a una fibra, esta se concentra al rededor de la fisura, la que se abre por efecto del esfuerzo. Como resultado de este fenómeno, la resistencia de una fibra a la ruptura depende mucho más del estado de la superficie y de las microfisuras que se encuentran, de las fuerzas de enlace de los átomos de vidrio.

Estas microfisuras pueden tener varios orígenes; inhomogeneidades del vidrio, separación de fase del vidrio debido al tratamiento térmico que sufre la fibra durante su fabricación, interacciones con el medio ambiente externo a la superficie de la fibra a la salida del horno de formación, daños mecánicos.

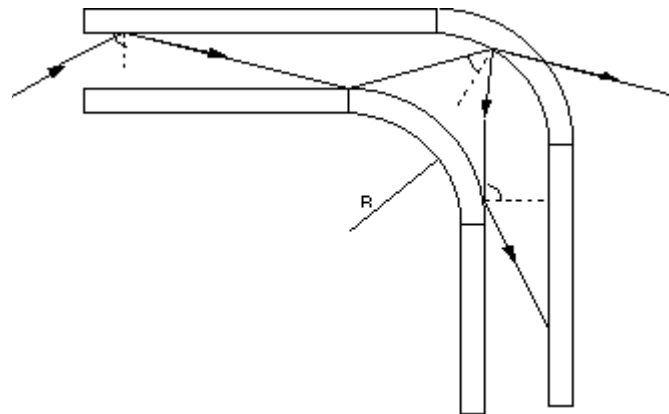
Ahora se entiende el papel de la cubierta plástica sobre la fibra desde su salida del horno de formación, los daños mecánicos provocan fisuras mayores y se pueden producir al enrollar la fibra sobre un tambor. Bajo esfuerzo la fibra envejece y se rompe después de un cierto tiempo; a esto se le llama **fatiga estática de la fibra**. La probabilidad de ruptura de una fibra es una función del tiempo y este fenómeno de fatiga se debe al medio ambiente exterior principalmente a la humedad. Una fibra sometida a tensión en el vacío, en ausencia total de la humedad, escapa prácticamente al fenómeno de fatiga.

Influencia de las curvaturas y microcurvaturas

En una instalación real, la fibra óptica es cableada, lo que implica contacto mecánico, ya que la fibra debe ser soportada por los elementos constitutivos del cable. Además, el cable debe sufrir curvaturas para vencer obstáculos sobre el terreno.

Curvatura de la fibra. En el interior del cable, una fibra puede no seguir una trayectoria rigurosamente recta, y por el contrario sufrir curvaturas. Si la fibra está curvada, el ángulo de reflexión ya no es constante entre una reflexión y otra.

Las pérdidas ópticas que se deben al acoplamiento modal son ocasionadas cuando los modos (rayos) que forman ángulos pequeños con el eje cambian a modos con ángulos muy grandes, los cuales no pueden mantenerse dentro de la fibra y la abandonan con el correspondiente aumento en la atenuación.



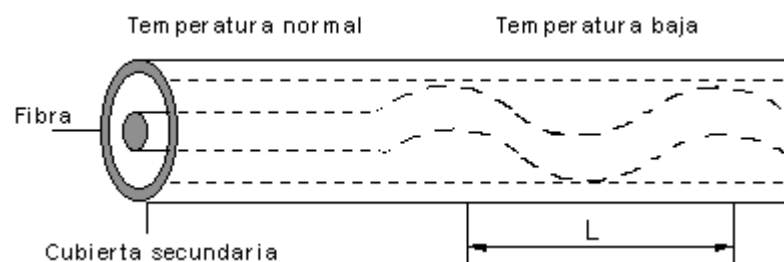
Curvaturas.

Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Debido a que el ángulo de incidencia "y", para muchos rayos (modos), decrece considerablemente en una curvatura, y no alcanzan la condición para la reflexión total, muchos rayos abandonan el núcleo. Esta pérdida será notable si el radio de curvatura "R" es menor que 5-10 mm.

Micro curvaturas de la fibra

. Además de las curvaturas continuas en la fibra, el cableado puede causar pequeñas curvaturas que se repiten a lo largo de la fibra.



Micro curvaturas

Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)



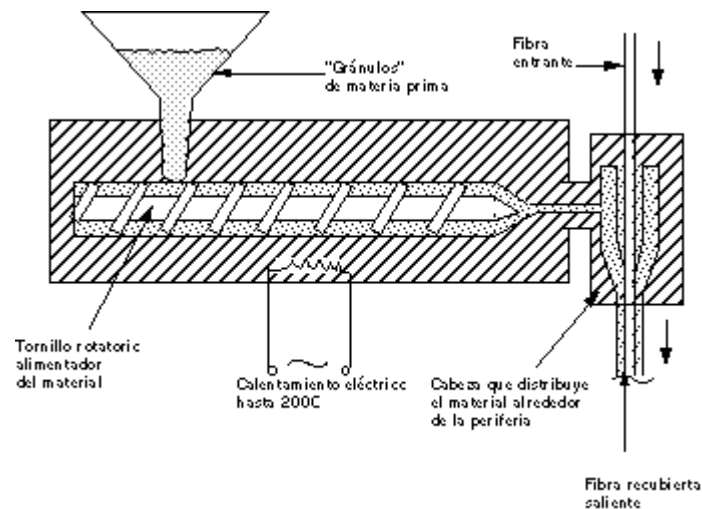
Las microcurvaturas se presentan por ejemplo, con las variaciones de temperatura, cuando la fibra y el recubrimiento tienen diferentes coeficientes de dilatación térmica. Estas microcurvaturas son especialmente desfavorables cuando sus longitudes de onda (geométrica) son menores de 1 mm, para evitar esto, se puede recubrir la fibra con una capa protectora relativamente blanda gracias a la cual los efectos de la rugosidad de las superficies en contacto con la fibra no se transmitan fácilmente a esta. Las microcurvaturas también se presentan como resultado de esfuerzos mecánicos.

Elementos constitutivos de un cable:

- Un cable óptico primero debe proteger la o las fibras que contiene.
- Debe evitar que la fibra sufra fuertes curvaturas, y protegerla de choques y aplastamientos.
- El alargamiento de la fibra debe ser mínimo, por consiguiente, el cable debe tener un elemento de refuerzo mecánico que soporte la tensión ejercida sobre el cable.
- El cableado no debe producir aumento de la atenuación en las fibras causada por las microcurvaturas.
- Las compresiones pueden producirse cuando la fibra y otros elementos constitutivos del cable no tengan los mismos coeficientes de dilatación térmica.
- Es necesario proteger la fibra de las microcurvaturas y, sobre todo, minimizar el acoplamiento mecánico entre la fibra y los elementos del cable.
- Además de los elementos de refuerzo mecánico y de protección contra las microcurvaturas, el cable debe asegurar a la fibra una protección máxima contra la humedad.

El revestimiento secundario. Durante la formación de la fibra, esta se recubre con una capa primaria delgada de plástico. Este importante revestimiento protege a la fibra desde su salida del horno de formación, pero no posee las características mecánicas adecuadas para el cableado, por lo que es necesario un revestimiento secundario. Hay dos tipos **apretado y flojo.**

Revestimiento apretado. Se deposita, por extrusión en caliente, una capa plástica sobre el revestimiento primario. Esta capa debe ser lo suficientemente espesa como para aumentar la resistencia mecánica de la fibra, pero suficientemente delgada como para asegurar una buena flexibilidad. El revestimiento apretado debe hacerse con cuidado, puesto que puede provocar microcurvaturas, si el centrado de la fibra no es uniforme o si el enfriamiento durante la extrusión no es uniforme sobre todo el espesor de la capa. Los materiales usuales son: el nailon, los polipropilenos, polietileno de alta densidad y la arnita.



,Fuente:Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

-Principio de extrucción

Revestimiento flojo. La fibra se mantiene floja en un tubo con diámetro interior mucho mayor que el diámetro exterior de la fibra. Los materiales son los mismos que para el revestimiento apretado. Las paredes internas del tubo deben ser perfectamente lisas para evitar las microcurvaturas.

La elección del revestimiento secundario (apretado o flojo) tiene repercusiones importantes sobre las variaciones de la atenuación de la fibra respecto a la temperatura. Como la fibra y el revestimiento secundario no tienen el mismo coeficiente de dilatación, se producen microcurvaturas cuando la temperatura varía. A muy baja temperatura (< -20°C), parece que el revestimiento secundario apretado es mejor que el revestimiento flojo.

Elementos de refuerzo. Los elementos de refuerzo ayudan principalmente a aumentar la tensión que se puede aplicar al cable, sin que exista el riesgo de romper la o las fibras, sobre todo durante las operaciones de colocación del cable (subterráneo, en ductos o aéreo). Los materiales utilizados son:

- Hilos de acero
- Filamentos plásticos (arnita, el polietileno y el nailon)
- Fibras textiles (fibras de diámetro pequeño de poliéster (Kevlar fabricado por Dupont de Nemours), de poliamidas (nailon), de dacrón o terileno).

El elemento de refuerzo puede ponerse en el centro (sobre todo si se trata de hilos de acero) o en la periferia del cable, donde puede al mismo tiempo servir de protección. Ciertos cables, al colocarse en tramos, no tienen que soportar grandes tensiones y el elemento de refuerzo puede tomar la forma de un tubo (de aluminio) que protege también contra choques o aplastamientos.

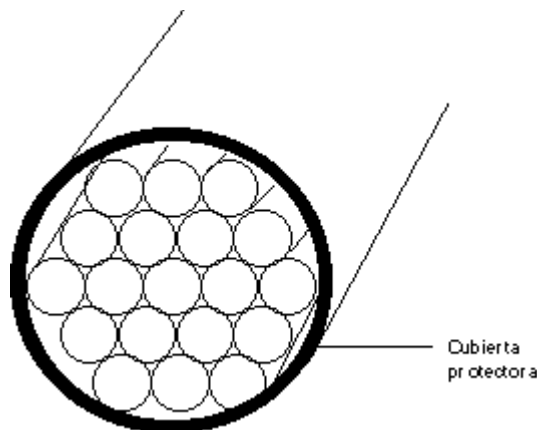
Estructuras y tipos de cables ópticos:

Existen una multitud de tipos y estructuras de cables ópticos, algunos ejemplos y clasificación elemental son:

Conjunto de fibras. Es un cable compuesto por un gran número de fibras yuxtapuestas y enceradas en una cubierta protectora, por lo que es el más simple de los cables. En un haz de fibras, estas se utilizan en paralelo. Hay dos tipos de haces de fibras:

1. El primero se compone de un gran número de fibras (200 a 400) y tiene una gran atenuación (de 400 a 1000 dB/km.) y una gran apertura numérica (de 0.5 a 0.6). La ventaja de un haz como este es el tamaño de la superficie efectiva que facilita el acoplamiento con emisores de gran superficie emisiva. Se utiliza en enlaces muy cortos.
2. El segundo tipo de haz está constituido por 6 a 40 fibras más eficientes, atenuación de aproximadamente 20 dB/km. y con una apertura numérica alrededor de 0.2. Un haz como este, tiene un diámetro exterior de unos cuantos milímetros, lo que facilita el acoplamiento entre el emisor y la fibra.

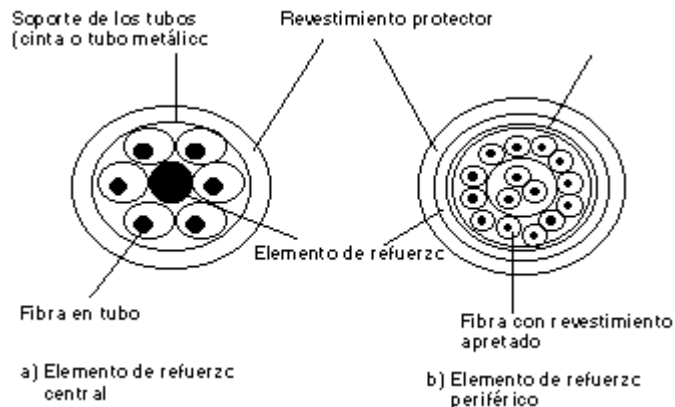
En los haces, las fibras no están protegidas contra las microcurvaturas y contra las altas tensiones; sin embargo, dado el gran número de fibras, la ruptura de una de ellas tiene menos consecuencias. Es necesario tener en cuenta esta pérdida para el acoplamiento entre el emisor y la fibra, ya que no se propaga la luz inyectada fuera de los núcleos de las fibras.



Haz de 19 fibras con cubierta protectora

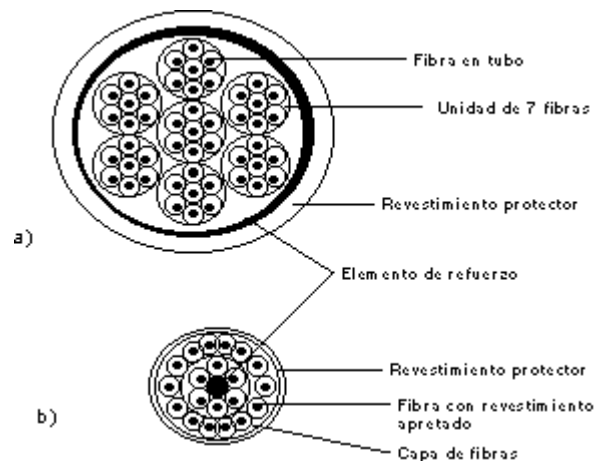
Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Estructuras típicas. Tiene un elemento de refuerzo, central o periférico. Las fibras tienen un revestimiento apretado o flojo (en un tubo), todo ello recubierto por un revestimiento protector.



Cable óptico con estructura típica.

Las fibras con revestimiento apretado o flojo generalmente están cableadas en forma de hélice para que estén repartidas las tensiones en las curvaturas del cable. El número de fibras varía de 1 a más de 20. Para aumentar el número de fibras, se pueden introducir varias unidades en un mismo cable o superponer capas de fibras.

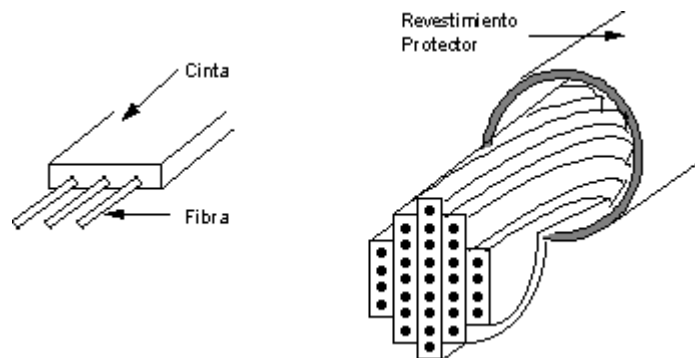


Cables ópticos.

a) Cable con 7 unidades de 7 fibras.

b) Cable con repartición concéntrica de fibras

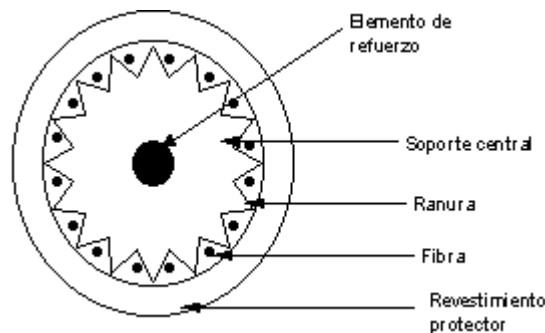
Estructura de cinta. Los laboratorios Bell fueron los primeros que estudiaron este tipo de estructuras en las que las cintas están contra-pegadas sobre 12 fibras, después agrupadas y retorcidas en grupos de 12. Se tienen así 144 fibras en una sola estructura.



Cable con estructura de cinta.

En las estructuras de cinta, las fibras pueden tener revestimiento apretado (fibras contra-pegadas) o revestimiento flojo (fibras colocadas en tubos de aluminio y recubiertas con polietileno). La ventaja primordial de una estructura como esta es el gran número de fibras que se pueden agrupar (144 fibras para un cable de diámetro exterior de 12 mm).

Estructuras cilíndricas ranuradas. Esta estructura, elaborada en Francia por el CNET, permite utilizar fibras provistas solo de su revestimiento primario; después se depositan, libres y sin tensión, en las ranuras helicoidales de un soporte central

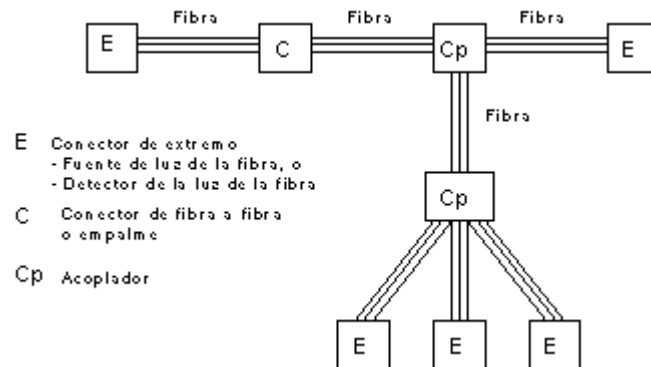


Canal con estructura cilíndrica ranurada

La conexión:

En un enlace por fibra óptica existe siempre, según sea el extremo, una fuente óptica por acoplar con una fibra o una fibra por acoplar con un detector óptico. El acoplamiento o la interconexión tiene por objeto transferir el máximo de energía luminosa de un elemento a otro. El acoplamiento fuente-fibra o fibra-detector se hace por medio de conectores llamados **conectores de extremos**.

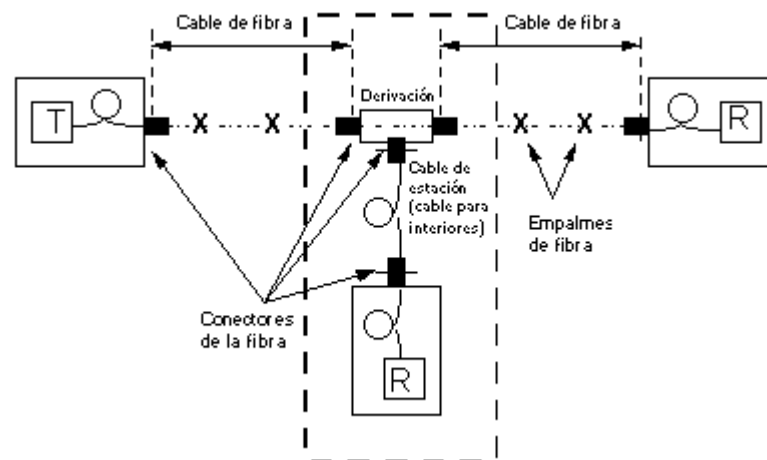
Un enlace puede necesitar también el empalme de dos fibras entre sí, ya sea porque la fibra resulte más corta que la longitud del enlace total por realizar o bien por ejemplo, los parámetros exteriores de instalación imponen una longitud limitada a la fibra; es necesario entonces, poder conectar dos fibras entre sí. Esta conexión tiene que ser desmontable, en cuyo caso se habla de **conectar fibra a fibra** o debe ser permanente y, en tal caso, se habla de **empalme** o de **unión**.



Diversas interconexiones de un sistema de telecomunicación óptica.

Por último, una unión por fibra óptica debe también permitir la transferencia de información entre varios puntos diferentes. Por ello es necesario que se puedan instalar sobre el enlace óptico cajas de derivación o repartidores que permitan distribuir la información contenida en la fibra a muchas otras fibras (o viceversa). Esto se realiza por medio de acopladores.

Empalmes



Conectores, empalmes y derivación en un sistema de cable óptico.

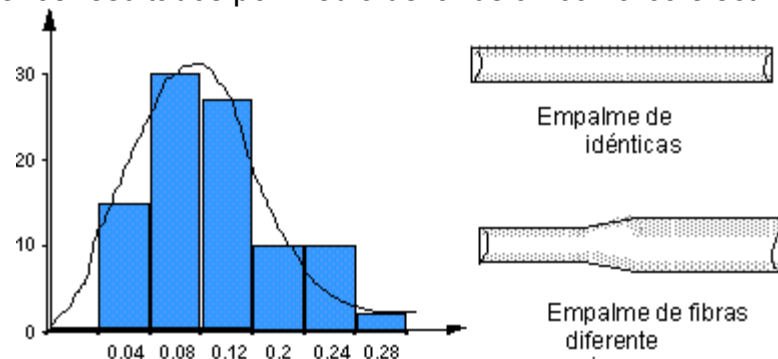
Un empalme es una unión permanente de dos fibras ópticas. Las más importantes exigencias para un empalme son:

- ejecución fácil, rápida y barata
- baja atenuación

Los extremos deben ser cortados planos y luego pulidos. Un empalme exige que las fibras sean correctamente preparadas. Deben estar perfectamente alineadas y conectadas entre sí lo más próximas, bien utilizando un adhesivo líquido igualador de índice, bien físicamente o de alguna manera que se mantenga la integridad de la fibra, incluso cuando el vidrio sea calentado hasta el punto de reblandecimiento como en el caso del empalme por fusión.



Un empalme puede ser realizado usando elementos simples, pero este método toma tiempo. Generalmente el empalme se realiza por soldadura usando aparatos especiales, obteniéndose buenos resultados por medio de la fusión con arco eléctrico.



Comportamiento de empalmes fusionados.

Las dos superficies de la fibra desnudas son acercadas, puestas en íntimo contacto y fusionadas por medio de un arco eléctrico de corta duración. La tensión superficial del vidrio fundido tiende a ajustar el posicionamiento de los extremos de la fibra.

Empalme de fibras ópticas

Los empalmes pueden ser: Por fusión molecular, unión por presión donde un manguito de revestimiento metálico cubre la cubierta y el plástico protector de la fibra, las mantiene unidas, también por la utilización de un pegamento óptico (el adhesivo se cierra con luz ultravioleta). Luego un revestimiento metálico cubre el empalme para dar robustez a la unión.

Acoplamiento de las fuentes emisoras y de los receptores con las fibras ópticas

Empalme entre fibras, procedimiento: se retira el revestimiento protector, las caras a empalmar se cortan perpendiculares al eje, se colocan luego en una máquina especial ligeramente separadas. Un pequeño arco ablanda el extremo de una y lo redondea para asegurarse que el material del núcleo se funda. Entonces se lo coloca en el interior de una máquina a empalmar y con un arco más caliente que el anterior se hace que ambas mitades queden fusionadas entre sí (fusión molecular). Después la fibra es revestida de nuevo y colocada en su cable. La conexión de un receptor a la fibra puede hacerse mecánicamente, o por medio de fusión.

Acoplamientos de fibras ópticas

Las fibras se sujetan a un bloque aislante, otro bloque piezoeléctrico se une a las fibras y se conecta a una fuente de energía, cuando se aplica tensión al elemento piezoeléctrico, se forma un arco a través de los electrodos que calienta las fibras hasta fundirlas, la unión es sólida y robusta.

Conectores

Los conectores son uniones removibles que deben cumplir los siguientes requisitos:

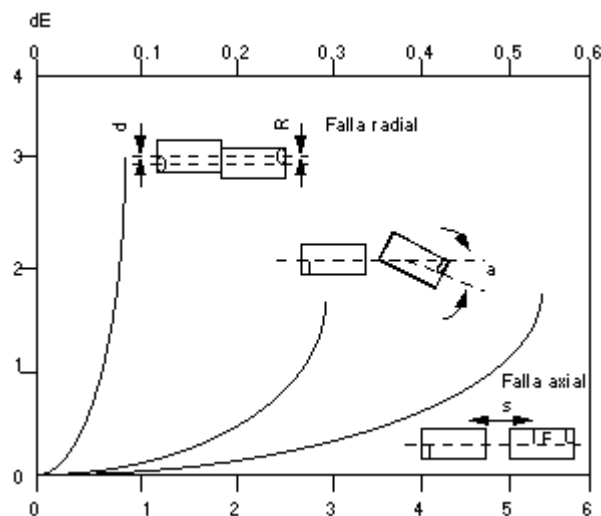
- fácil de ensamblar
- normalizados
- baja atenuación

Suponiendo que las fibras a ser empalmadas o conectadas tienen el mismo:

- NA (apertura numérica)
- diámetro del núcleo
- diámetro del revestimiento

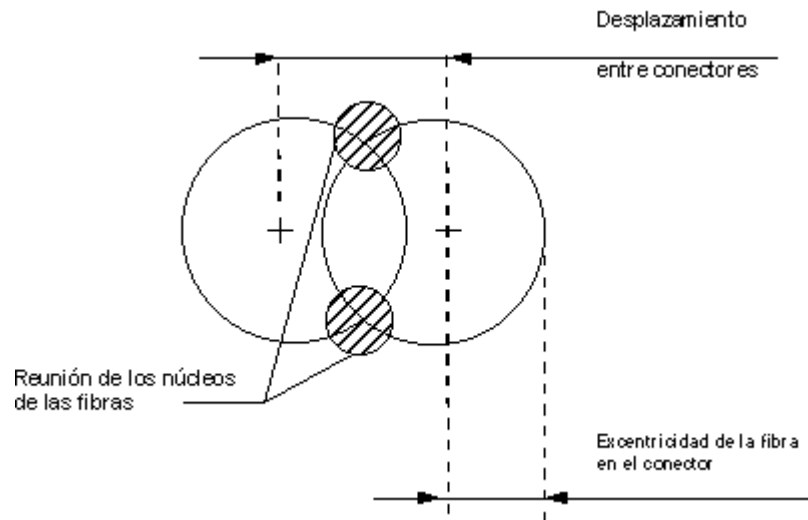
Causan pérdidas permanentes por defectos en la técnica de empalme:

- desplazamiento paralelo de los ejes de las fibras
- error angular entre los ejes de las fibras
- separación entre las superficies de los extremos de las fibras



Pérdidas relacionadas con las técnicas de los empalmes / conectores en una fibra larga.

Una manera de disminuir las pérdidas del conector, especialmente los errores radiales, es usar el así llamado conector de doble excentricidad. Montando las fibras en el conector con una cierta excentricidad y moviendo los ejes del conector lateralmente, si las dimensiones son correctas, existen dos posiciones para las cuales es perfecto el alineamiento de los extremos de la fibra. El ajuste se hace en el campo y tiene la ventaja que las pérdidas por dispersión de potencia puede ser indicadas y minimizadas en ese punto. La atenuación es menor de 0.5 dB.



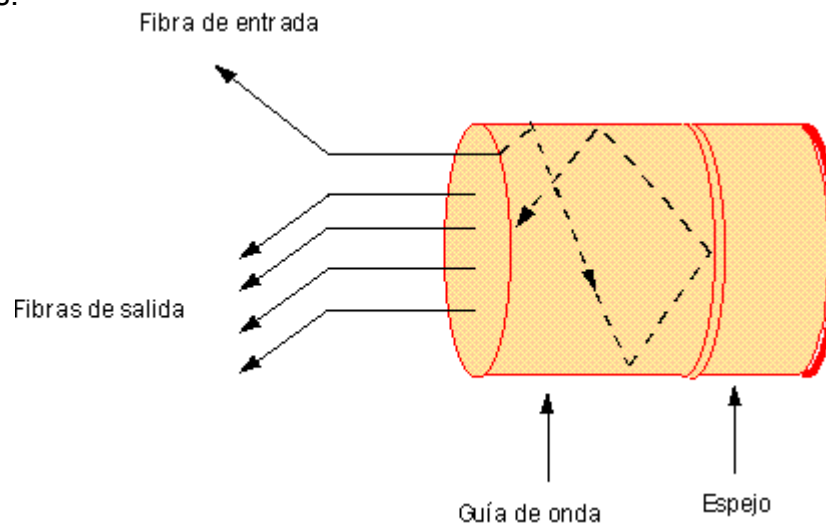
Alineamiento de las fibras en el conector

Dispositivos de derivación

En el conector T la fibra derivada esta en el estrecho contacto con la fibra principal y el acoplamiento se obtiene por fuga. Valores típicos son:

- Atenuación en la transmisión: 2 dB
- Atenuación en la derivación: 10 dB

En el conector estrella la fibra de entrada ilumina un espejo, desde el cual la luz se refleja al deseado numero de fibras. La atenuación de la derivación puede ser de 15-20 dB para 10 derivaciones.



Conector estrella. La luz de la fibra de entrada se distribuye uniformemente en las fibras de salida

La atenuación de derivación es proporcional a la relación que existe entre las superficies de las fibras derivadas y la superficie del conector estrella, y se incrementa en forma logarítmica con el numero de derivaciones.



Una comparación entre conectores T y conectores estrella en redes T y tipo estrella, muestra que los circuitos tipo T tienen ventajas cuando las terminales son pocas ($< 4 - 5$) y los circuitos estrellas cuando son más.

Basta con desalinearse la unión a tope de dos fibras proporcionalmente a la cantidad de potencia que se desea derivar.

Recomendaciones

-Precauciones en el manejo de la fibra.

Es importante seguir las precauciones de manejo para proteger tanto a la instalación, como al que realiza la instalación.

- No estire al máximo el cable.
- No doble más de lo permitido el cable o fibra.

El manejar fibras descubiertas, puede causar accidente particularmente cuando se cortan las fibras en el proceso de empalme.

- Se debe evitar el contacto con la piel, ya que una vez dentro de la piel, la fibra es difícil de remover.
- Pedazos sobrantes de fibra, deben ser almacenados en un contenedor para evitar contacto posterior con la piel o ropa.
- Usar gafas de protección para evitar que pedazos de fibra penetren a los ojos.

Cuidado de los ojos

Es muy importante no apuntar a los ojos propios o de otra persona cuando la fibra esté "viva" (cuando esta contiene luz visible o infrarroja). La densidad de luz emitida en el extremo de una fibra óptica con radiación de Láser, es mayor a la del sol sobre la superficie de la tierra.

Cuando se hagan reparaciones a fibra óptica, asegúrese que ya no exista ninguna señal de luz Láser a través de la misma.

- Utilice continuamente aparatos de medición:
- Tarjetas IR
- Medidores de potencia
- Papel blanco, etc.

Para asegurarse que no existe salida de luz al extremo de la fibra. Apéguese a las precauciones expuestas en las etiquetas de los aparatos que maneje.



Emisores y receptores

Conceptos modernos: La fuente emisora de luz, que puede ser el LED o el diodo laser, debe ser capaz de encenderse y apagarse muy rápidamente, cuanto más de prisa puede hacerse, mayor información será posible transmitir.

Los receptores ópticos deben ser capaces de recibir esos impulsos de luz con exactitud y a partir de ellos generar corriente eléctrica. Hace falta un receptor que tenga una respuesta rápida ante una emisión o no emisión de luz para poder producir impulsos de forma adecuada. Como emisores ópticos para aplicarlos en fibra óptica la varilla de rubí es aparatosa y el láser de gas puede tener una vida corta, además de ser de gran tamaño también por lo tanto son incómodos para utilizar en sistemas de fibra óptica.

Los diodos receptores PIN y los APD (avalancha) poseen la eficiencia de conversión de luz a electricidad necesaria, son de pequeño tamaño y tienen un tiempo de recuperación lo bastante rápido, lo que los hace muy aptos para utilizar el sistemas de comunicaciones por fibra óptica. (Tiempo de almacenamiento aproximadamente nulo) ($t_{\text{storage}} = 0$).

Emisores ópticos

Introducción

Conceptos básicos sobre modelos del átomo

-Energía del electrón

En los textos de física se ha definido que el electrón tiene dos tipos de energía.

La primera, se debe a su movimiento y se denomina energía cinética. La segunda, debido a la distancia que lo separa del núcleo es la energía potencial.

Cuando más larga sea la caída de un electrón que se halla en un nivel energético excitado y pase a un nivel energético inferior. Mayor será la energía potencial mientras esté presente la fuerza de atracción.

Existe también una teoría basada en que los electrones pueden no ser únicamente partículas sino estar presentes como “nubes de energía” y su órbita o su posición no pueden estar bien definidas. Es corriente decir que la “nube” de electrones tiene una “probabilidad” de estar presente en un lugar determinado y un instante de tiempo concreto (modelo atómico de Schrödinger). Lo que esto quiere decir es que realmente, hasta el momento, no se conoce mucho sobre las fuerzas interiores del átomo. Se sabe bastante sobre sus efectos pero como no es posible observar el interior del átomo, al menos con la instrumentación actual, no se tiene idea realmente de que es lo que hay o como funciona. La razón de que no sea posible medir el proceso con precisión es porque el propio proceso de medida destruiría la exactitud de la misma.

-Niveles energéticos del electrón

Los electrones tienen ciertos niveles permitidos de energía dependiendo estos niveles del orbital en que se encuentran.

$$E = \frac{E_o}{n^2}$$

E: energía permitida electrón

E_o : 13,6 electrón-volt

n : Numero cuántico principal, definiéndose a través de ellos los niveles energéticos permitidos del electrón. Cuando $n=1$ el electrón se encuentra en su estado fundamental de acuerdo a la teoría de Bohr.

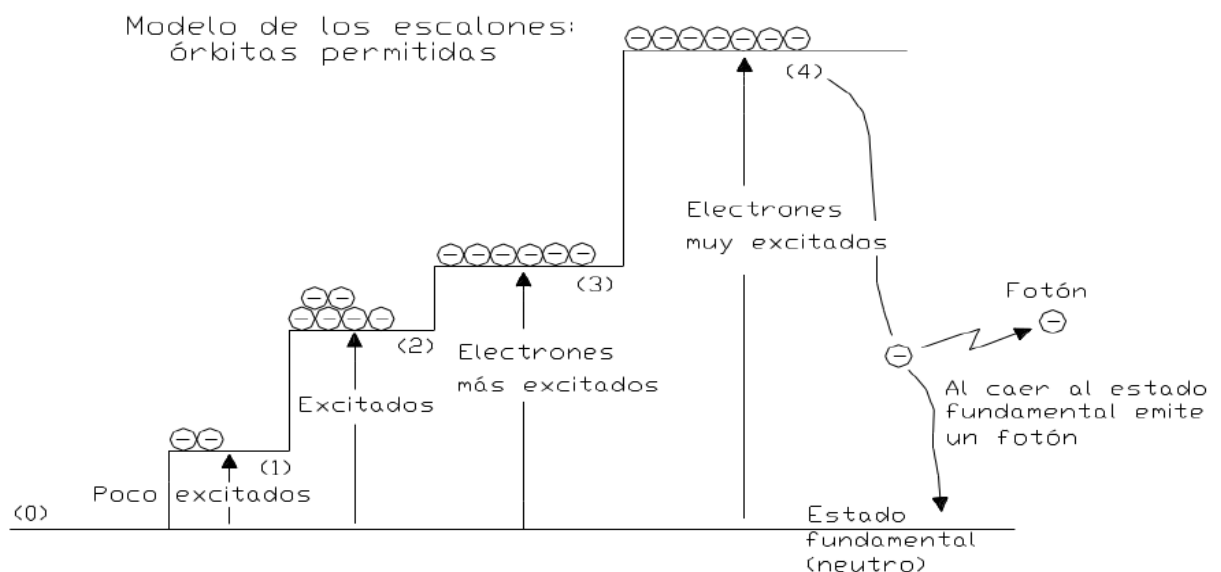
Si añadimos energía extra a los electrones que no se encuentran en su estado normal orbital tienden a “saltar” para regresar a su orbital normal, al hacerlo emiten energía (radiaciones luminosas), el descenso a un nivel normal, se produce simultáneamente para todos los átomos del material.

Cuando n tiende a infinito la energía permitida del electrón tiende a cero, al estar tan alejado del núcleo el electrón casi no existe atracción entre éste y el núcleo.

- Concepto materia-antimateria

Supongamos que el electrón es una nube de energía y aparece un fotón y colisiona con él. Por definición, el protón es una carga positiva y el electrón es una carga negativa. ¿Qué ocurre pues? Parece ser que tenemos una situación de materia-antimateria, pero si esto fuera así debería haber una explosión, una radiación, o algo, y a continuación no quedar nada. Lo que parece suceder, como se evidencia de las pruebas realizadas, es que **el electrón absorbe el fotón, y de esta manera aumenta su propio nivel energético**. Si este nivel de energía aumenta lo suficiente, se trasladará alejándose de su núcleo hacia otra órbita y se considera que se encuentra en un estado excitado. Lo que eso parece significar en realidad es que su nivel de energía aumenta, pero solo durante un corto instante. El electrón no puede retener ese nuevo nivel energético y es necesario que lo devuelva (por medio quizás de una energía de otro tipo) para que pueda retornar a su condición normal y estable. Lo que entrega es un rayo de luz que puede ser considerado como un fotón. Las pruebas han demostrado que el electrón podría entregar un fotón al regresar a su órbita original o varios fotones pasando a través de una serie de órbitas intermedias permitidas, teniendo en cuenta que no puede orbitar en cualquier lugar, sino solo en los niveles definidos por números enteros.

De acuerdo al modelo atómico de Bohr los electrones de un átomo están situados en distintos niveles permitidos de energía, como escalones de una escalera. Estos escalones no son equidistantes como se observa en la figura:





- La teoría cuántica y el concepto fotoeléctrico

Algunas sustancias emiten electrones, llamados fotoelectrones o fotones, la teoría electromagnética no es útil para explicar este efecto, se utiliza la teoría cuántica. La cantidad de emisión de fotones varía con la intensidad de los rayos luminosos, pero la velocidad de emisión de fotones es independiente de la intensidad luminosa.

Según la teoría cuántica la energía luminosa está formada por pequeños paquetes energéticos, llamados cuantos o fotones y poseen distinta energía dependiendo de la frecuencia de la luz.

$E = h \cdot f$ E: energía luminosa h: constante de Planck f: frecuencia de la luz en Hertz

La energía relacionada con los electrones satisface la relación de Einstein:

$$\frac{1}{2} mV^2 = h \cdot f - W = h \cdot f - h \cdot f_0$$

W: energía necesaria para extraer un electrón

$h \cdot f_0$: valor mínimo para que tenga lugar una emisión

$h \cdot f$: energía luminosa

-Efecto fotoeléctrico

Al incidir luz sobre ciertas sustancias, esta devolverá electrones formando una corriente eléctrica.

Millikan en 1923 obtuvo el premio Nobel al descubrir que el efecto fotoeléctrico es un “fenómeno de superficie”, si la superficie estaba contaminada con polvo o grasa el efecto se reducirá o desaparecerá.

Aparecen contradicciones al explicar las radiaciones de onda luminosa por la teoría ondulatoria de Maxwell. Algunas de estas contradicciones son: la teoría ondulatoria dice que la energía cinética de los fotones debería aumentar al incrementarse la intensidad de luz, pero esta es independiente de la intensidad luminosa. Debería aparecer un foto efecto independiente de la frecuencia de luz, pero aparece una frecuencia de corte para este efecto, también según la teoría ondulatoria deberían existir retardos en la emisión de fotones cuando la intensidad de luz es débil, pero no existe retardo alguno sin importar la intensidad luminosa.

Conclusión: debemos utilizar la teoría ondulatoria para analizar la propagación de la luz en la fibra óptica, y la teoría cuántica para analizar los dispositivos que convierten la luz en corriente eléctrica y viceversa.

-Niveles energéticos del fotón

Albert Einstein expresó que la luz podía interactuar con los electrones, de tal manera que la luz fuera considerada como “haces de energía” o cuantos.

En este concepto los rayos de luz se consideran partículas sin masa (los fotones). Su energía es:

$$E_o = h \cdot f + K_{\max}$$

E_o : Energía del fotón

f: frecuencia de vibración (es un número entero positivo)

K_{\max} : Energía cinética máxima que el fotón puede tener fuera de la superficie metálica.



-Excitación de átomos

Pueden ser excitados por luz, energía de radiofrecuencia, corrientes eléctricas, calor, etc; al estar excitados poseen electrones acumulados en las capas exteriores, cuanto mas energía absorben los electrones más se separan del núcleo del átomo. Cuando se encuentran en condición de máxima excitación, el electrón abandona el átomo y este se transforma en un ión (carga positiva). Los átomos ionizados se utilizan para excitar otros átomos, inyectándolos en una cámara llena de un cierto gas por medio de una varilla inyectora. La emisión de iones se puede producir con suministros de potencia de alta tensión produciendo una emisión ionizada (arco eléctrico). Estos átomos altamente excitados se los llama átomos de Rydberg.

Electrón-volt : es la energía adquirida cuando un electrón es acelerado por un potencial de un voltio.

$E = \frac{-13,6 \text{electron - volt}}{n}$ (el signo negativo significa que la fuerza se opone al núcleo).

Para la órbita de Rydberg, n puede estar entre 10 y 100, a medida que n es mayor, la energía emitida cuando el electrón salta a un nivel menor, es menor (de n=100 a n = 90 la energía es mucho menor que de n=2 a n=1).

En el estado de Rydberg el átomo se encuentra muy cerca del estado ionizado.

Cuando un átomo puede absorber energía luminosa

Cuando se cumple la siguiente igualdad $E = h \cdot f = (h \cdot f_e - h \cdot f_o)$

f: frecuencia de la luz h.f_o: energía del electrón en estado normal

h.f_e: energía del electrón en el estado excitado E: energía del electrón

Definición del láser

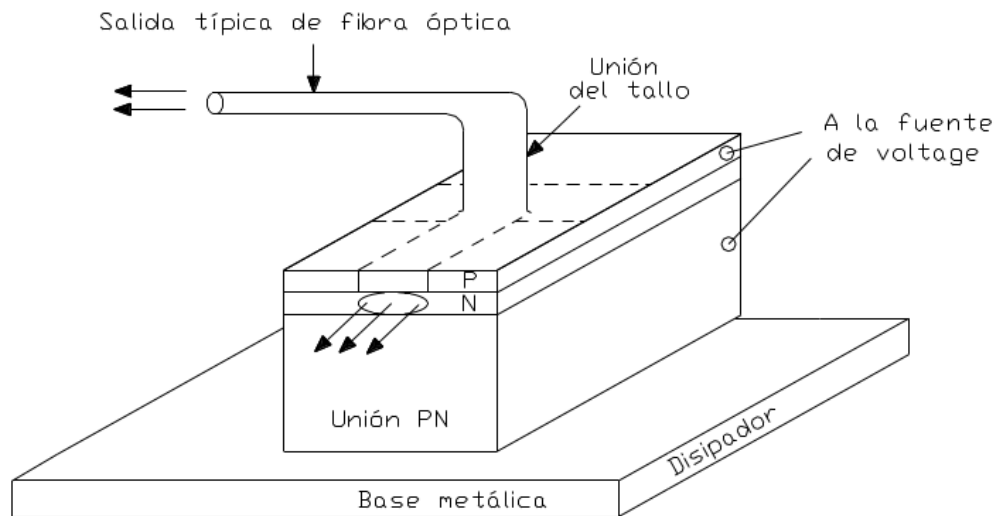
Dispositivo que produce radiación óptica basada en una inversión de población para proporcionar luz amplificada por emisión de radiación estimulada. La radiación laser puede ser coherente espacialmente, temporalmente o ambas.

Es también muy importante el concepto del “umbral del laser”, que es el nivel de emisión que tiene lugar debido a emisión estimulada y no a emisión espontánea.

Laseres de Arseniuro de Galio (ArGa)

Es un diodo de estado sólido el cual emite luz infrarroja cuando se le hace pasar una corriente eléctrica a través de su unión. Este láser de inyección se utiliza en comunicaciones por fibra óptica, ya que son pequeños, livianos, compactos y requieren poca energía eléctrica, además sus salidas son muy enfocadas.

El diodo láser de franja de borde está formado por AlArGa y su funcionamiento se basa en reflexiones internas a lo largo de la franja que provoca un incremento en la población de fotones a un nivel donde tiene lugar la emisión.



Esquema de una fuente de luz de láser de franja

Fuente: Sistemas de comunicación (A. Bruce Carlson).

En el diodo láser de franja, se excita inicialmente un fotón moviéndose por la franja de metal, por colisión e interacción con otros elementos atómicos excita otros fotones. Dado que los extremos de la franja son óptimamente planos se producen reflexiones y se considera que la franja actúa como una cavidad resonante. Si las oscilaciones son estimuladas de forma adecuada, de acuerdo con la frecuencia y nivel energéticos, tendrá lugar el efecto láser, emitiéndose luz coherente. Hay que señalar que las dos franjas utilizadas en la unión PN deben ser cuidadosamente preparadas de manera que sean perfectamente planas, paralelas y reflectantes, y formen así “ espejos” donde los fotones se reflejen después de haber sido inicialmente excitados por algún electrón libre. Uno de los problemas con este tipo de diodo láser ha sido la pequeña cantidad de potencia que de él se obtiene. Últimamente se ha desarrollado un láser de “diez franjas” o láser semiconductor de franjas que es capaz de emitir hasta 410 mW de potencia óptica. Esto significa unas siete veces mas que la que se obtenía del láser de una franja.

El láser de color

Las moléculas son ciertas clases de tintes que normalmente tienen tendencia a absorber los fotones de luz fácilmente y ascender por tanto a estados de excitación más elevados. Cuando una longitud de onda dada se hace pasar repetidamente a través del láser de color por medio del bombeo producido por otro tipo de láser, por ejemplo, un láser de nitrógeno (que emite radiaciones ultravioletas), el rayo del láser de color gana en potencia y es enormemente amplificado.



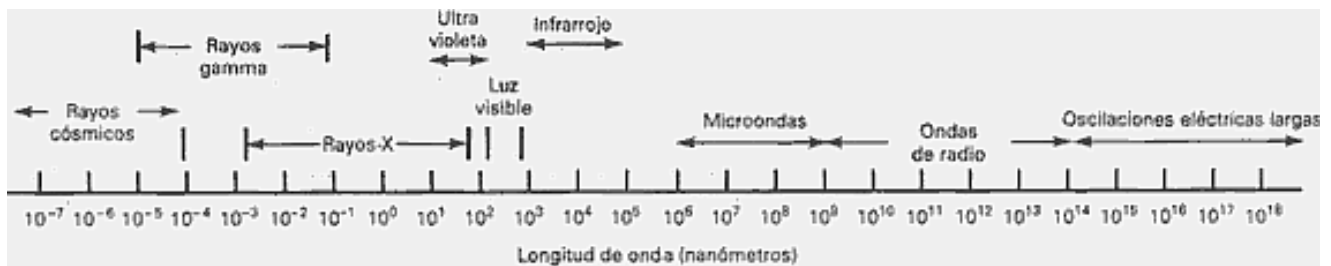
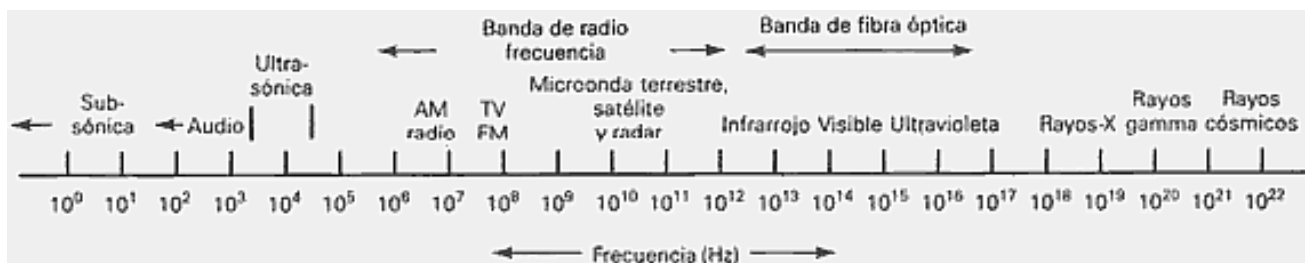
Para llevarlo a cabo, se utiliza normalmente una red de difracción que selecciona la frecuencia deseada y también una placa de vidrio reflectante en el otro extremo del dispositivo, haciendo que el rayo pase repetidas veces a través del tinte.

Espectroscopia

Es un método para separar las diferentes longitudes de onda de luz al atravesar un medio determinado.

Existe la espectroscopia Doppler, de polarización, fotónica, etc.

Espectro electromagnético:



Meson Pi: Partícula descubierta en 1947, posee una masa 275 veces la del electrón. Interactúa con el protón y el neutrón en el núcleo del átomo.

Gluón: Se trata de un supuesto portador de una fuerza de atracción básica en un átomo. Se denomina fuerza del color. Es de utilidad en las teorías e hipótesis atómicas y se considera como un tipo de partícula sin masa.

Quarks: Son supuestamente los elementos básicos de los protones, neutrones, neutrinos, mesones, etc. Se dice que tiene la propiedad de absorber carga y de que cualquiera de estas partículas es capaz de emitir o atraer un Gluón. Según la teoría, los quarks se mantienen juntos gracias a los Gluones.

Anti-quarks: Partículas que tienen características opuestas al concepto normal de quarks

Fotón: Según Yukawa se trata de un componente del átomo con una masa en reposo nula. Lleva energía luminosa. Einstein supuso que la energía en un haz de luz viaja a través del espacio en paquetes concentrados llamados fotones, cuya energía es:

$$E = h \cdot f$$

f: frecuencia de corte de los electrones emitidos en un efecto fotoeléctrico.

Esta frecuencia es distinta para cada superficie emisora.

Un fotón no puede emitir o absorber otro fotón.

Fermión: Las partículas que poseen un spin (momento angular) de la mitad de un número entero se denominan fermiones. Son los: Los electrones, protones, neutrones y quarks. Todos los electrones tienen un spin característico.

Ejemplo: Momento del spin del electrón: 0.52723×10^{-34} julios.seg

Momento angular de la luz

Si los fotones de luz llevan alguna energía del momento angular al abandonar el átomo, el momento angular restante del átomo se reduce en la cantidad que el fotón se llevó.

Si un haz de luz polarizado circularmente es completamente absorbido por el objeto sobre el que incide, se transferirá a este objeto un momento angular:

$$L = \frac{U}{W} \quad (\text{Momento angular que se transfiere a un objeto, cuando la luz polarizada circularmente es completamente absorbida por el objeto})$$

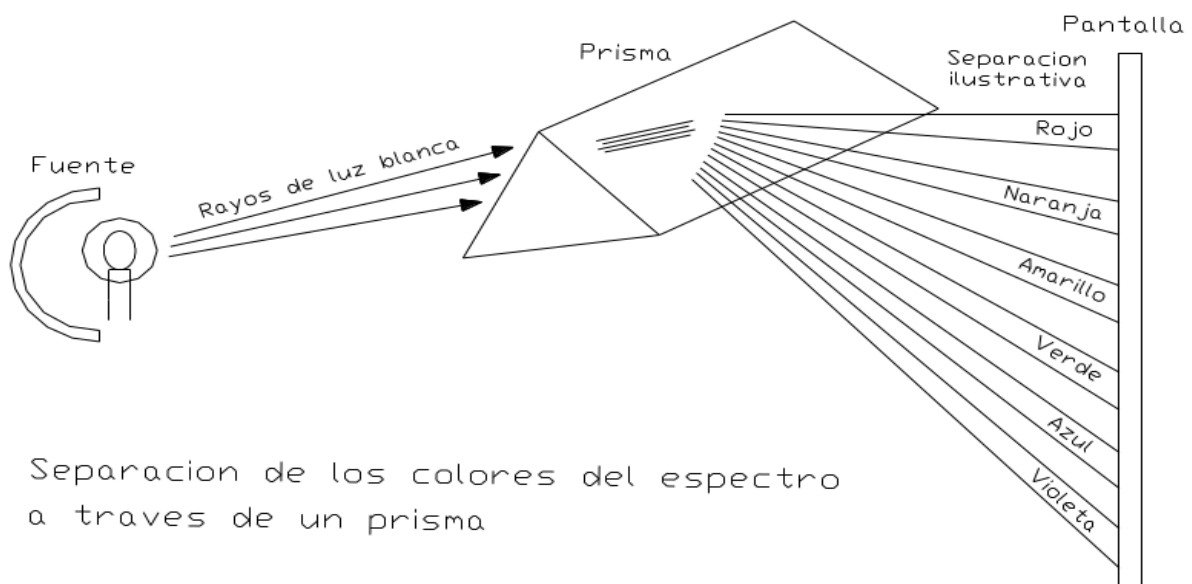
U: Momento

W: Frecuencia angular de los rayos de luz

Cuanto menor sea W, para U cte, mayor será la transferencia de energía del momento angular.

Separación de colores

Si hay dispersión en la fibra óptica, aparecen separadas varias frecuencias y unas sufren más retardo o rebotan más veces que las otras.



Separacion de los colores del espectro a traves de un prisma

Fuente: Sistemas de comunicación (A. Bruce Carlson).

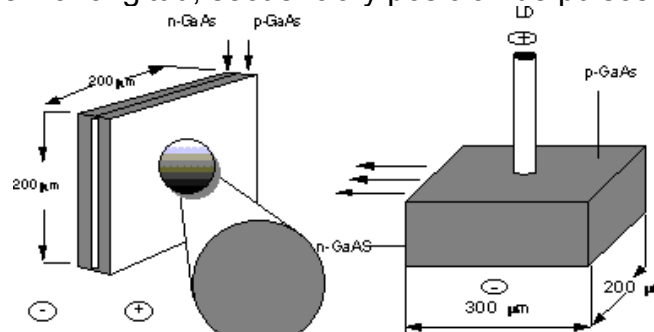
Excitación del láser

A través de la colisión de los electrones la energía puede ser transmitida de un átomo a otro. Si tenemos electrones chocando unos contra otros, durante el proceso se comunica y se pierde energía. De esta forma llegamos a una base para los láseres de gas que utilizan los impactos entre dos gases. Antes de que sea posible una transferencia de energía, existen ciertas condiciones que deben cumplirse, como son la que los electrones estén presentes en ciertos niveles de energía alrededor del núcleo, de manera que una colisión haga que algunos de ellos pasen a un nivel energético superior y otros lo hagan a un nivel inferior al perder energía, sin que ninguno de los niveles sea el estado fundamental.

Puede utilizarse energía de radio-frecuencia para excitar estos átomos gaseosos a través de un tubo de descarga de radio-frecuencia. Esto produce una ionización liberando electrones que se moverán libremente por los alrededores y causarán colisiones. De igual manera, es fácil suponer que el uso de corrientes eléctricas pasando a través de un gas liberarían electrones y provocaría también colisiones. Una vez que se ha iniciado la acción láser, es posible usar el propio haz láser reflejándose a uno y otro lado en el gas o sustancia para producir un rayo láser. Esta realimentación positiva se emplea con éxito y es además obligatoria en algunos tipos de estructuras láser.

Proceso de amplificación de la luz láser

Una molécula en el nivel de energía 2 al volver al estado de energía 1 emite un cuanto de energía, que dispara otros átomos en la misma situación de emitir energía; así finalmente la salida de energía es millones de veces mayor que la que se necesitó para que la primera molécula (o átomo) pasara del estado 2 al 1. El emisor convierte variaciones de señales eléctricas en variaciones de potencia luminosa. Las variaciones en la intensidad luminosa se obtienen por modulación analógica y por la modulación digital, la cual es más común, por variación en la longitud, secuencia y posición de pulsos de luz.



Emisores Ópticos

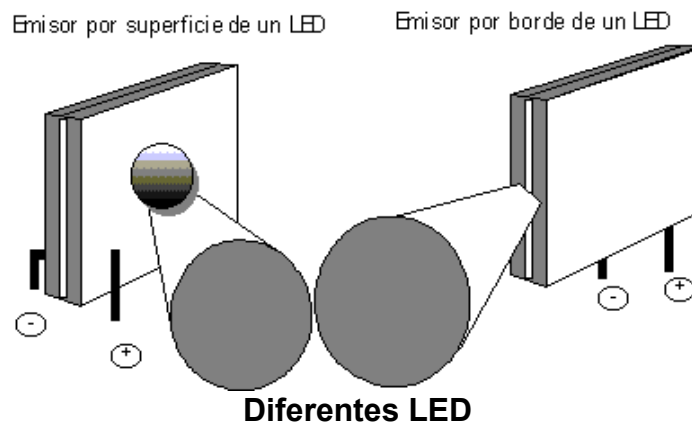
Muchas de las propiedades del láser no pueden aun ser explotadas, por ejemplo, el pequeño ancho de banda y la coherencia de la luz del mismo. En la actualidad los láser son usualmente fabricados a partir de materiales semiconductores (Diodo láser, LD). Además de los láseres, también se usan los diodos emisores de luz, LED. Ellos fueron desarrollados en la década de los 70's y son sencillos y baratos. Lamentablemente emiten una luz de gran ancho de banda y como irradian en forma esférica, solamente una pequeña parte de la potencia puede ser introducida en la fibra.

Los diodos laser (LD) y los diodos emisores de luz (LED) se usan como convertidores electro-ópticos. Estos dos osciladores de alta frecuencia (aprox. 10^6 GHz) deben ser vistos como generadores de ruido, los cuales durante la modulación, son encendidos y apagados a una alta velocidad, considerando su gran ancho de banda espectral. El laser tiene un ancho de banda de aprox. 1000 GHz ($\Delta\lambda \approx 2nm$), el diodo emisor de luz aprox. 10000 GHz ($\Delta\lambda \approx 20nm$).

Se puede usar sobre una fibra una comunicación bidireccional, si se puede reducir el ancho espectral del transmisor (y la selectividad del receptor). Existe la posibilidad del multiplexado por división de longitud de onda (WDM), el cual será el correspondiente óptico del multiplexado por división de frecuencia (FDM).

El diodo laser, LD

El funcionamiento de este diodo se basa en la realimentación positiva que se obtiene debido a que parte de la radiación es reflejada en el laser y se obtiene una “emisión estimulada” (**laser: amplificación de luz por emisión estimulada de radiación**). Mientras la emisión es espontánea la potencia de salida es baja, el ancho espectral y el cono de radiación, grandes. Cuando se alcanza el valor de umbral, se produce la emisión estimulada (lasing), en consecuencia sube la potencia de salida, el ancho espectral disminuye y el cono de radiación se vuelve más estrecho.



La energía de una lámpara de luz es incoherente, las ondas son emitidas por el filamento en forma esférica o aleatoria.

Los LASER emiten rayos de luz coherentes, esto significa que los frentes de onda son todos paralelos.

Tiempos de vida de los láseres de inyección y de los LEDs

Los LASER comúnmente están compuestos por: neodimio y trío, dopado-aluminio-granate ($N_d:YAG$).

Los LED están compuestos por: fosforo-arseniuro, indio-galio (operan entre 800 y 1500 nm).

Los LED tienen un tiempo de respuesta más lento que los LASER su período de vida es de aproximadamente 10^7 Hs.

Los LASER tienen un período de vida aproximadamente de 10^5 Hs, les afectan los cambios de temperatura

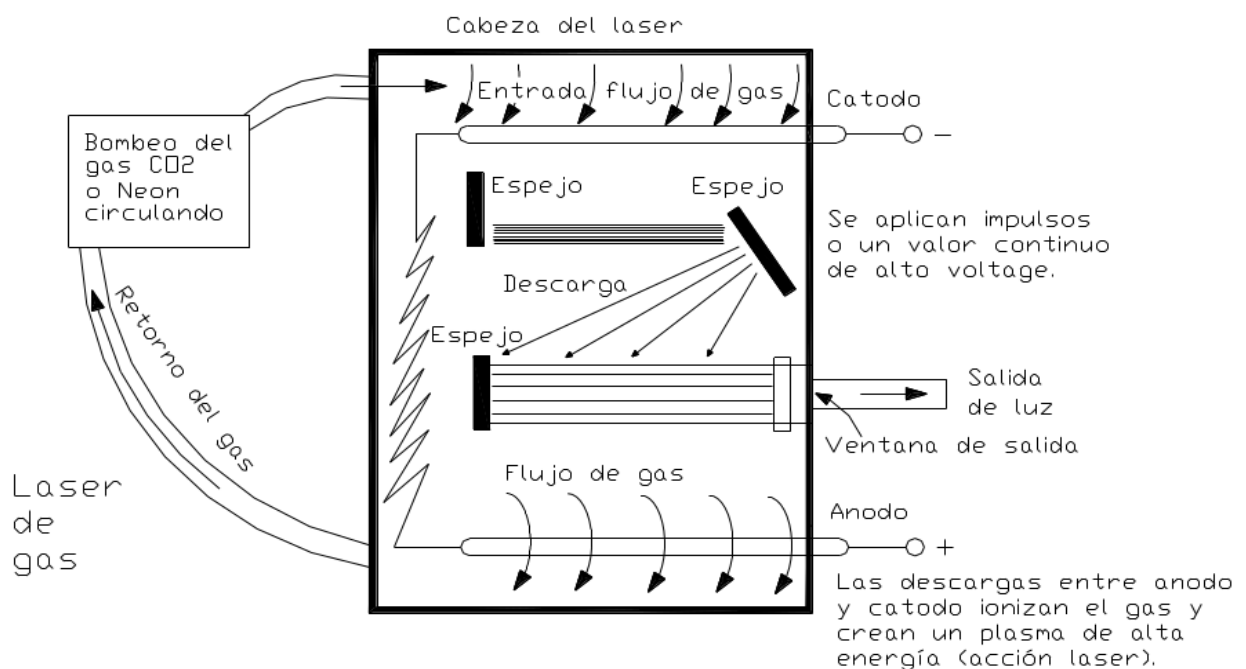
Algunos tipos básicos de laser

El láser de gas se desarrolló en 1968. Los nuevos lasers de gas trabajan a presión atmosférica (anteriormente trabajaban en vacío). Lumonix desarrolló el laser de CO₂ denominado láser TEA (atmosférico excitado transversalmente).

Como construir un láser de gas, como funciona

El láser de gas consiste en hacer circular cierto tipo de gas a través de una cavidad herméticamente cerrada. El gas pasa sobre el ánodo y el cátodo a los cuales se le aplican impulsos de alto voltaje. El campo electrostático y la chispa hacen que los átomos del gas se exciten y haciendan a un nivel orbital superior. Como el gas se mueve en la cámara la excitación de los átomos disminuye a medida que se separan de los electrodos. Cuando los átomos caen a su estado fundamental emiten fotones. Este haz viaja de un lado a otro (dentro de la cavidad) entre espejos hasta que alcanza un nivel "útil" y entonces atraviesa una "ventana" en la cámara, para a continuación ser enfocado por medio de lentes apropiados.

Algunos láseres que utilizan gas son: láser de haluro desarrollado en 1978, clorhídrico de minixenón (un tipo de láser de nitrógeno), el láser marcador de silicio (utilizado para marcar obleas de silicio semiconductoras).



Fuente: Sistemas de comunicación (A. Bruce Carlson).

El pirodetector

Se trata de un detector de banda ancha diseñado para medir impulsos de energía. El elemento detector está construido a partir de un material con un punto de Curie alto y protegido por un estuche reforzado. El detector entrega un impulso de tensión cuya amplitud es proporcional al número de julios que inciden sobre la superficie. La salida es independiente del ancho del haz o de la duración del impulso.

Funcionamiento del láser TEA-820

Se basa en un par de electrodos. Va encapsulado en un recipiente de fibra de vidrio de 25cm, el gas circula transversalmente a los electrodos, un condensador cargado suministra la energía eléctrica al descargarse periódicamente, a través de la distancia interelectrónica, sobre el gas.

El láser excímero es muy parecido al TEA excepto que emite luz en la región ultravioleta en lugar de la infrarroja.

En el láser de tipo gas raro, se mezclan gas alógeno y Helio. Las cavidades láser se bombean con el fin de vaciar los gases de descarga.

Láminas de onda de un láser

Cuando un haz polarizado en un plano incide sobre una lámina birrefringente, cuyos ejes ópticos están situados en el plano de la lámina, el haz se descompone en dos componentes que se propagan a través de la lámina con diferentes velocidades y se recombinan en la salida, donde poseen una polarización nueva y diferente.

La diferencia de camino óptico de cada componente del haz es:

$$d = \Delta n \cdot e \quad \Delta n: \text{birrefringencia del material.}$$

e: Grosos del material.

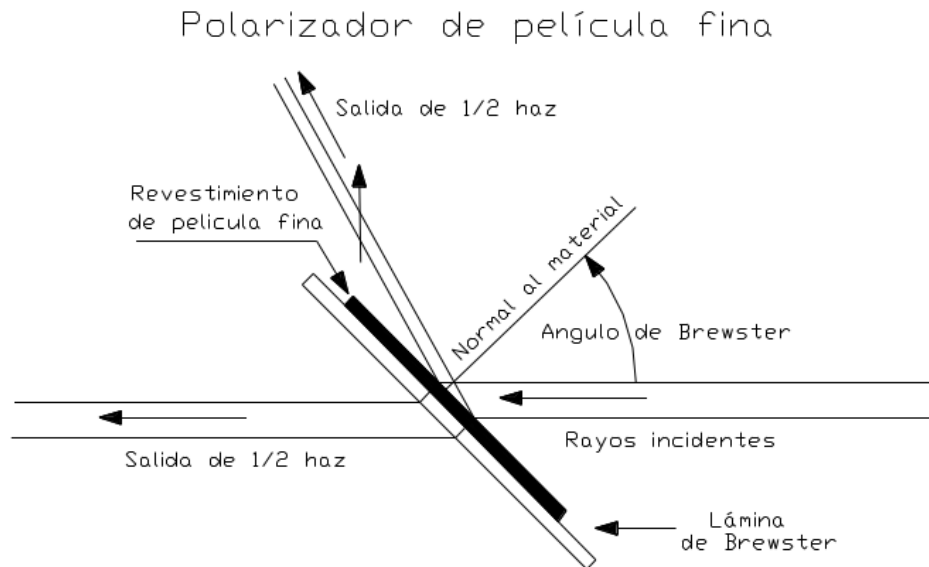
Si $d = \frac{\lambda}{4}$ y el eje óptico forma un ángulo de 45° con la polarización incidente, la polarización del rayo de salida es circular. Cuando $d = \frac{\lambda}{2}$ la polarización de salida es lineal.

Si se introduce un retardo en un rayo de luz su fase o polarización cambia.

El elemento que produce fases variables se denomina compensador, este consiste de dos cuñas de CdS (sulfuro de cadmio) con los ángulos de dichas cuñas en direcciones opuestas, una de las cuñas se ajusta por medio de un micrómetro, al mover esta cuña actúa como una pieza de grosor variable cuya birrefringencia es compensada por una lámina delgada, el efecto neto es producir un retardo variable ajustable con el micrómetro.

División de haz y mecanismos de telemetría láser

La separación de diversas polarizaciones de las mismas longitudes de onda de un haz láser se logra por medio de una ventana Brewster, una mitad del haz incidente sale rebotada de la superficie reflectante con un cambio de polarización, la otra mitad pasa a través del material con la misma polarización.



Fuente: Sistemas de comunicación (A. Bruce Carlson).

Polarización

Definición: En cualquier onda transversal la vibración (el avance de la onda) es perpendicular a la dirección de propagación de la onda (indicado por \vec{P} , vector de Poynting) y por consiguiente puede resolverse en componentes rectangulares contenidos en el plano perpendicular a la dirección de propagación.

Se dice que la polarización es la dirección de propagación del vector campo eléctrico E , de una onda electromagnética.

La polarización de la onda descrita por la dirección del vector E es alterable, puede ser paralela, circular o perpendicular a la dirección del rayo de luz .

Luz polarizada linealmente: El vector \hat{E} vibra en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Luz polarizada circularmente: La dirección de vibración de la onda gira alrededor de la dirección de propagación en forma de sacacorchos.

Luz no polarizada: Los rayos de luz tienen cambios en la polarización de una manera impredecible o aleatoria.

Luz polarizada elípticamente: Puede considerarse como la combinación de la polarización lineal y la circular.

Dentro de una guía de ondas hueca o una fibra óptica, en general, las ondas electromagnéticas no son transversales, es decir la dirección del vector \hat{P} no es perpendicular a la de \hat{E} y \hat{H} .

El vector de Poynting

$\hat{P} = \hat{E} \times \hat{H}$ La dirección del vector \hat{P} es perpendicular a la de \hat{E} y \hat{H} , en el vacío o en un medio ilimitado.

como: $E \perp H \Rightarrow \hat{P} = |\hat{E}| |\hat{H}|$

Métodos para polarizar la luz

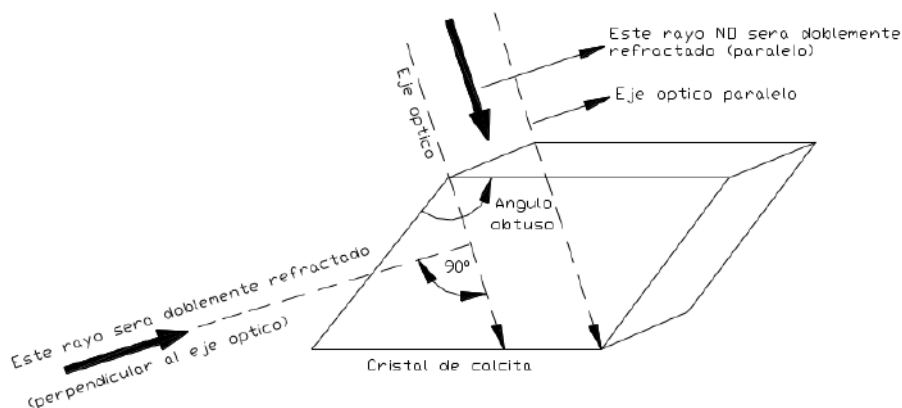
La luz puede ser polarizada por reflexión al incidir bajo un ángulo distinto del normal desde una interfaz de dos materiales dieléctricos de diferentes n tales como aire y vidrio. Si el ángulo de incidencia es igual al ángulo de Brewster, la componente reflejada queda polarizada perpendicularmente al plano de incidencia.

Polarización por dicroísmo

Se consigue por la orientación de una larga cadena de moléculas en una dirección de forma que la luz que está vibrando paralela a ellas pasará a través del material, mientras que la luz que vibra perpendicular a la dirección de la cadena es absorbida y no pasa a través del material.

Si un haz incide perpendicular al eje óptico de un cristal de Calcita se forma una refracción doble (birrefringencia), si incide paralelo al eje óptico no hay polarización.

El haz que incide perpendicular al eje óptico al atravesar el cristal de calcita aparecen dos rayos, uno polarizado paralelo a la dirección de transmisión (rayo ordinario) y otro polarizado perpendicular al haz (rayo extraordinario).

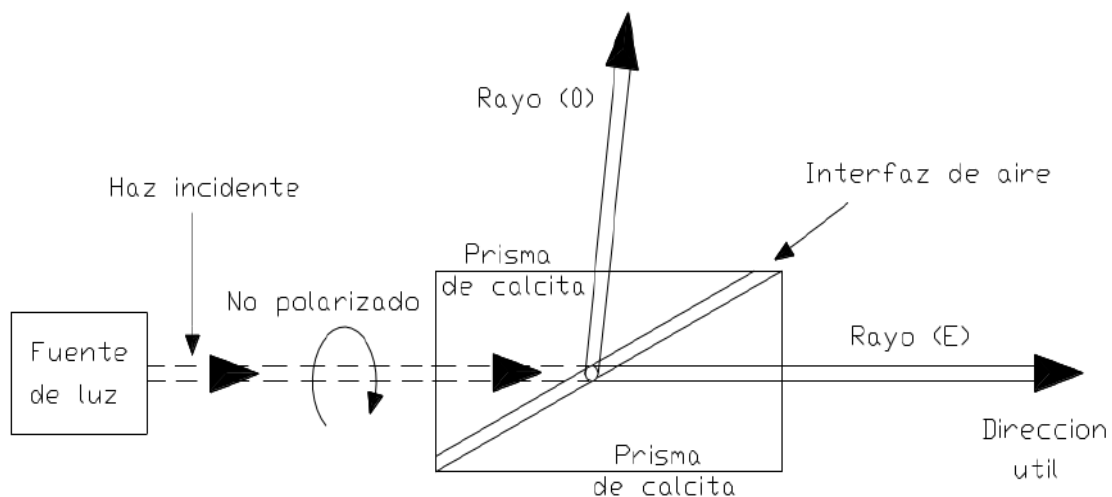


Fuente: Sistemas de comunicación (A. Bruce Carlson).

El rayo ordinario se refractará de acuerdo a la ley de Snell. El extraordinario cambiará ligeramente su dirección debido al efecto de n diferentes, ambos rayos salen de forma paralela a la dirección del incidente. Si se coloca un cristal de calcita sobre una página de un libro y se intenta leer a través de él, las letras aparecerán duplicadas, este es el fenómeno de la refracción doble. Otros cristales de refracción doble son: hielo, cuarzo, siderita, dolomita, etc.

A una cierta frecuencia del rayo incidente aparece un efecto con un haz que puede no aparecer a otra frecuencia.

Prisma de polarización



Nota: Esto también es una división de haz

Si se enfoca luz sin polarizar sobre un prisma de polarización, de tal forma que el rayo penetre en el prisma perpendicular al eje óptico, el rayo E (extraordinario) atravesará el primer prisma, pasará por el espacio interprisma y finalmente pasará a través del segundo prisma corrector emergiendo de él sin cambio esencial. El rayo O (ordinario) "despegará" desde la interfase prisma-aire formando un cierto ángulo, lo bastante grande como para hacer que este rayo se pierda. De esta forma, se ha conseguido separar ambas componentes de la luz y nos encontramos con que únicamente el haz polarizado E ha atravesado el dispositivo. Estos prismas están hechos generalmente de calcita.

El ángulo de aceptación para el haz incidente es para algunos de estos prismas de 9°. Si el ángulo es demasiado chico el haz será reflejado. Si es demasiado grande parte del rayo ordinario viajará hacia la salida deseada, ensuciando el rayo extraordinario polarizado linealmente.

Un laser emite haces de polarización lineal. Para convertir éste a una polarización circular, útil, por ejemplo, en telemetría, pueden utilizarse láminas de retardo, que no son más que cristales a través de los cuales pasa el haz.

Filtros para la luz láser

El filtro opera atenuando el rayo de luz o por absorción. La luz que no se transmite a través del filtro es parcialmente absorbida y parcialmente reflejada.

Los filtros de densidad neutral no eliminan ninguna frecuencia de la luz incidente, se busca que la respuesta sea uniforme en una extensa banda.

Filtros de banda estrecha: Estos filtros pueden compararse con los utilizados en los receptores de radio. Dejan pasar una banda de frecuencias luminosa muy estrecha y

atenúan todas las demás. La base de este tipo de filtro es una serie de capas de película delgada, parcialmente reflectante, dispuestas en forma de un único interferómetro múltiple Fabry-Perot. Este interferómetro provoca en su interior la destrucción de los rayos de luz indeseables.

La base de este filtro es una serie de capas de película delgada parcialmente reflectante, dispuestas en forma de un único interferómetro Fabry-Perot.

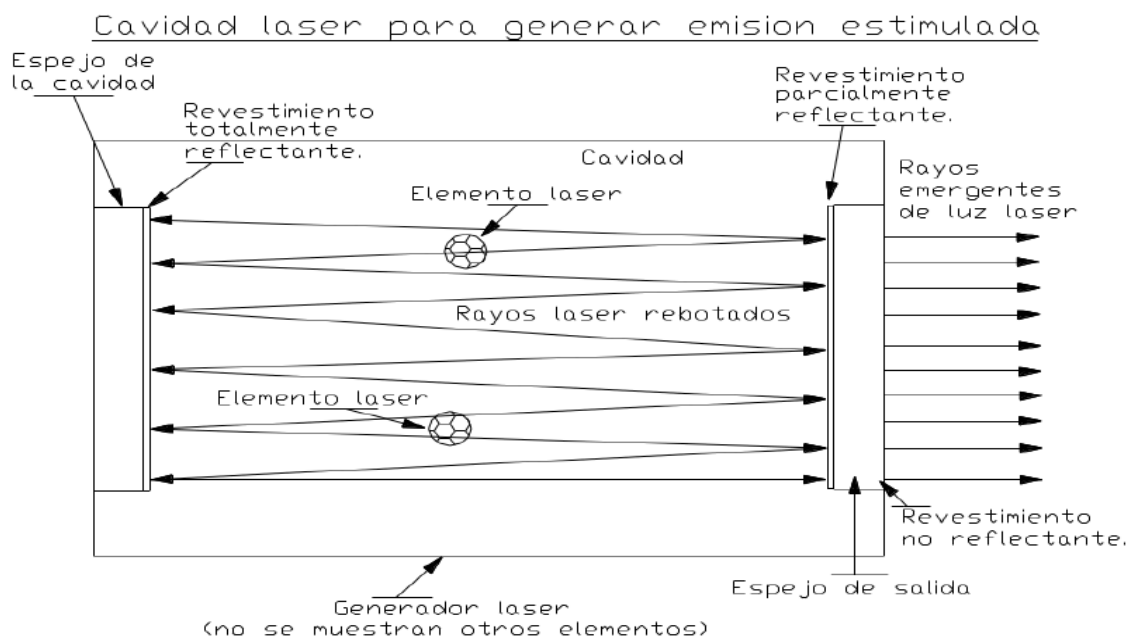
Filtro de interferencia Etalón: Cuando un interferómetro Fabry-Perot se coloca en el interior de una cavidad sintonizada a una frecuencia determinada, (de forma que se produce un haz a una frecuencia determinada), el interferómetro se llama Etalón.

Cavidades laser

La cavidad es un circuito sintonizador que resuena a una única frecuencia, siendo la banda relativamente estrecha, lo que favorece la creación y transmisión de una frecuencia láser específica de luz monocromática y monopolarizada. Algunos espejos se diseñan para que absorban ciertas longitudes de onda y dejen pasar otras, actuando así como filtros.

Los espejos de los extremos de la cavidad láser y los de un interferómetro están formados por un sustrato de vidrio o sílice pulido revestidos con películas reflectantes apropiadas. El rayo láser rebota atrás y adelante en el interior de la cavidad hasta que alcance una cantidad de energía suficiente para salir de ella.

Un láser de alta potencia es aquel que genera 10 o más watts de energía de salida.



Energía de los rayos de luz

Los láseres necesitan realimentación y ajuste automático de energía eléctrica para mantener una potencia y una frecuencia de salida relativamente constante.

La energía que transportan los rayos de luz se describe por medio de:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad \text{Vector de Poynting}$$



Los rayos de luz presentan también un efecto de momento (presión):

$$\frac{E}{C} = m \equiv p \quad E: \text{energía luminosa} \quad C: \text{velocidad de la luz} \quad P: \text{presión}$$

$$\frac{2E}{C} \leq m \leq \frac{E}{C} \quad \frac{2E}{C}: \text{Energía totalmente reflejada}$$

Aplicaciones de los láseres y comunicaciones láser

Al incidir el rayo láser sobre un objeto, este absorbe parte de la energía (de acuerdo a cuan reflejante es el objeto), el daño es debido a la gran cantidad de calor que se genera en el punto de impacto.

Empleo del láser en fabricación

Los laser son prácticamente monocromáticos y tienen coherencia espacial y temporal. Esto significa simplemente que un haz láser mantiene su polarización y sus propiedades de fase a medida que se aleja de la fuente generadora.

La energía de un haz láser puede ser enfocada a través de un sistema de lentes, puede servir para labrar, cortar, marcar o fundir un material, el daño depende de la densidad de potencia en el punto de enfoque y durante cuanto tiempo se aplica.

Equipamiento láser para fabricación

Se utilizan para el soldado de partes electrónicas y para practicar orificios de solo 0,2 mm de diámetro.

Los láseres de baja potencia (de estado sólido) son capaces de cortar metal, tejido y plástico.

El laser de rubí o de Granate trabajan con destellos de luz pulsada con la que calientan la superficie de trabajo.

Los laser de Granate-aluminio-itrio-neodimio dopado son capaces de generar tanto un haz de onda continua como uno pulsado.

Los laser de gas como los de Argon o CO₂ son capaces de trabajar en forma continua pues poseen sistemas de refrigeración.

El rayo láser entrega gran cantidad de energía altamente concentrada en un corto espacio de tiempo sobre un área muy pequeña. Esto hace que el resto de la pieza absorba menos calor y sea menos dañada alrededor del área de trabajo. Al no estar sujeto el material a aplicaciones de calor de larga duración se evitan roturas o distorsiones del metal. El material procedente del corte o de un agujero debido a la alta concentración de energía puede ser vaporizados, evitando tener que eliminar restos de dicho material.

A veces se combina un rayo laser con una fuente de oxígeno y el resultado es la fusión del material, lo que provoca un corte rápido.

Para modular un láser en intensidad se usa algún tipo de obturador u otro dispositivo capaz de dejar pasar el haz laser en función de una corriente o tensión de modulación.

Ley de Bragg



Esta ley predice las condiciones en que es posible la difracción de rayos X a partir de un cristal. Los rayos X penetran en el cristal y son refractados a partir de planos de refracción en la estructura del cristal. Se supone que los rayos X penetran en el cristal y son refractados a partir de esos planos. La idea está en que al refractarse se sumen en forma constructiva y produzcan un haz.

Bragg demostró que la formación del haz era posible si la distancia entre planos del cristal era un número entero de longitudes de onda. La ecuación simplificada es:

$$2.d.\text{sen}\theta = m.\lambda \quad d = \frac{a_0}{\sqrt{5}} \quad (\text{Relacionado con las dimensiones de la célula})$$

Si los rayos X caen sobre una serie de planos atómicos de forma que satisfagan las ecuaciones anteriores, es decir, si: $\lambda = \frac{2.d.\text{sen}\theta}{m}$ (m es un número entero)

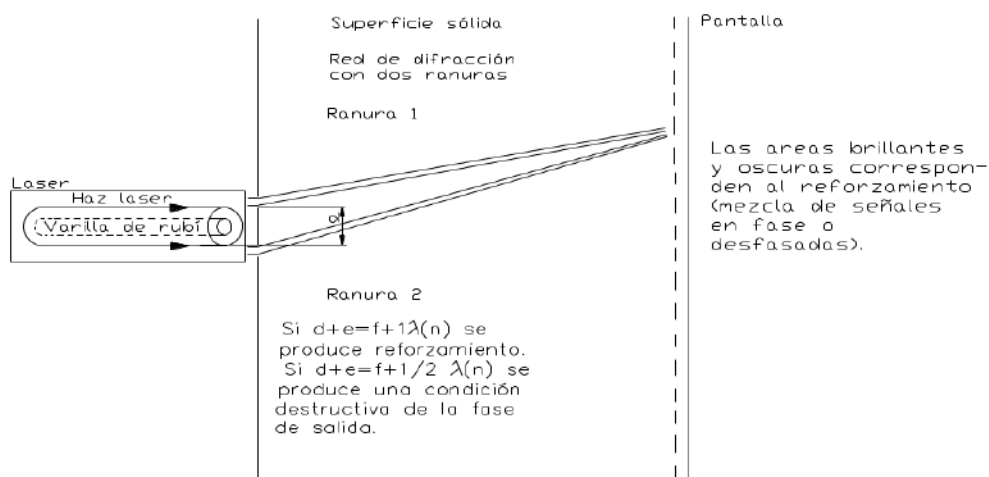
y λ es la longitud de onda del rayo X, se producirán haces refractados de los rayos X.

Sistema óptico de transmisión de datos

Los sistemas de modulación de datos emplean los múltiples pasos de las señales ópticas o infrarrojas a través de un material cristalino; este, a su vez, tiene una señal acusto-óptica aplicada de tal manera que hace que el material cristalino se transforme en una red acusto-óptica

Redes de difracción óptica

Cuando se tienen dos ranuras como en el experimento de Young, suponemos que tales ranuras son pequeñas en comparación con la longitud de onda de la luz pasando a través de ellas, y así la luz se difractará mas bien de manera uniforme. Esto significa una cierta curvatura a partir de su dirección de propagación original.



Fuente: Sistemas de comunicación (A. Bruce Carlson).

La pantalla sobre la que inciden los rayos de luz que atraviesan la ranura tiene zonas brillantes y oscuras. Cuando las radiaciones en los haces están en fase, se produce un reforzamiento y aparece una zona brillante. Cuando aquellas están en contrafase, habrá oscuridad en la pantalla.



La red de difracción es un dispositivo que desarrolla una operación equivalente a la de una ventana multirranura atravesada por rayos de luz.

La posibilidad de variar la red de forma que deje pasar mas o menos luz en función de una onda acústica o una corriente eléctrica, o incluso en función de otros fenómenos como calor, presión, etc., hace posible el desarrollo de señal, alarmas y sistemas de sensores, así como la transmisión de datos por modulación de amplitud de la luz generada por una fuente láser o LED.

El fenómeno láser en modulación

Los periodos entre las longitudes de onda discretas a la salida del láser varían electrónicamente con los datos o la información de entrada que desea enviarse.

Las ondas acústicas pueden provocar un efecto que haga cambiar de dirección (difracción) o causar modulación en el haz de luz.

Si las ondas acústicas y luminosas se mezclan en algún dispositivo de transferencia (un cristal), se forman modelos de interferencia.

Si a continuación se desplaza el haz que incide sobre un detector de manera que su intensidad varíe progresivamente (on/off) y todo ello en función de una variación de la onda acústica podemos decir que se ha “modulado” el haz de luz.

Sistema láser de detección de defectos

Se usan dos láseres y un sistema óptico adecuado. Uno de los láseres genera un impulso de alta potencia que es convertido por el material en una onda acústica. El segundo láser trabaja como interferómetro que monitorea el movimiento de la superficie que se examina, detectando los fallos por el desplazamiento de fase. El sistema no necesita que halla contacto directo con el material que se examina ni existe limitación alguna en el tamaño y forma del objeto.

Algunos problemas referentes a las comunicaciones láser de larga distancia

Debido a la divergencia del estrecho haz, cualquier pequeño movimiento angular en uno de los extremos del sistema puede producir desalineamientos que podrían significar pérdidas de información o de datos. Se necesita un enfoque muy preciso del haz ya que este es de diámetro de unos 5mm. Este hecho es de gran importancia en aplicaciones militares donde se emplean comunicaciones laser.

Retardos temporales en sistemas de transmisión ópticas

Un retardo en un sistema afecta a las transmisiones de impulso (que contienen información bien individualmente o en grupos, como en el caso de un sistema de modulación por posición de impulsos).

El retardo se genera en equipos para codificar y decodificar información, en los tiempos de transmisión de la luz y en los tiempos de respuesta de las unidades detectoras y transmisoras de un sistema láser. Existe también el problema de la sincronización podría verse afectada negativamente si la temporización no es muy exacta.



Concepto de un generador láser digital multiplex:

La multiplexación temporal (usada en computadoras y sistemas de radio) quiere decir que se dedica un espacio de tiempo para cada señal de información secuencialmente. Los canales no se transmiten en forma simultánea. En la multiplexación de frecuencia (usada en señales de audio de radiofrecuencia), se utiliza la salida combinada con los canales para modular una portadora y ser transmitidos todos a la vez, siendo después decodificados por filtros apropiados en el extremo receptor.

Las componentes de frecuencia del láser están separadas espacialmente en el interior de la cavidad generadora. Cada componente de frecuencia es posteriormente modulada por codificación de impulso de manera separada, de acuerdo con la señal digital de entrada, transmitida al receptor en forma de haces recombinados y allí separada para su decodificación.

Utilización del láser de CO₂ en la producción

Durante algunos procesos de fusión es necesario controlar el calor generado o de lo contrario el material podría sufrir distorsión térmica o algún otro efecto negativo. En el caso de un láser pulsado a una frecuencia variable, la frecuencia de los impulsos puede ser determinada de forma que se eviten dichos problemas térmicos.

Existe una ventaja definitiva en la utilización de láseres en soldadura o fusión.

El rayo láser puede ser enfocado en un área muy pequeña, se utiliza para soldar en espacios muy estrechos.

La profundidad del calor puede ser controlada con precisión.

El interferómetro Fabry-Perot:

Se utiliza en el láser de color para separar longitudes de onda determinadas. Consiste en dos superficies parcialmente reflectantes separadas a una distancia precisa y a través de la cual pasa la radiación.

Este dispositivo emplea el principio de división de una señal, un rayo y la posterior recombinación de las otras dos mitades, después de cada una halla sido expuesta de alguna manera a cualquier fuerza externa.

Una de las mitades forma la referencia con la que la otra mitad puede ser comparada y los cambios respecto al estado original pueden ser medidos, evaluados y utilizados como herramientas para determinar la magnitud o la fase de las fuerzas que han influido en el cambio de la otra señal.

En la generación de un haz laser a partir de un diodo laser de franja, los extremos del elemento se preparan de forma que sean óptimamente planos y paralelos. De esta manera, los fotones serán capaces de estimular otros átomos y provocar el proceso laser. Así es esta estructura de espejos paralelos, llamada Fabry-Perot, que puede ser construida a mayor escala con solo alinear adecuadamente la superficie de ambos espejos, de manera que estén completamente paralelos entre si.

En los interferómetros, los espejos se emplean para separar o combinar frecuencias separadas con el fin de obtener el efecto de comparación mencionado.



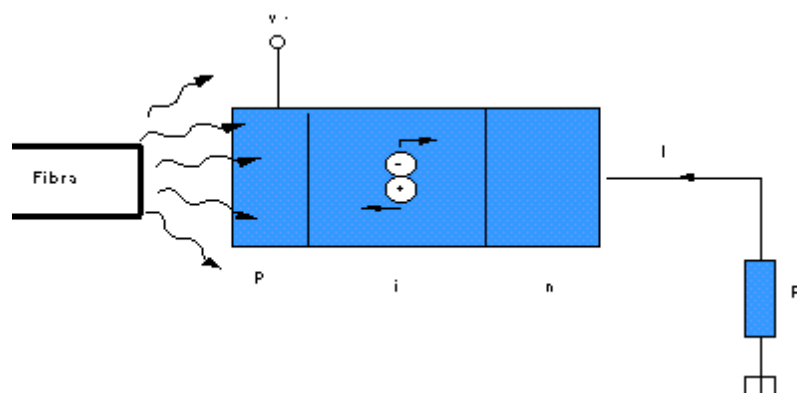
Uso potencial del láser

Su uso en aplicaciones médicas y biológicas aumenta continuamente. Se usa también en procesos y análisis químicos, en comunicaciones, en la iniciación y control de las reacciones termonucleares, detección y monitoreo de polución, hay otras incontables aplicaciones en el campo geológico, en aplicaciones holográficas y en procesos relacionados con la fabricación.

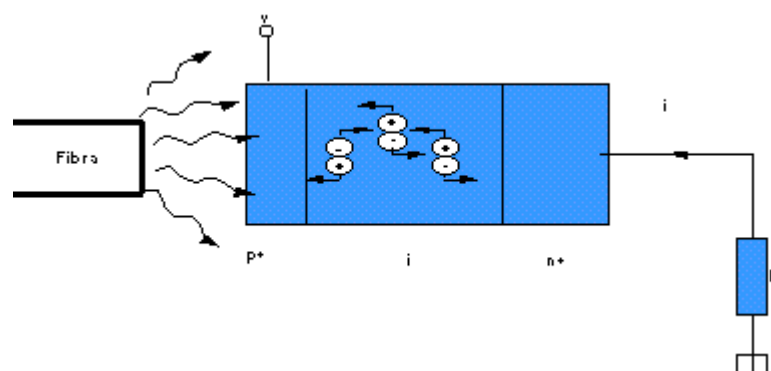
Receptores ópticos:

En las comunicaciones por fibra óptica se usan como detectores de luz, principalmente los diodos PIN y APD. El comportamiento de estos semiconductores ha sido constantemente mejorado, especialmente en los que se refiere al tiempo de elevación del pulso y

sensibilidad. En la actualidad se presentan en tamaños adecuados para ser acoplados en las fibras ópticas.



Receptor PIN



Receptor APD

Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

Medios de transmisión

UTP: 8 hilos, Unshielded Twisted Pair.

RDI: Corresponde a un modelo de redes superpuestas; en una variante de la RDSI. Está formada por 3 grandes redes de transporte: la red digital terrestre, la satelital multiusuario y la red de conmutación de paquetes de datos. El servicio de RDI es proporcionado actualmente por teléfonos de México (TELMEX).

La Red Digital Terrestre: Permite establecer conexiones digitales desde el domicilio del usuario por medio de fibra óptica y radios de microondas urbanos. También es posible obtener servicios de troncales digitales, números de grupos de gran capacidad, marcación directa a extensión, circuitos digitales de alta velocidad punto a punto y se pueden formar grupos cerrados con circuitos digitales privados (nacionales e internacionales) sin pasar por la red pública.

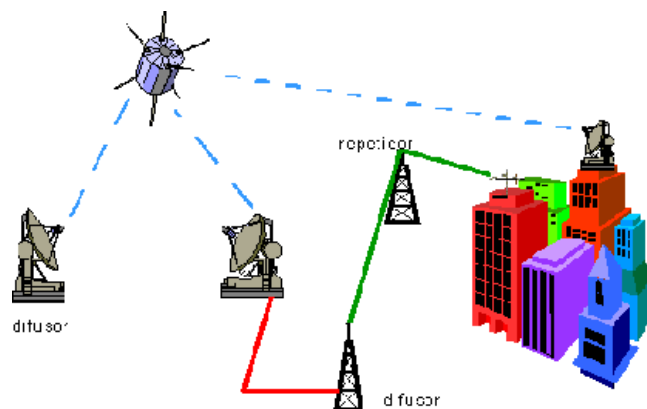
La Red Satelital: Multiusuario cubre las áreas que no cuentan con servicio de la red terrestre. Actualmente la red satelital de TELMEX cuentan con estaciones terrenas



maestras en las ciudades de México, Monterrey, Guadalajara, Tijuana, Pto. Vallarta y Huetulco.

Por medio de estas estaciones es posible ofrecer servicios de enlaces punto a punto con velocidades de transmisión de 9.6 Kbps hasta 2.048 Mbps, utilizando protocolos de transmisión estandarizados y con gran disponibilidad.

La red de conmutación de paquetes de datos permite la transferencia electrónica de datos, acceso a bases de datos (videotexto) y el uso de correo electrónico entre empresas o instituciones.



La Red Satelital

Fotodiodos receptores

Los APD de InGaAsP, se fabrican con ganancias constantes a alta velocidad y con una eficacia cuántica mayor al 70% a una longitud de onda de 1,28 micrómetros, el ruido es un grave problema cuando se trabaja con ganancias elevadas.

El diodo PIN (material tipo p, silicio intrínseco y una capa de silicio tipo n) posee una respuesta temporal rápida adecuada a la velocidad de modulación, éste se usa como detector. Están compuestos de germanio, silicio y arseniuro de galio (GaAs).

Utilización de un diodo PIN en un sistema de comunicación láser

La modulación por posición de impulsos (PPM) requiere una excelente estabilidad y sincronización. Cada impulso puede seguir una variación sinusoidal alrededor de su posición nominal, representando así un tono o un dato. Cada impulso representa un canal de comunicación completo. Las variaciones en el error de temporización son función de la relación señal-ruido del sistema.

Los dispositivos de detección detectan igualmente tanto el ruido como la información, es muy importante la relación señal-ruido de la transmisión.

Conceptos básicos sobre las lentes

Principio de la óptica geométrica

Un rayo proveniente del infinito se refleja y pasa por el foco.

Supuestos en que se basa la óptica geométrica

- La relación λ_d (longitud de onda sobre tamaño del obstáculo) es casi nula, esto es cuando la longitud de onda de la luz es mucho menor que las dimensiones de los obstáculos que se interponen.
- La propagación de las fuentes de onda, señalada por la dirección de sus rayos, es en todo medio homogéneo, siempre rectilínea.
- Todo punto luminoso (llamado objeto) es fuente de ondas esféricas. Si estas ondas esféricas se pueden luego volver a concentrar en un punto, este nuevo punto es la “imagen” del objeto en cuestión.
- Tiene validez el principio de “retrozado”: si un rayo describe un camino: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow \dots \rightarrow Z$ entonces existe un rayo que partiendo de Z puede hacer el recorrido: $Z \rightarrow \dots \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$.
- Todas las ondas son esencialmente incoherentes, es decir, en cualquier punto se deben sumar las intensidades de distintas fuentes para hallar la intensidad total y no las “amplitudes” como ha sido usual hasta ahora.

Importancia de las lentes

Cuando los rayos de luz pasan a través de medios con diferentes índices de refracción, sufren refracción o se curvan. Si un frente de onda luminosa incide sobre cierto tipo de superficie (supongamos un espejo) los rayos de luz son reflejados desde esa superficie con ángulos concretos, sabemos según la ley de reflexión que el ángulo de incidencia es igual al reflejado.

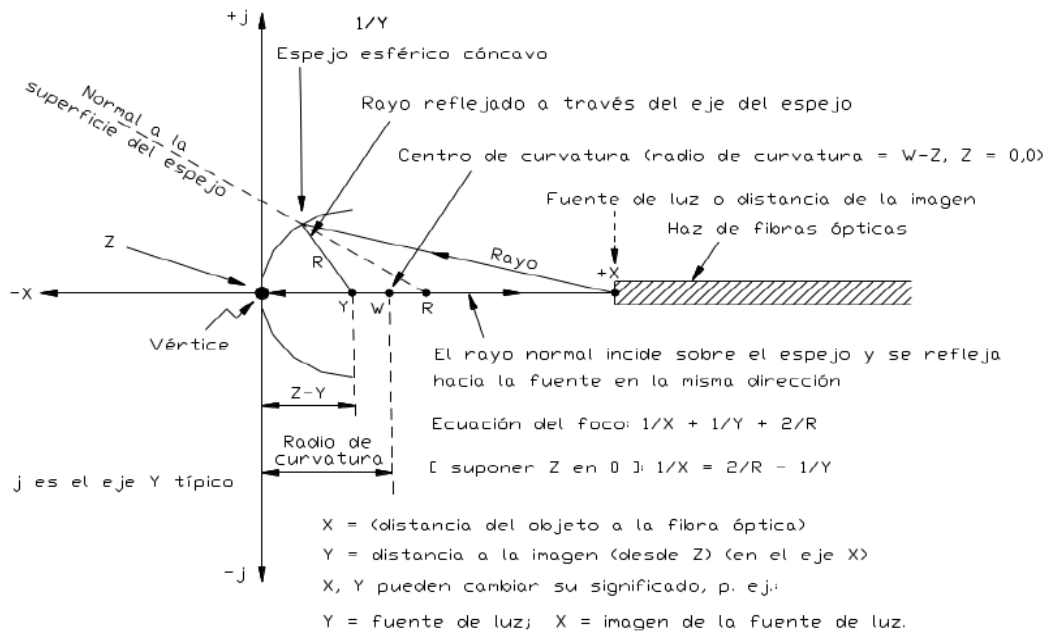
Algunos tipos de lentes y posibilidades de enfoque

Este tipo de espejo reflejará los rayos de luz si no se violan los principios básicos de la óptica geométrica (por ejemplo: tener una gran superficie en comparación con la longitud de onda de la luz reflejada).

Si suponemos que los rayos de luz vienen desde una distancia lejana de forma que son paralelos, o que el espejo es pequeño o de tamaño equivalente a la fuente emisora de luz, diremos que el punto imagen (real o virtual) es el llamado punto focal o foco (F) del espejo. Si suponemos que los rayos de luz llegan desde una gran distancia (pueden considerarse paralelos) y que la fuente o espejo está fijo en el foco (F), podemos suponer que los rayos incidirán sobre el espejo y que emanarán de esa fuente.

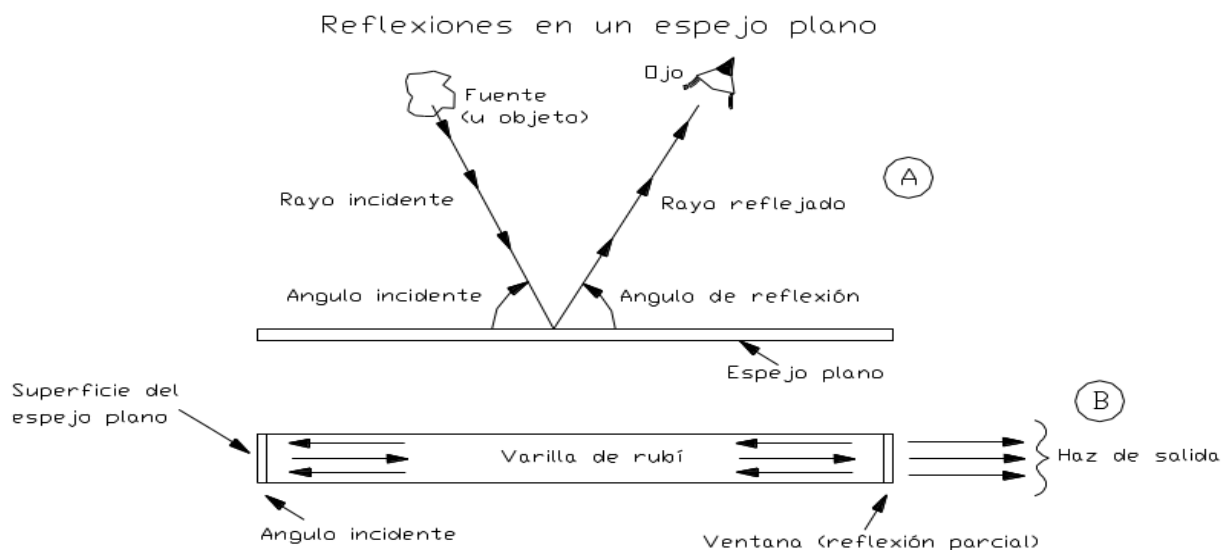
Debido a la curvatura del espejo cóncavo o convexo, puede considerarse que los rayos convergen o divergen. Si divergen, tendremos una concentración de los rayos de luz.

Espejo cóncavo esférico



Espejo plano

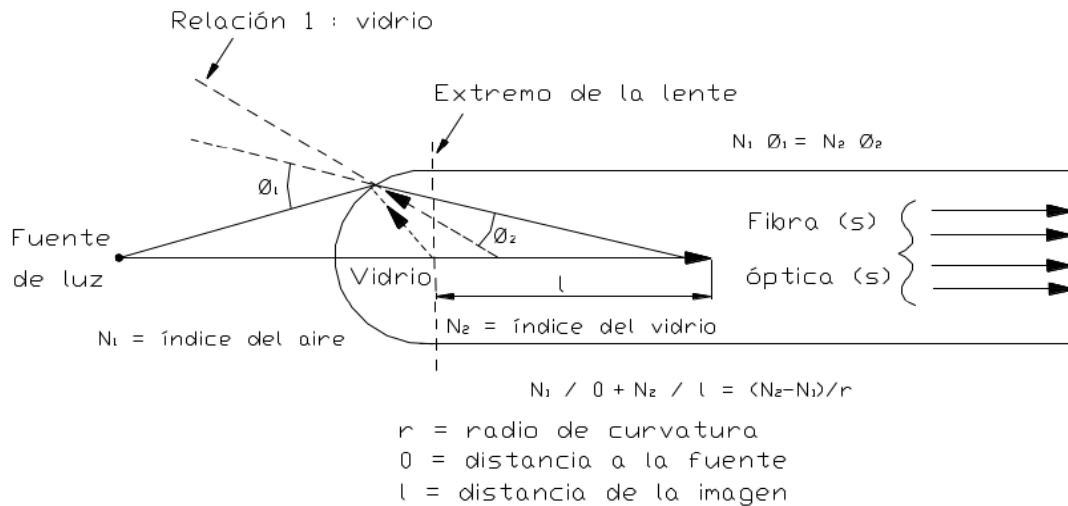
En el láser de varilla de rubí, la energía de luz estimulada rebota de un extremo a otro de la varilla hasta que finalmente es emitida por uno de los extremos. Cuando se observa la imagen reflejada en un espejo plano, hay que tener en cuenta el intercambio de derecha a izquierda. Nuestra mente se adapta a este fenómeno y normalmente no nos damos cuenta de su existencia. Un espejo plano invierte la derecha en izquierda y esto puede tener consecuencias en la reflexión de los rayos de luz.



(A) Un espejo plano refleja imágenes de luz.

(B) Una varilla de rubí en un láser refleja luz para estimular la emisión del haz láser.

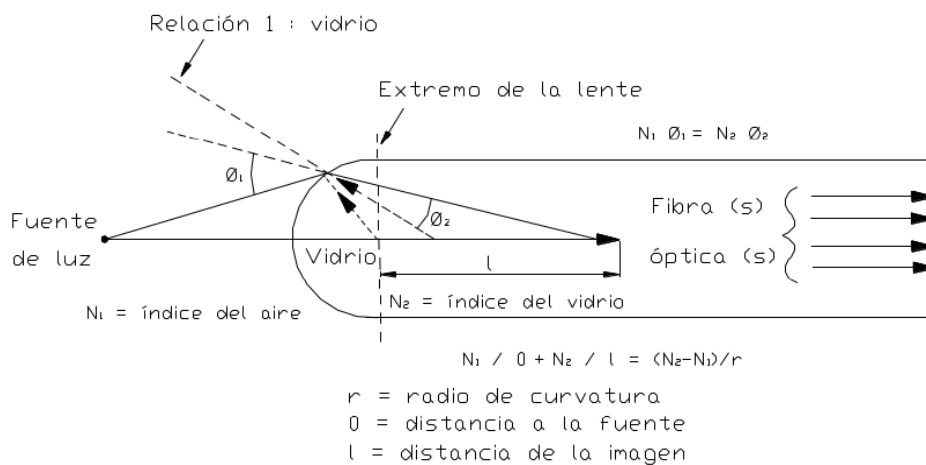
Efecto lente en el extremo de una fibra óptica



Lentes en el extremo de las fibras ópticas

La figura muestra una fuente de energía luminosa situada en O y los dos rayos, uno de los cuales entra directamente en el material de vidrio a través del radio de curvatura del extremo (r) terminado como muestra la figura, y encontrándose en (l) con el rayo refractado después de incidir sobre la superficie curva del extremo.

Efecto lente en el extremo de una fibra óptica



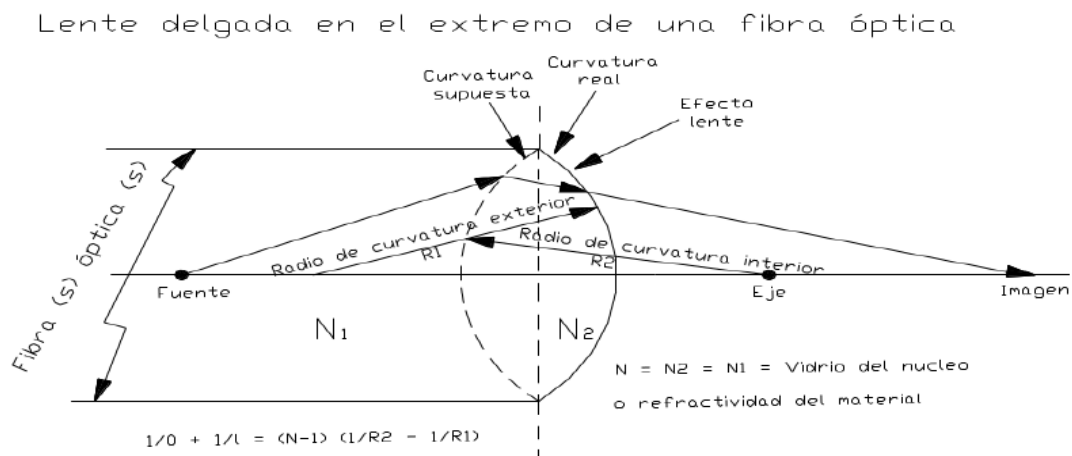
En el estudio de las lentes es importante que ambos rayos se reúnan en el punto (I). Ahora, ambos rayos están en el interior de la fibra óptica y llegan a (I) bajo un ángulo que les permite propagarse a lo largo de toda la fibra hasta el extremo opuesto.

Realmente, resulta posible transformar el extremo de las fibras en este tipo de lente. El vidrio, calentado a la temperatura apropiada, se hace plástico y puede formar una lente como las anteriores. Hace falta una cierta habilidad y cuidado control de la temperatura para que el vidrio no se "escape", se forme una esfera o adquiera cualquier otra forma que no se desea.

Podemos ver ahora que se puede producir la situación inversa si se crea una lente en el extremo final de la fibra. Con unas cualidades de refracción adecuadas entre las fibras y el medio existente más allá de ellas, puede tener lugar la refracción inversa a la ocurrida en la entrada y mostrada en la figura anterior. La fuente se convierte en el foco y el punto (I) de la figura que era el punto de corte de los rayos en el interior del vidrio, pasa a ser una fuente interna origen de los rayos.

En el extremo de la fibra óptica se produce el efecto de "lente delgada". Uno de los lados curvos de esta lente delgada no existe físicamente pero, en realidad, está presente tal y como lo muestra la figura siguiente.

Problema del enfoque del haz de luz

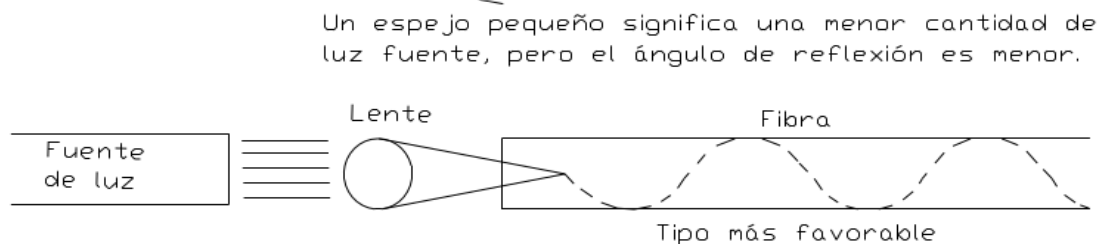
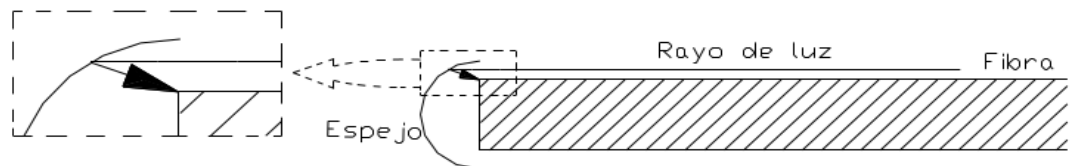


Fuente: Sistemas de comunicación (A. Bruce Carlson).

Cuando queremos introducir luz en la fibra óptica y lo deseamos hacer empleando un dispositivo reflectante como por ejemplo un espejo o un dispositivo de enfoque como una lente, debemos tener en cuenta el ángulo de entrada de la luz en la fibra. Si la energía luminosa llega formando un ángulo demasiado ancho, el ángulo de reflexión de la cubierta puede exceder el ángulo crítico de Brewster y la energía podría no propagarse por la fibra. Lo que queremos es concentrar la energía y los rayos de luz dentro de un cono que cumpla los requisitos del ángulo de aceptación del modo de propagación que deseamos. El tamaño llega a ser una cuestión importante (el tamaño físico de la lente o del reflector y el tamaño físico relativo del cable de fibras o de la fibra individual). Lo que se busca es

que la geometría del reflector o de la lente pueda hacerse compatible con los requisitos de reflexión y de enfoque y sea lo bastante pequeño como para que el ángulo del cono esté dentro del límite de tolerancia.

Rayos de luz
incidiendo en
una fibra con
un ángulo de
aceptación
cónica.



Fuente: Sistemas de comunicación (A. Bruce Carlson).

Vemos que si el espejo es pequeño y de un tamaño aproximado al de la fibra, no solo pierde mucha capacidad de recoger los rayos de luz, sino que tiene la ventaja que puede a su vez entregarlos a la fibra dentro de un cono con un ángulo relativamente pequeño. Un espejo mayor captura mucha mas luz de la fuente, pero el ángulo con que emite hacia la fibra puede ser también mucho mayor. Idealmente, **una fuente debería tener una lente de tamaño aproximado al de la fibra.**



Aplicaciones del láser y la fibra en la TV por cable

La idea de introducir los láseres es debido a su capacidad de operar en aquellos márgenes de frecuencia donde pueden conseguirse grandes anchos de banda.

No resulta difícil transmitir muchos canales de TV por un único cable de fibra óptica. La ventaja de utilizar dicho sistema para transmitir estas señales es que el sistema no está sujeto a interferencias electromagnéticas.

Utilización de la TV por cable en sistemas de seguridad

El cable de fibra óptica proporciona gran efectividad en aplicaciones de seguridad por el simple hecho de que no puede verse interferido por dispositivos radiantes.

Generalmente la distancia sobre la que se instala el cable no es larga, por lo que la fiabilidad del sistema debe ser extremadamente alta. Las fibras ópticas proporcionan la posibilidad de que dicho sistema opere en entornos muy duros y evita muchos de los problemas de un sistema de cable convencional. Dichos sistemas incorporan normalmente un detector de movimiento y una vigilancia visual de las áreas.

Linealidad

Con las técnicas digitales, es tolerable cierta falta de linealidad pues los equipos pueden compensarla; pero, en cualquier caso, las dificultades son evidentes para compensar la no linealidad de la generación de luz, a partir de los láser o de otras fuentes de luz de fibra óptica.

Se han llevado a cabo importantes trabajos en este sentido, tanto para desarrollar fuentes de luz y moduladores más lineales como para conseguir sistemas que admitan esta falta de linealidad.

Precauciones de seguridad con las fibras ópticas

Es muy peligroso mirar directamente un cable de fibra óptica conectado a un láser o un LED. En el caso de una fibra multimodo la distancia mínima entre el ojo y el extremo de la fibra es de 1m.

Se dice también que para el caso de fibra monomodo, la distancia crítica entre el ojo y la fibra debería ser, al menos de cuatro metros. Dependiendo del tipo de fibra, la atenuación de la luz, etc., podría darse el caso de que no existiera riesgo alguno incluso a una distancia menor a un metro.

Lector láser para grabadoras domésticas

El láser no lee la información. Lo que hace es suministrar la fuente de luz para que por medio de fibras ópticas y fotodiodos, los impulsos de luz reflejada en el disco sean convertidos en señales digitales. Estas a su vez se transforman en señales analógicas utilizando técnicas adecuadas, y se amplifican para ser posteriormente presentadas en dispositivos de salida de audio o video.



Aplicaciones experimentales con fibra óptica

Computadora controlada por luz

En 1981 se construyó en la universidad de Ohio una computadora digital totalmente óptica. Esta computadora empleaba una válvula de luz de cristal líquido, tal dispositivo aceptaba imágenes ópticas (rayos de luz) y las devolvía con un haz luminoso completamente independiente, a partir de un láser.

Lo importante es el equivalente óptico de las compuertas, y biestables lógicos electrónicos, fueron construidos con estos dispositivos luminosos. Estos conforman de manera muy parecida el funcionamiento de los circuitos de compuertas y de lógica transistorizada de las computadoras electrónicas.

Una computadora óptica realiza las operaciones mucho más rápido, es inmune a interferencias, este utiliza fotones de la misma manera que una común utiliza electrones.

Los sistemas ópticos tienen las ventajas de su seguridad (sin radiación) y de amplio ancho de banda, lo que significaría una velocidad mucho mayor en la transferencia de datos que con los cables convencionales.

Almacenamiento de información en discos ópticos

En el campo del almacenamiento de información un disco óptico que se graba con un láser puede almacenar hasta 50000 millones de bits (12,5 Gb), cuando un CD convencional almacena aproximadamente 0,7 Gb. El mecanismo por el cual son almacenados los datos consiste en pequeñas perforaciones realizadas por un láser. Si hay buena reflexión podría significar un “uno”, mientras que mucha menor reflexión podría significar un “cero”. La perforación es de solo un micrómetro, el láser está modulado conectado y desconectado por una señal de impulsos entrantes, de forma que las perforaciones y los espacios en blanco entre ellas tengan la misma relación que la información de señal modulada.

Para leer estos datos es necesario una fuente de luz adecuada, consistente de otro láser finísimo, y cables de fibra óptica para transportar la salida del rayo láser a un conjunto de lentes divisoras de haz, las cuales lo dividirán en dos caminos, de forma que uno de ellos se dirigiera al disco donde sería reflejado. La segunda mitad del haz se emplea para generar una señal de referencia con el fin de que la parte electrónica sepa si el haz reflejado es de total intensidad (lo que significaría que no existe perforación) o es absorbido parcialmente por la perforación y tiene menor intensidad. Ambas condiciones extremas pueden ser así interpretadas por el detector y los circuitos comparadores electrónicos como “unos y ceros lógicos”.

También debe existir un sistema de seguimiento que dirija el láser en la lectura de los datos.

Viabilidad de las fibras ópticas

Una de las áreas de desarrollo más importantes es la mejora de las fuentes de luz y de los detectores conversores de luz en pequeños dispositivos encapsulados, de forma que puedan ser integrados en los extremos de las fibras ópticas.

Técnicas de medición

Muchos principios de las técnicas de mediciones eléctricas se corresponden con las técnicas de mediciones ópticas.

potencia eléctrica	potencia óptica (W, mW, dBm, dBμ)
resistencia	absorción
acoplamiento de impedancia	acoplamiento de índice de refracción
filtro	filtro
etc.	

La luz es una radiación electromagnética, que se obtiene cuando cambian su velocidad, las partículas cargadas eléctricamente (p.e: electrones). La transmisión de luz no está limitada a los portadores cargados (p.e: electrones) sino más bien a más volátiles portadores de energía (fotones).

Las más importantes mediciones para la operación y mantenimiento de sistemas de fibra óptica son:

- Medición de atenuación.
- Medición de dispersión (en casos especiales).
- Localización de fallas.

Medición de atenuación

De todas las mediciones en comunicaciones por fibra óptica la atenuación en conectores, empalmes, etc. tiene la mayor importancia. Por esta razón las mediciones deberán referirse a interfases bien definidas.

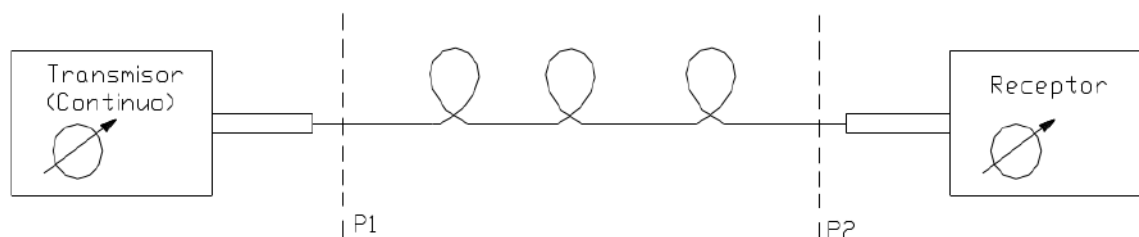


Figura 1

Las mediciones de atenuación se basan en mediciones de niveles relativos de potencia.

La atenuación $A = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1}$ (dB).

En simples mediciones tanto el transmisor como el receptor pueden ser de banda ancha, con un rango de medición, por ejemplo, 60 dB (correspondiente a, por ejemplo, de 10 nW a mW). Mediciones más exactas se realizan selectivamente, es decir, con un transmisor y un receptor donde no solo el nivel de potencia sino también la longitud de onda puede ser seleccionada. La exactitud debería ser de $\pm 5\%$ o mejor.

Medición de dispersión

A alta dispersión de la velocidad del bit debe ser baja con el propósito de evitar interferencias mutuas entre pulsos.

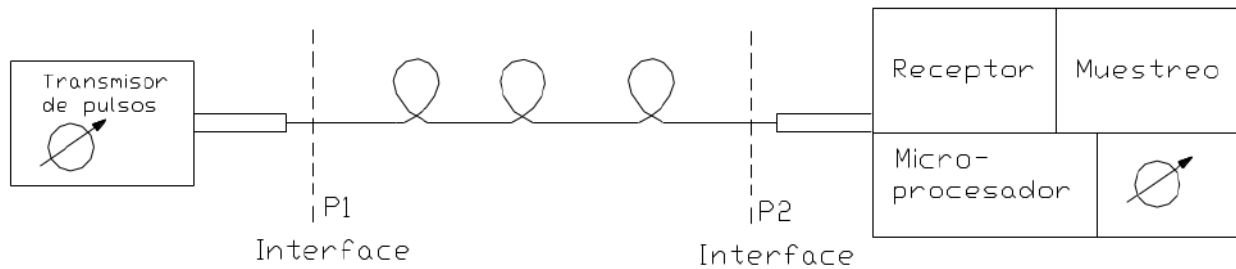


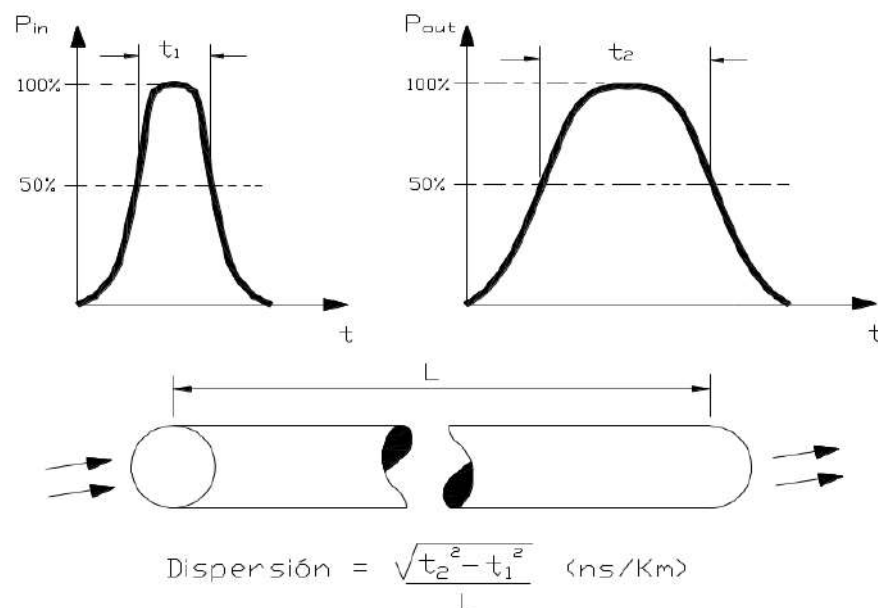
Figura 2

Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

La frecuencia de los pulsos del transmisor (emisor) se puede seleccionar y los pulsos de salida ser muy cortos, p.e: 200-300 ps.

El receptor detecta los pulsos, los cuales han sido ensanchados y modificados en su forma debido a la dispersión de la fibra. Para evitar interferencias de ruido, los pulsos recibidos se relacionan con el valor medio de muchos pulsos. Conociendo las propiedades del pulso transmitido, un micro procesador calcula la respuesta a impulsos o la respuesta a frecuencias de la fibra (Fig. 1y2).El receptor indica valores de dispersión en el rango de, por ejemplo, 0,3 – 20 nS.

La exactitud debería ser ±5% o mejor.

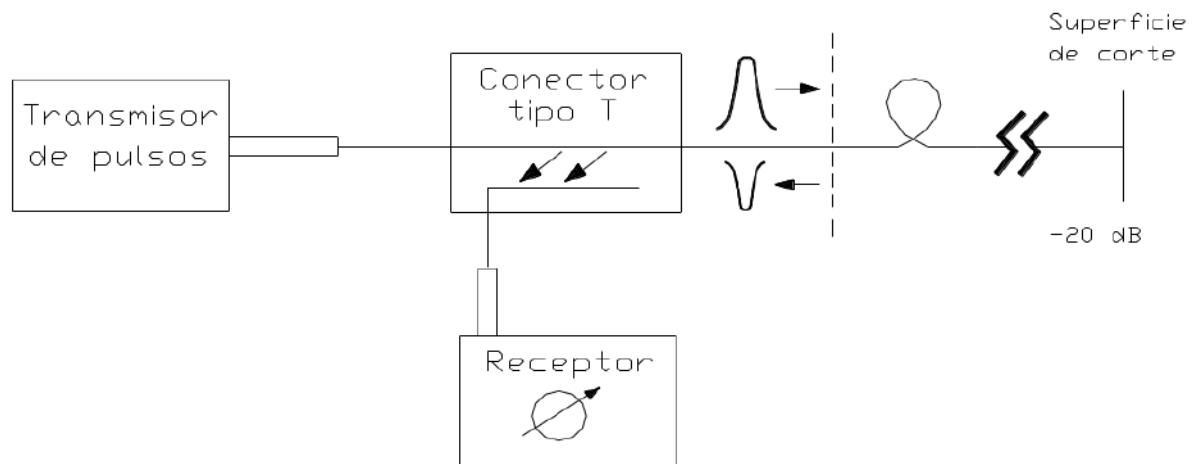


Fuente: Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)

=

Localización de fallas con reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR)

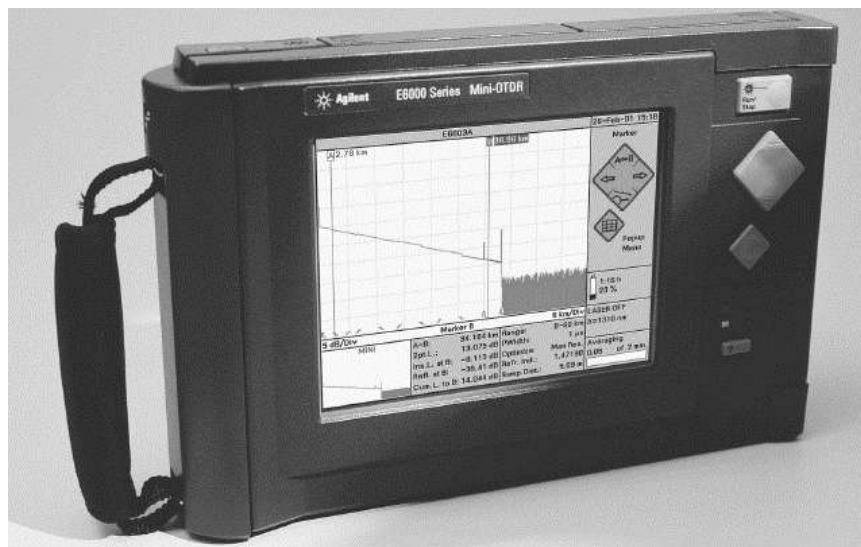
La técnica se basa en el hecho que parte de la luz se refleja en aquellos lugares donde ocurre un cambio de índice de refracción. Si la superficie de fractura es el aire, se refleja de 1% a 4% de la potencia (aproximadamente 20 dB). Si la superficie se encuentra en el agua, el pulso reflejado es aún más débil.



Fuente: Curso: Aplicaciones de las fibras ópticas: Sistemas de comunicaciones de alta calidad (Dr. Ricardo Duchowicz, ing. Sergio Noriega).

El receptor deberá medir pulsos con una exactitud de $\pm 2m$ (± 10 ns), los cuales han sido atenuados aproximadamente 60 dB.

OTDR (Instrumental de campo)



Fuente: Curso: Aplicaciones de las fibras ópticas: Sistemas de comunicaciones de alta calidad (Dr. Ricardo Duchowicz, ing. Sergio Noriega).

Simulación de sensor óptico

Caracterización del emisor y del receptor

Para caracterizar una fibra óptica se necesita conocer la atenuación por kilómetro, además de la pureza y frecuencia de la fuente.

En las instalaciones de fibra óptica hay que medir y caracterizar los tres elementos más importantes de un sistema:

-La fuente de luz.

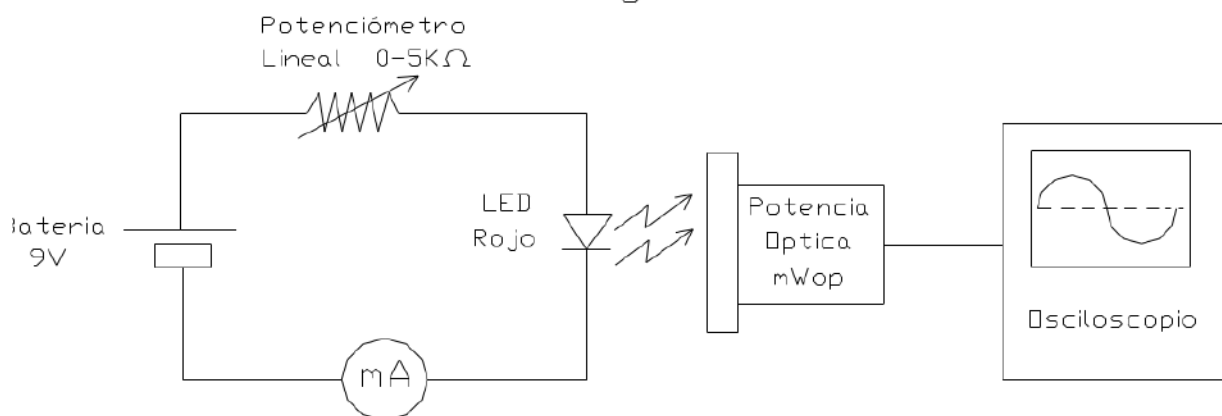
-La fibra óptica.

-El sistema detector.

Es necesario medir la fuente de luz para conocer su potencia de salida y para controlar la generación de las frecuencias de luz apropiadas y sus posibles polaridades. Se requiere de una instrumentación específica para la detección de fallos y errores para la identificación de aberraciones.

Caracterización del diodo emisor de luz (LED)

Figura N° 1



Para la caracterización del diodo emisor de luz (LED) de color rojo, construimos un circuito como el de la figura N°1.

Antes de realiza las conexiones, utilizando el multímetro con la escala en KΩ, identificamos la posición del cursor del potenciómetro en su valor máximo.

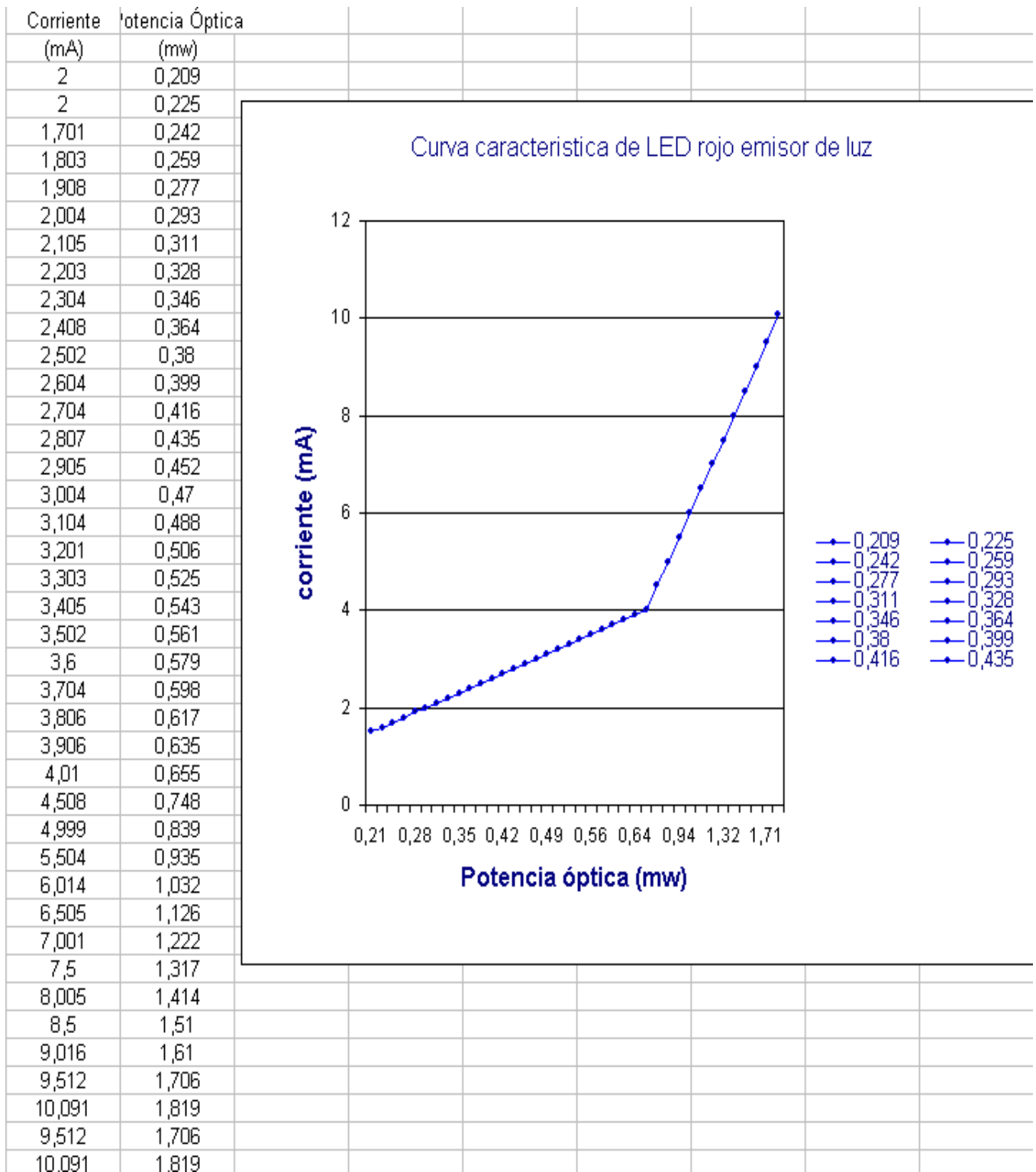
Una vez conectado los distintos componentes del circuito, para asegurarnos que circula la menor corriente por el LED colocamos el potenciómetro en su valor máximo (aprox. 4,7 KΩ).

Comenzamos variando el potenciómetro y obtuvimos las lecturas en el miliamperímetro desde 1,5 hasta 10,091 mA, en intervalos de 0,1 mA primero y luego de 0,5 mA. Para cada uno de estos valores obtuvimos los valores de potencia óptica.

Por último trazamos la curva característica del diodo, potencia óptica (mW) vs corriente (mA).



Curva característica del LED rojo (corriente vs potencia óptica)



Podríamos haber utilizado un LED infrarrojo ya que este trabaja a una frecuencia mayor, es decir con menores pérdidas ópticas, y sin interferencias producidas por la luz visible.

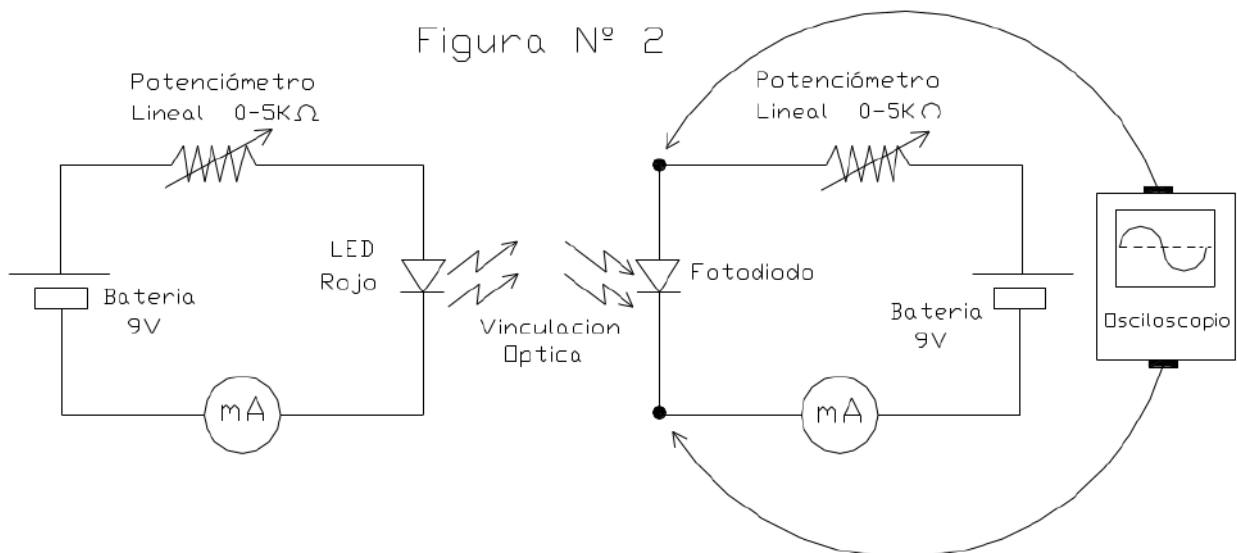
Este LED no lo utilizamos ya que el espectro infrarrojo no es percibido por nuestra vista, pero si lo es el diodo rojo.

Usando la curva característica del LED rojo obtenida anteriormente fijamos el valor de corriente en 6,505 mA, es decir, 1,126 mW ópticos y obtuvimos valores de tensión continua en el osciloscopio.

Simulación sensor de RPM

Simulando la interrupción óptica producida por las aspas de un ventilador solidario al eje de un motor, obtuvimos en el osciloscopio una onda de tensión de forma cuadrada, originada por la interrupción de la vinculación óptica producida por las aspas del ventilador.

En la figura 2 podemos ver el esquema completo del ensayo de laboratorio de la simulación del sensor óptico de RPM.



Sensor óptico de RPM

Principio de funcionamiento

Se utiliza un emisor de luz laser que incide sobre la superficie del eje del motor, la cual llevará una zona reflectante. Cuando el haz laser es reflejado por esta superficie, la reflexión del mismo es captada por la fibra óptica receptora. Cada uno de estos pulsos de luz nos indican una revolución del eje del motor.

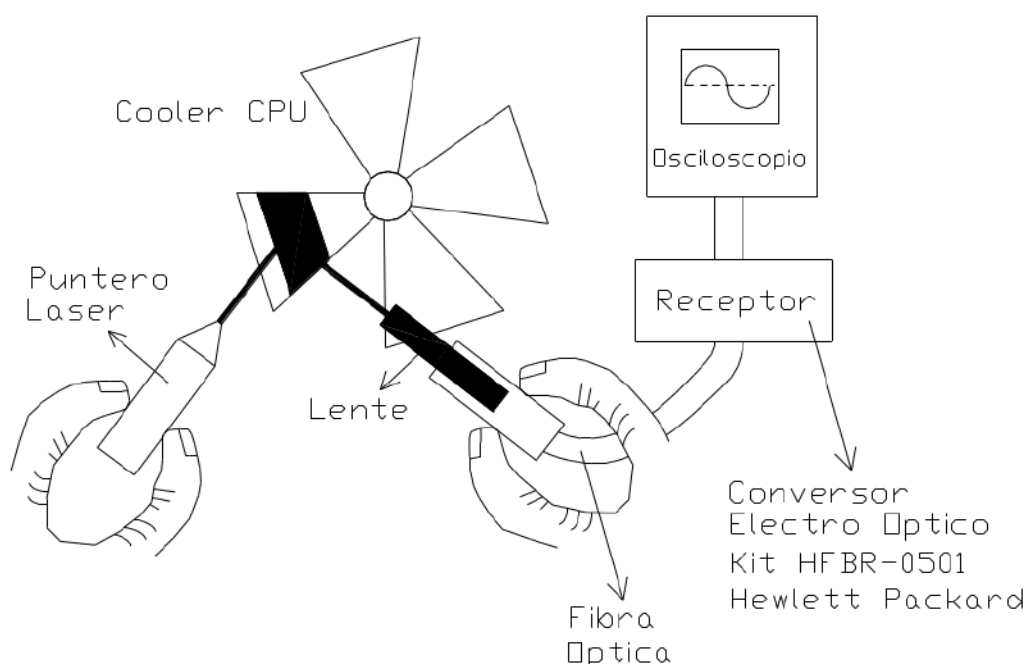
La luz obtenida viaja a través de la fibra óptica hasta llegar a la placa de adquisición de datos situada exteriormente a la PC y conectada al puerto paralelo del CPU.

En esta placa se encuentran entre otras cosas un conversor electro-óptico, el cual convierte los pulsos de luz en pulsos eléctricos, para luego ser recibidos por un contador digital, el cual a través del software nos da la velocidad de rotación.

Ensayo laboratorio de laser por reflexión de la luz

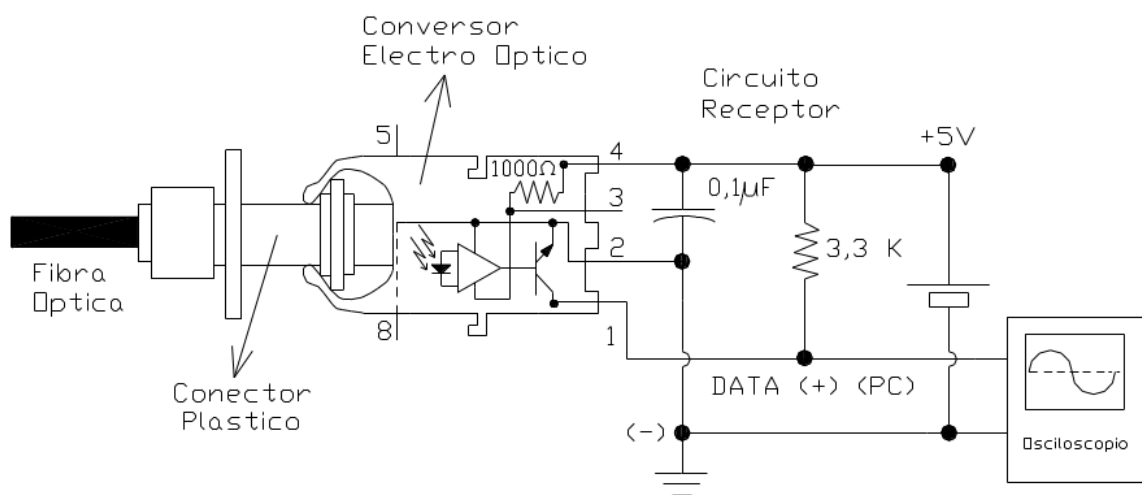
Para realizar la medición de la velocidad de un cooler color negro de un CPU, primero efectuamos una marca con pintura blanca en una de las aspas, la cual cumple la función de reflejar la luz incidente para ser captada por la fibra óptica receptora.

Esquema del ensayo de laboratorio



Para aproximar el emisor y el receptor al cooler, y que tuvieran ambos el ángulo adecuado para tener un buen acoplamiento óptico y así llegar al convertidor electro-óptico con un nivel de potencia adecuado (mW ópticos), por ser esta una prueba experimental de laboratorio lo realizamos con las manos, es decir, con la mano acercamos el emisor y receptor al eje del motor, podemos observar un esquema del ensayo en la figura anterior.

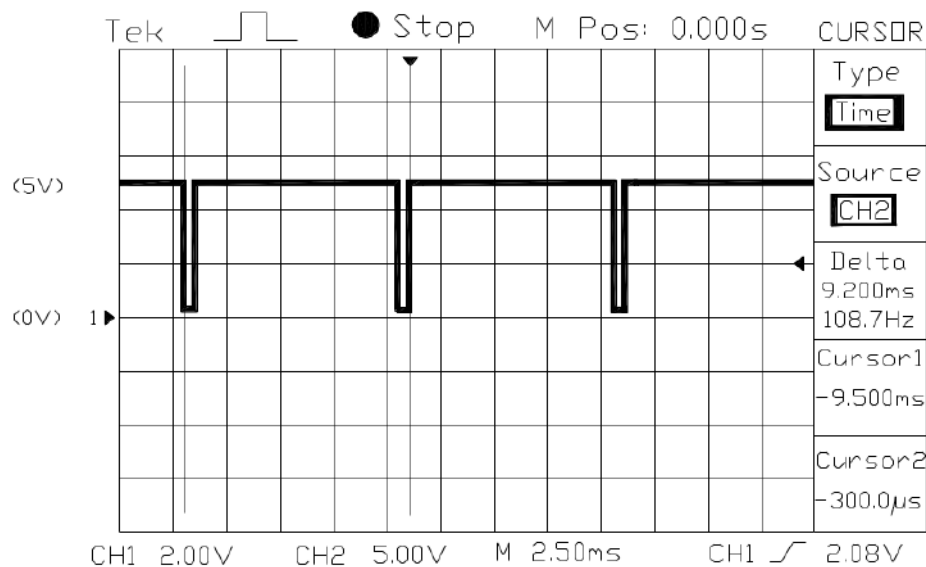
Esquema del circuito receptor



Utilizamos como emisor un puntero laser (diodo laser) alimentado con un tensión 4,5 V, de una potencia de salida de 1mW, el cual emite en una longitud de onda entre 630-680 nm (esta longitud de onda pertenece al color rojo en el rango espectro de luz visible).

Como receptor empleamos la fibra óptica plástica (PMMA), en cuyo extremo va colocado un conector plástico con una lente que cumple la función de enfocar mejor en la fibra la luz reflejada por el cooler, esta fibra va conectada en su otro extremo a través de un conector plástico a un convertidor opto-eléctrico que forma parte del KIT Hewlett Packard HFBR 0501, este convertidor va unido a un circuito receptor, ambos son componentes de una placa experimental.

Esta placa la conectamos a un osciloscopio digital, TEKTRONIX TDS 220 de 100 Mhz de ancho de banda. Obtenemos una onda de tensión (V) en función del tiempo (mseg.) de forma cuadrada como se observa en la siguiente figura:



Podemos observar que el periodo es $T = 9,2 \text{ mseg}$ y $f = 1/T = 108,7 \text{ Hz}$, donde obtenemos la velocidad $V = 108,7 \text{ ciclos/seg} * 60 \text{ seg/min} = \mathbf{6.522 \text{ rev/min (RPM)}}$.

Ensayo laboratorio maquinas eléctricas por reflexión de la luz

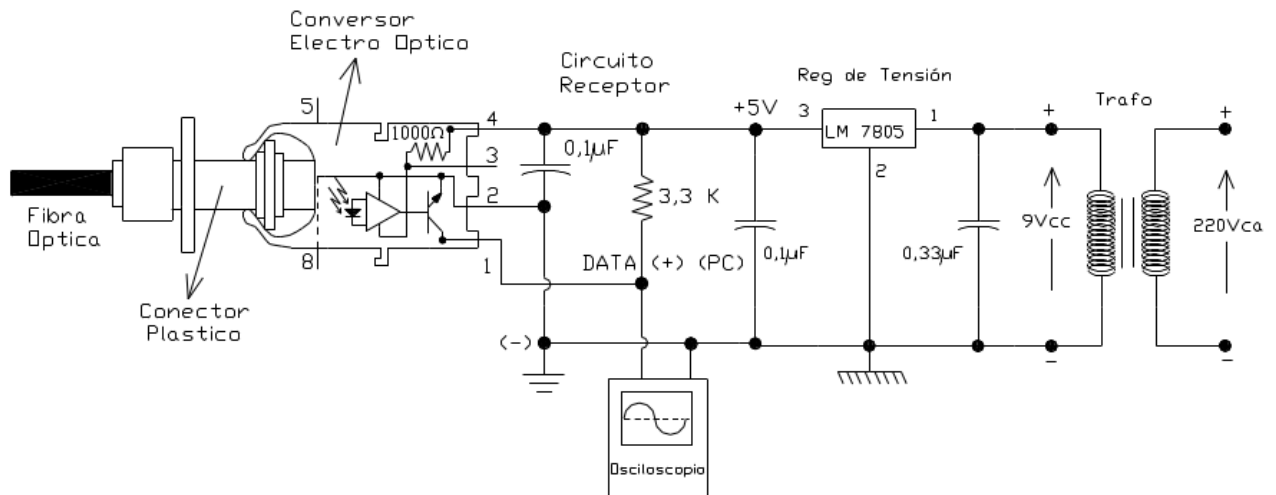
Para realizar la medición de la velocidad de un motor eléctrico del tipo asincrónico trifásico con las siguientes características:

Tipo 112 M4A, 6,5 CV, 1420RPM, de 50 ciclos/segundo, de tensión 380 V en Δ y 660 V en Y, una corriente de 8,3 A en Δ y 4,8 A en Y, $\cos\phi = 0,87$, servicio P, aislamiento clase E, P.33, ubicado en el laboratorio de maquinas eléctricas, primero efectuamos una marca con una cinta blanca sobre el eje del motor de color gris, la cual cumple la función de reflejar la luz incidente para ser captada por la fibra óptica receptora.

Para aproximar el emisor y el receptor al eje del motor y conseguir el ángulo de incidencia adecuado a un buen acoplamiento óptico utilizamos el soporte del sensor descripto a continuación.

Utilizamos como emisor un puntero laser (diodo laser) alimentado con un tensión 4,5 V, de una potencia de salida de 1mW, el cual emite en una longitud de onda entre 630-680 nm (esta longitud de onda pertenece al color rojo en el rango espectro de luz visible).

Como receptor empleamos la fibra óptica y un convertor que forman parte del Kit Hewlett Packard HFBR-0501, compuesto por una fibra óptica plástica PMMA (polímero compuesto de poli-metil, meta-acrilato) de 1mm de diámetro con conectores plásticos en ambos extremos y un convertor electro-óptico ubicado en el otro extremo de la fibra, ambos conector plástico y convertor están diseñados para tener las menores pérdidas de acoplamiento posibles, este convertor va adosado a una placa cuyo circuito se esquematiza en la figura siguiente:



Esta placa la conectamos aun osciloscopio digital, de marca: TEKTRONIX, modelo: TDS 220, con 100Mhz de ancho de banda. Obtenemos una onda de tensión (V) en función del tiempo (mseg.) de forma cuadrada como se observa en la siguiente figura:

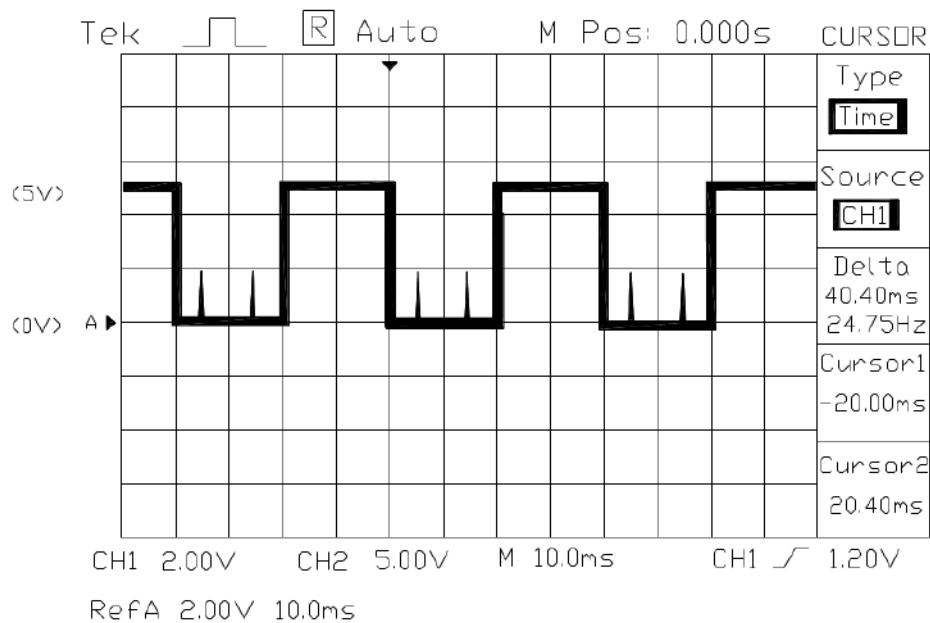


Foto del Kit Hewlett Packard HFBR-0501



Podemos observar que el periodo es $T = 40,40$ mseg y $f = 1/T = 24,75$ Hz , donde obtenemos la velocidad $V = 24,75$ ciclos/seg * 60 seg/min = **1485 rev/min (RPM)**.

Recordemos que la diferencia de velocidad entre los datos de chapa y la obtenida en el ensayo se deben a que la velocidad de los datos de chapa del motor son para una potencia demandada en el eje de 6,5 CV, mientras que en nuestro ensayo el motor funcionaba en vacio con lo cual la velocidad como era de esperar es mayor y mas cercana a la sincrónica de 1500 RPM.

Foto de la fibra óptica emisor y receptor



Foto del emisor y receptor colocados en la fibra óptica



Adquisición de datos

Principio de funcionamiento

La luz originada por el laser atraviesa un elemento (hélices) que gira solidario al eje del motor eléctrico, en el otro lado de este y alineada con el emisor se encuentra la fibra óptica receptora de forma que a medida que giran las aspas impiden o permiten el paso de la luz hacia el receptor, cuando no pasa luz no hay señal en el receptor, por el contrario cuando la luz atraviesa el espacio entre las hélices recibe señal.

La luz recibida viaja por la fibra óptica hasta un fotodiodo o fototransistor que es el encargado de transformar los pulsos de luz en un tren de pulsos eléctricos que son amplificados y conectados a la placa madre del CPU.

Esta información binaria es interpretada por un software el cual nos da las RPM del motor eléctrico.

Descripción

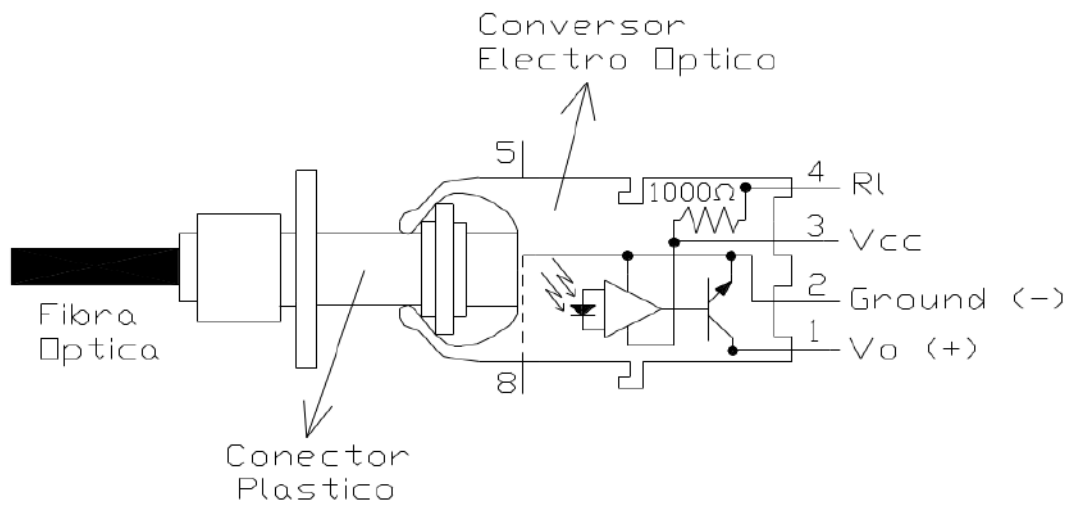
En los instantes en que el aspa que gira solidaria al eje del motor eléctrico no corta el rayo de luz, la luz viaja por la fibra óptica hasta un receptor que es un fotodiodo (transforma los pulsos de luz en pulsos eléctricos), el cual va conectado a un circuito comparador que cumple la función de construir el tren de pulsos cuadrados que luego entran al CPU, es decir pasando un cierto valor de tensión umbral, en la salida del comparador hay una tensión de 5V y por debajo de un cierto valor mínimo no aparece ningún valor de tensión(0V) en la misma, dando como resultado un 1 lógico (5V) o un 0 lógico(0V) dependiendo del valor de tensión en la salida del fotodiodo (convertor ópto-eléctrico).

Con este circuito comparador reconstruimos el tren de pulsos que salen del fotodiodo en un tren de pulsos prácticamente cuadrados, además este comparador es un negador de la señal de entrada al mismo, es decir, estrictamente hablando una tensión cercana a los 5V que sale del fotodiodo la transforma en un cero lógico a la salida y viceversa una tensión cercana a los 0V la transforma en un 1 lógico.

Este circuito luego va conectado al CPU por medio del puerto paralelo (puerto de impresora) a través de una ficha DB25 (al pin 15 va conectado el borne positivo(+) y al pin 18 el borne negativo(-)o masa).

La información binaria (el tren de pulsos) es memorizada por el CPU y procesada por el software Visual Basic 6.0, es decir, el software realiza la siguiente operación :
 $V = f \text{ (ciclos/seg)} * 60 \text{ (seg/min)} = n \text{ (RPM)}$. Este programa mediante su entorno gráfico nos permite visualizar en el monitor las revoluciones por minuto del motor eléctrico.

Circuito comparador



Junto con el Visual Basic se utilizan los archivos externos: proyecto1.exe, input32.dll y hwinterface.ocx. Los dos primeros archivos nos permiten adaptar el programa a nuestras necesidades y el último lo utilizamos para realizar la medición con el Windows XP.

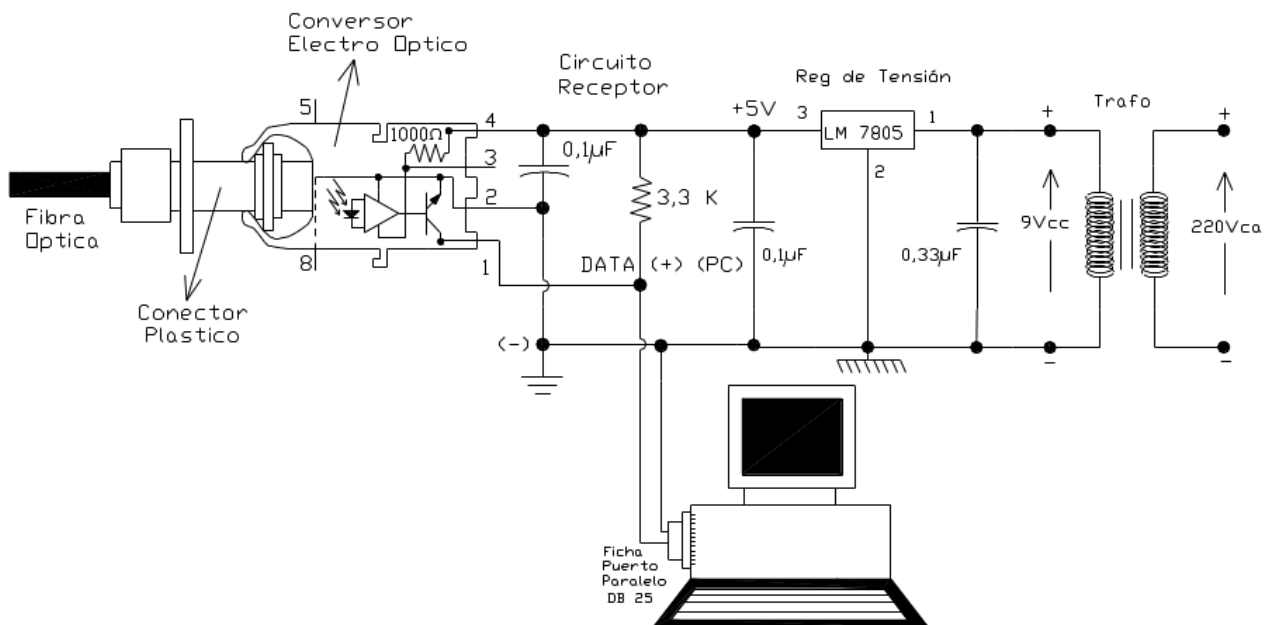


Foto de una vista detallada del circuito receptor

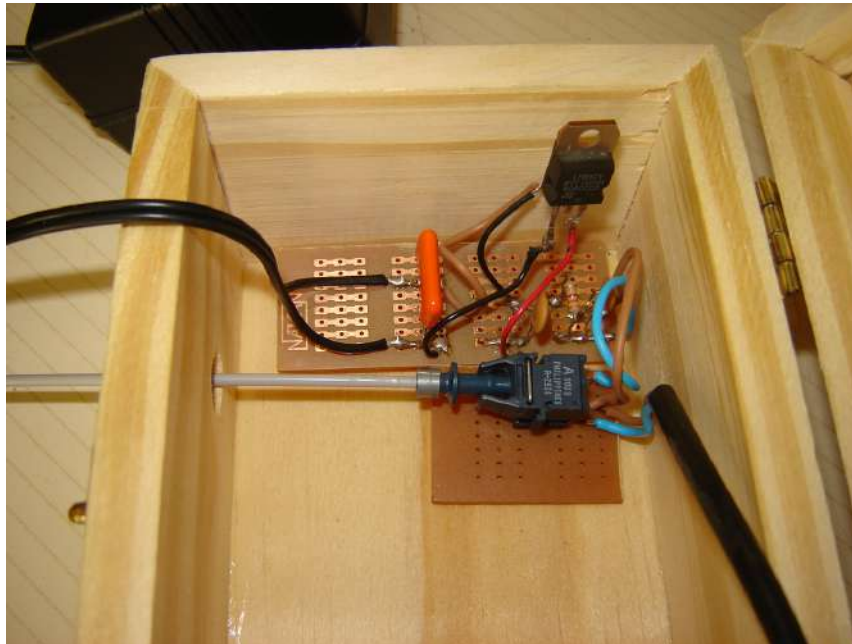


Foto vista desde arriba del circuito receptor

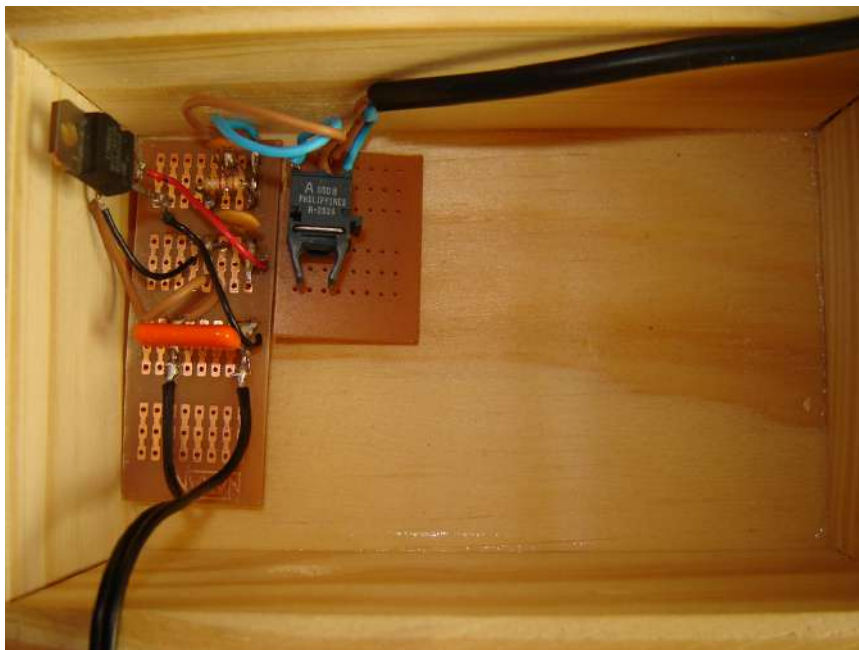
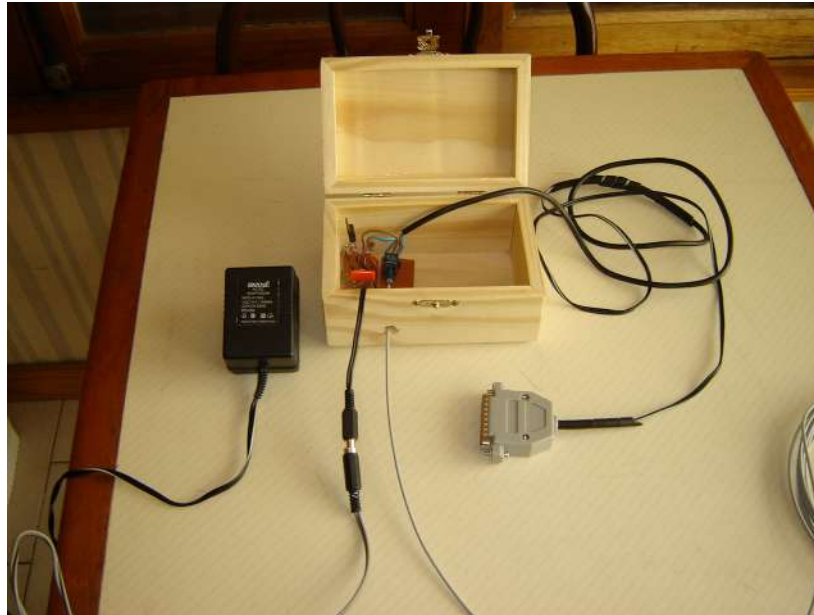


Foto del circuito receptor con la fuente de alimentación
y la ficha de entrada a la PC



Problemas de la medición usando el principio de reflexión de la luz

Luego del ensayo de laboratorio laser mencionado anteriormente y de varios ensayos en el laboratorio de máquinas eléctricas, utilizando la metodología de los ensayos antes descripta y usando el principio de reflexión de la luz en el eje del motor eléctrico y obteniendo como salida del sensor la forma de onda cuadrada deseada, al conectar el circuito receptor al sistema de adquisición de datos obtuvimos en la pc una lectura **inestable e imprecisa**, es decir la lectura variaba y no obteníamos el valor real de las RPM del motor.

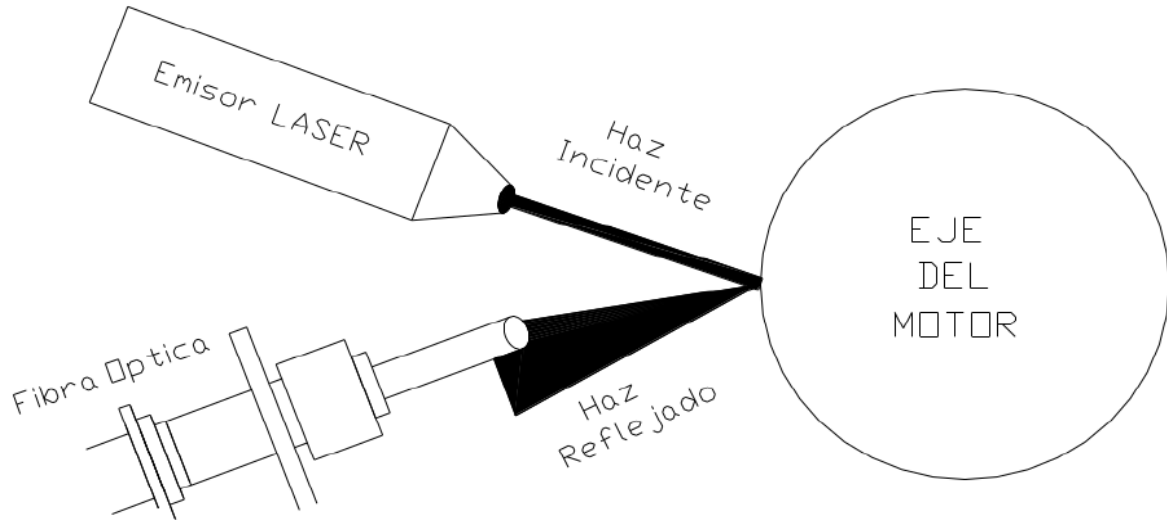
Luego de analizar los resultados de los distintos ensayos pudimos observar que las fallas en la lectura se originaban por diversos motivos, los cuales son:

La superficie reflectante es indeterminada, porque las medidas del elemento reflectante hacen que varíe el ancho del pulso, es decir el ciclo de trabajo de la señal que recibe el sistema de adquisición de datos.

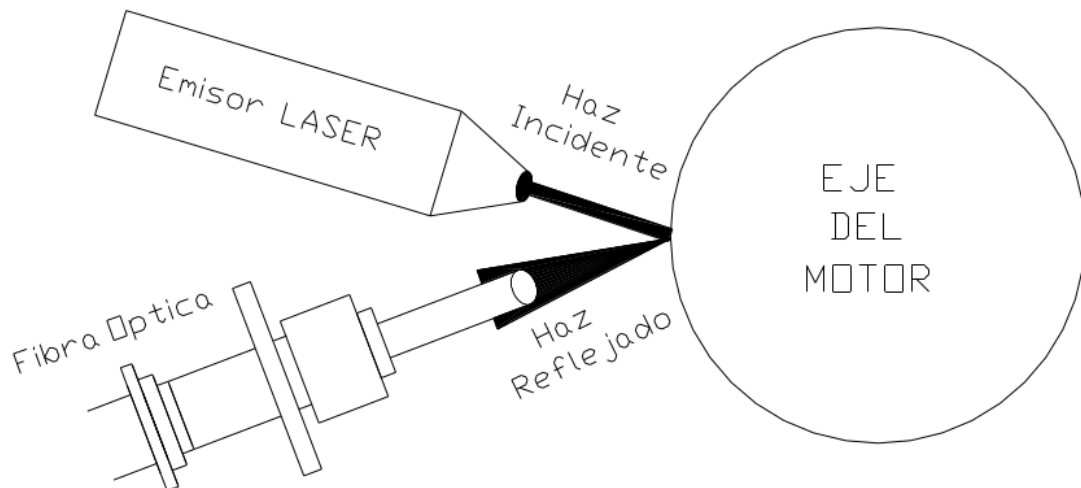
Además de acuerdo a la proximidad del sensor con el eje del motor varia el acoplamiento óptico, como consecuencia de esto viaja más o menos luz por la fibra óptica y esto produce una fluctuación en la lectura.

También hay una gran dificultad en lograr un buen acoplamiento óptico entre el laser y la fibra óptica. La alimentación entre el haz incidente y la fibra óptica es muy dificultoso e incomodo en una medición cotidiana, es decir el ángulo que permite un buen acoplamiento óptico entre el laser y la fibra óptica es difícil de obtener, ya que este depende de cuan cerca coloquemos es sensor del eje del motor, un ejemplo de este problema lo podemos ver en la figura siguiente:

ALEJAMIENTO DEL EMISOR Y EL RECEPTOR DEL EJE



ACERCAMIENTO DEL EMISOR Y EL RECEPTOR DEL EJE



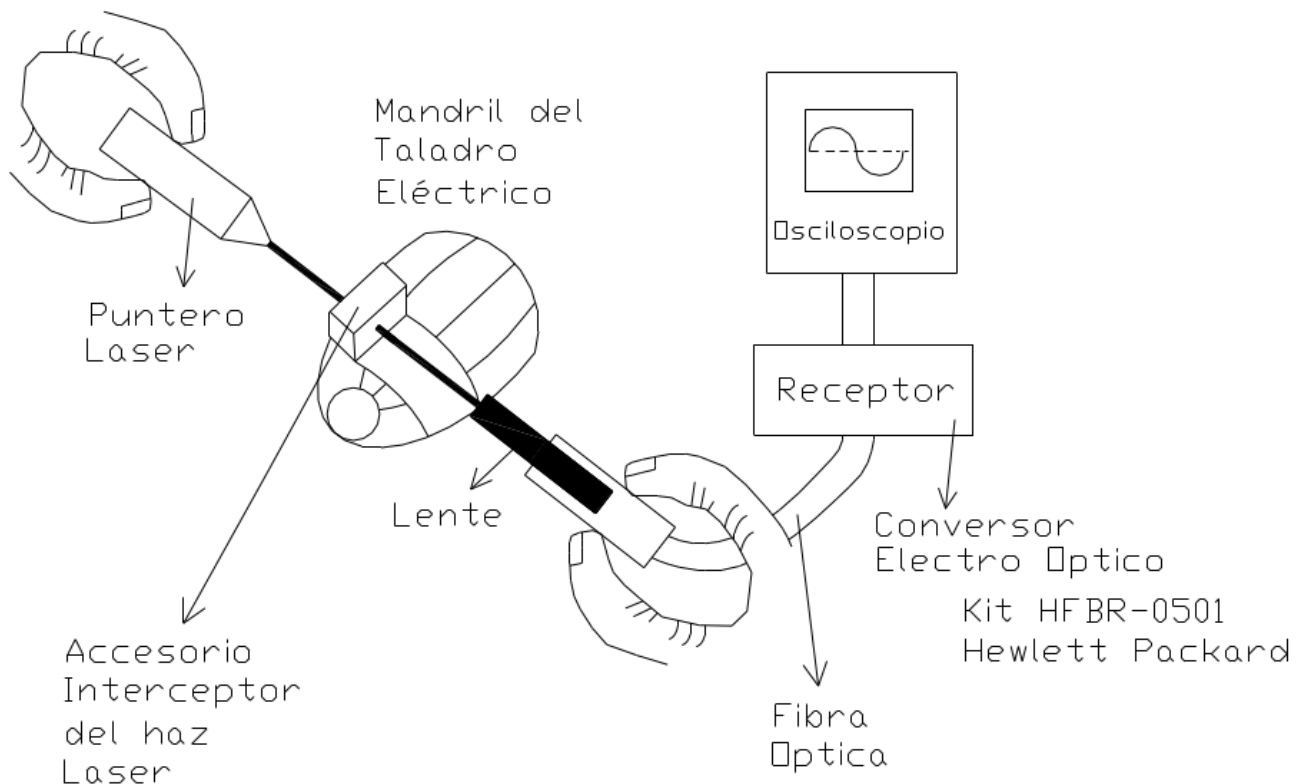
Ensayo laboratorio laser por transmisión de la luz

Para realizar la medición de la velocidad de un taladro eléctrico cuya potencia es de 500 Watts y una velocidad de 1700 RPM, primero adicionamos a la periferia del mandril un cubo de telgopor de aproximadamente dos centímetros de lado (fijado con cinta de papel), el cual cumple la función de interrumpir el haz de luz que recibe la fibra óptica en cada una de las vueltas de la máquina.

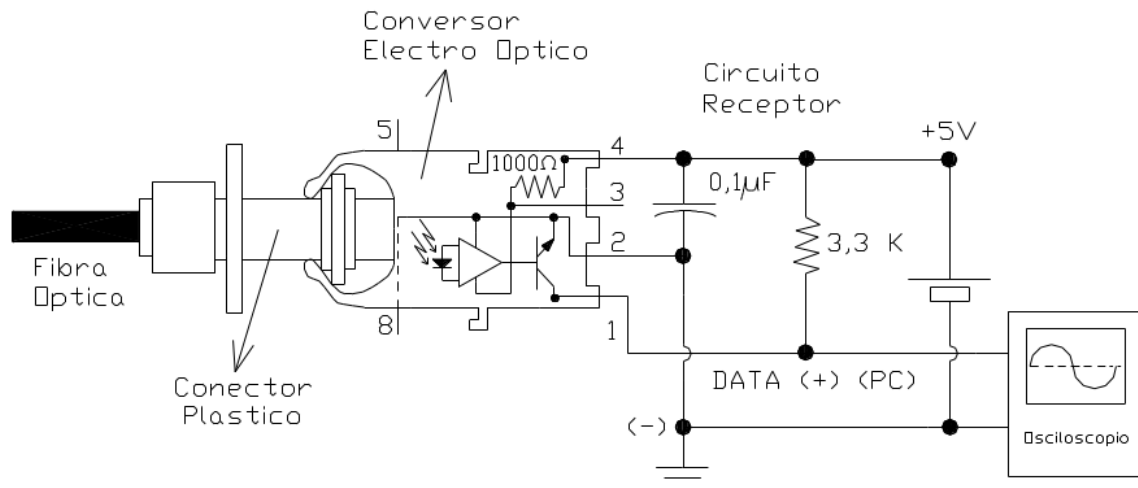
Podemos ver que el cubo interruptor del haz de luz es de un material muy liviano y de pequeñas dimensiones, ya que lo que se busca es que este no afecte el balanceo del mandril.

Para alinear el emisor y el receptor y obtener un buen acoplamiento óptico y así llegar al conversor electro-óptico con un nivel de potencia adecuado (mW ópticos), por ser esta una prueba experimental de laboratorio lo realizamos con las manos, es decir, con la mano acercamos el emisor y receptor al mandril del taladro, podemos observar un esquema del ensayo en la figura siguiente:

Esquema del ensayo por transmisión de la luz



Esquema del circuito receptor

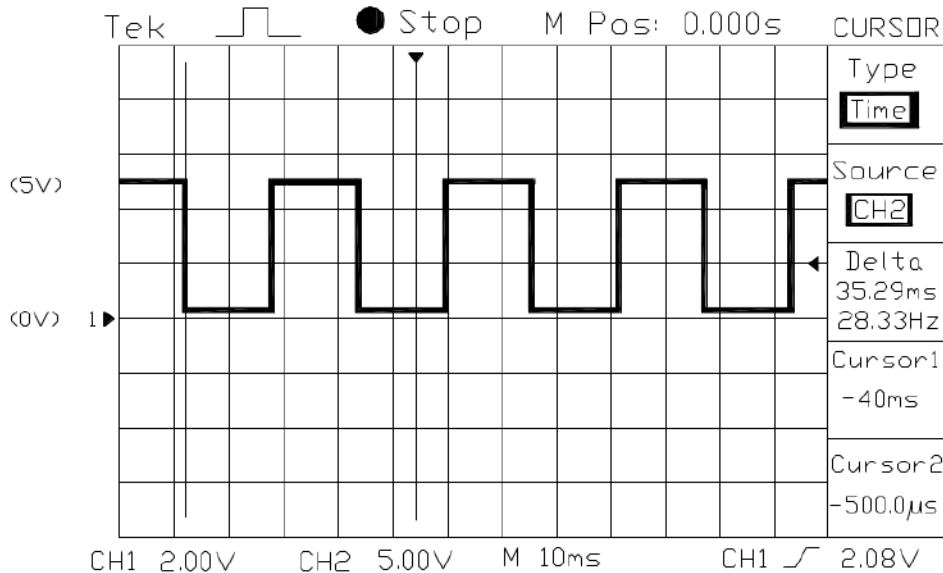


Utilizamos como emisor un puntero laser (diodo laser) alimentado con un tensión 4,5 V, de una potencia de salida de 1mW, el cual emite en una longitud de onda entre 630-680 nm (esta longitud de onda pertenece al color rojo en el rango espectro de luz visible).

Como receptor empleamos la fibra óptica plástica (PMMA), en cuyo extremo va colocado un conector plástico con una lente que cumple la función de enfocar mejor en la fibra la luz recibida por el laser en los momentos en que el cubo que gira solidario al eje del mandril no interrumpe el haz, esta fibra va conectada en su otro extremo a través de un conector plástico a un convertidor opto-eléctrico que forma parte del KIT Hewlett Packard HFBR 0501, este convertidor va unido a un circuito receptor, ambos son componentes de una placa experimental.

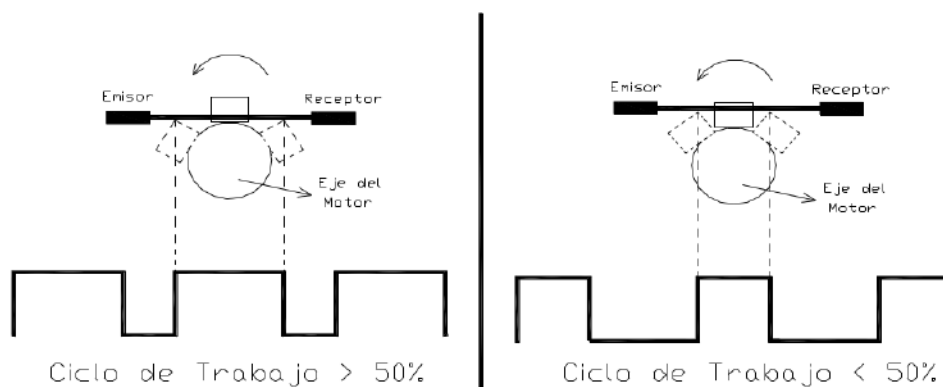
Esta placa la conectamos a un osciloscopio digital, TEKTRONIX TDS 220 de 100 Mhz de ancho de banda. Obtenemos una onda de tensión (V) en función del tiempo (mseg.) de forma rectangular como se observa en la siguiente figura:

Vista de la onda obtenida en el osciloscopio



Podemos observar que el periodo es $T = 35,29$ msec y $f = 1/T = 28,33$ Hz , donde obtenemos la velocidad $V = 28,33$ ciclos/seg * 60 seg/min = **1700 rev/min (RPM)**.

En este ensayo pudimos observar que el ancho del pulso visto en el osciloscopio (el ciclo de trabajo) dependía de la altura del sensor respecto de la parte mas alta del eje del taladro, si el sensor lo colocábamos mas arriba el ciclo de trabajo disminuía, en cambio si lo situábamos mas abajo, el ciclo de trabajo aumentaba y esto es lógico ya que en cada revolución la luz permanecía mas tiempo interrumpida sin llegar a la fibra óptica receptora, ambos casos extremos los podemos ver en la figura siguiente:



Ensayo laboratorio máquinas eléctricas por transmisión de la luz

Para realizar la medición de la velocidad de un motor eléctrico del tipo asincrónico trifásico con las siguientes características:

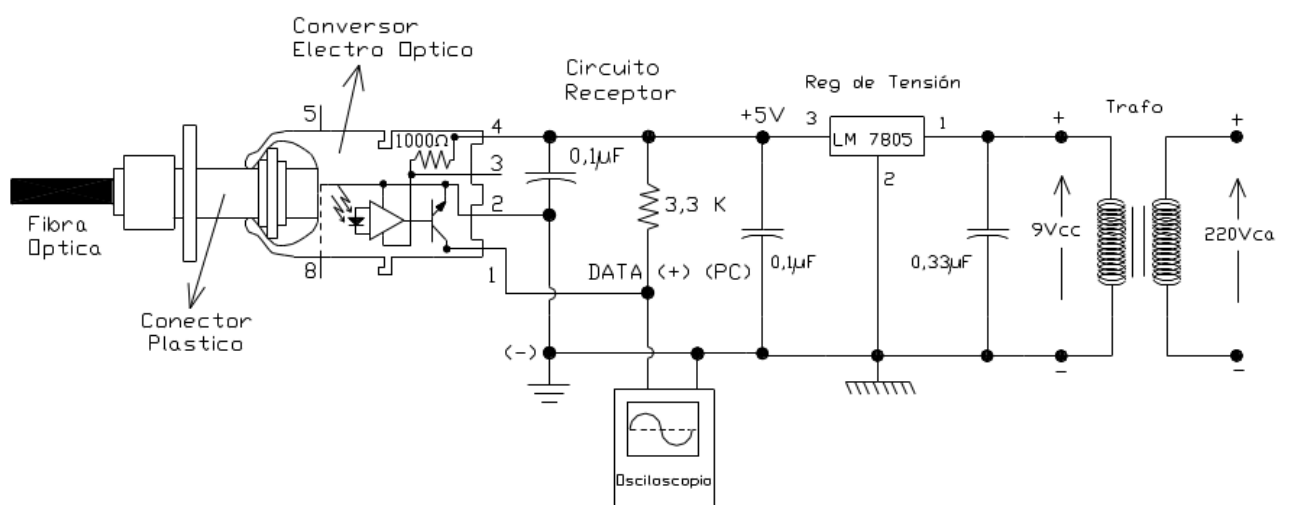
Tipo 112 M4A, 6,5 CV, 1420RPM, de 50 ciclos/segundo, de tensión 380 V en Δ y 660 V en Y, una corriente de 8,3 A en Δ y 4,8 A en Y, $\cos\phi = 0,87$, servicio P, aislamiento clase E, P.33, ubicado en el laboratorio de maquinas eléctricas, primero colocamos un cubo de telgopor con cinta de papel sobre el eje del motor, el cual cumple la función de interrumpir la luz incidente para no ser captada por la fibra óptica receptora.

Para aproximar el emisor y el receptor al eje del motor y conseguir un buen acoplamiento óptico utilizamos el soporte del sensor descrito más adelante.

Utilizamos como emisor un puntero laser (diodo laser) alimentado con un tensión 4,5 V, de una potencia de salida de 1mW, el cual emite en una longitud de onda entre 630-680 nm (esta longitud de onda pertenece al color rojo en el rango espectro de luz visible).

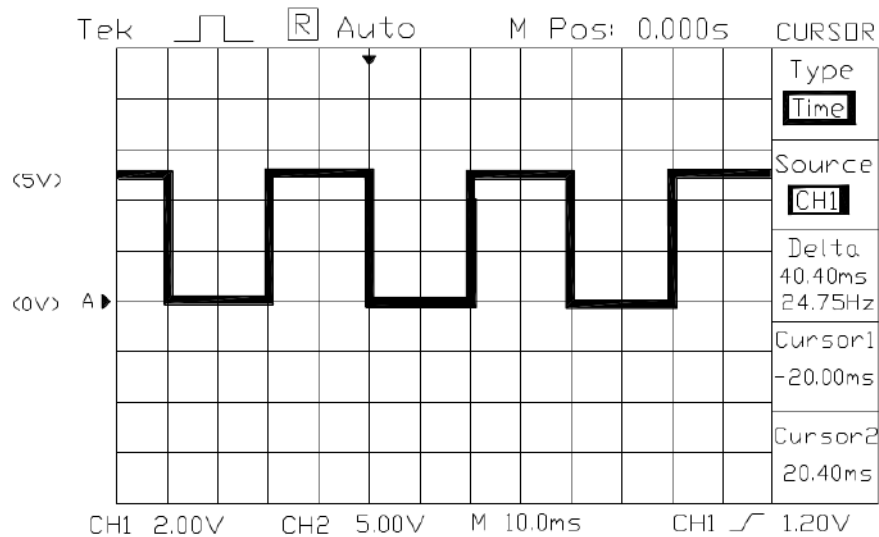
Como receptor empleamos la fibra óptica y un convertor que forman parte del Kit Hewlett Packard HFBR-0501, compuesto por una fibra óptica plástica PMMA (polímero compuesto de poli-metil, meta-acrilato) de 1mm de diámetro con conectores plásticos (lentes) en ambos extremos y un convertor electro-óptico ubicado en el otro extremo de la fibra, ambos conector plástico y convertor están diseñados para tener las menores pérdidas de acoplamiento posibles, este convertor va adosado a una placa cuyo circuito se esquematiza en la figura siguiente:

Convertor electro-óptico y circuito receptor completo



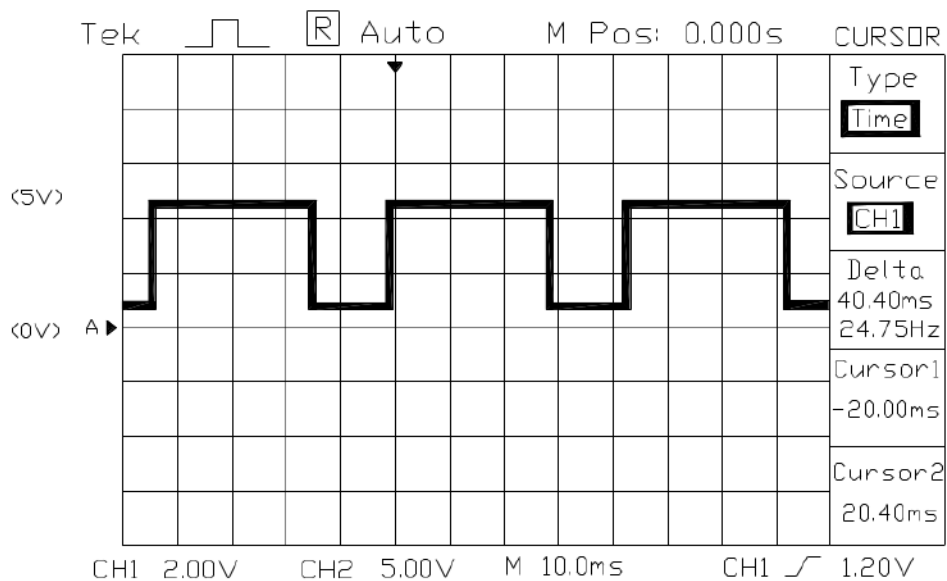


Esta placa la conectamos aun osciloscopio digital, de marca: TEKTRONIX, modelo: TDS 220, con 100Mhz de ancho de banda. Obtenemos una onda de tensión (V) en función del tiempo (mseg.) de forma cuadrada como se observa en la siguiente figura:



Luego aumentando la altura del sensor, es decir colocando el haz de luz mas alejado del eje del motor, obtuvimos un menor ancho del pulso (ciclo de trabajo) como se aprecia en la figura anterior.

En cambio cuando disminuimos la altura del sensor y colocamos el haz de luz casi tangente al eje del motor obtuvimos la forma de onda descrita a continuación:

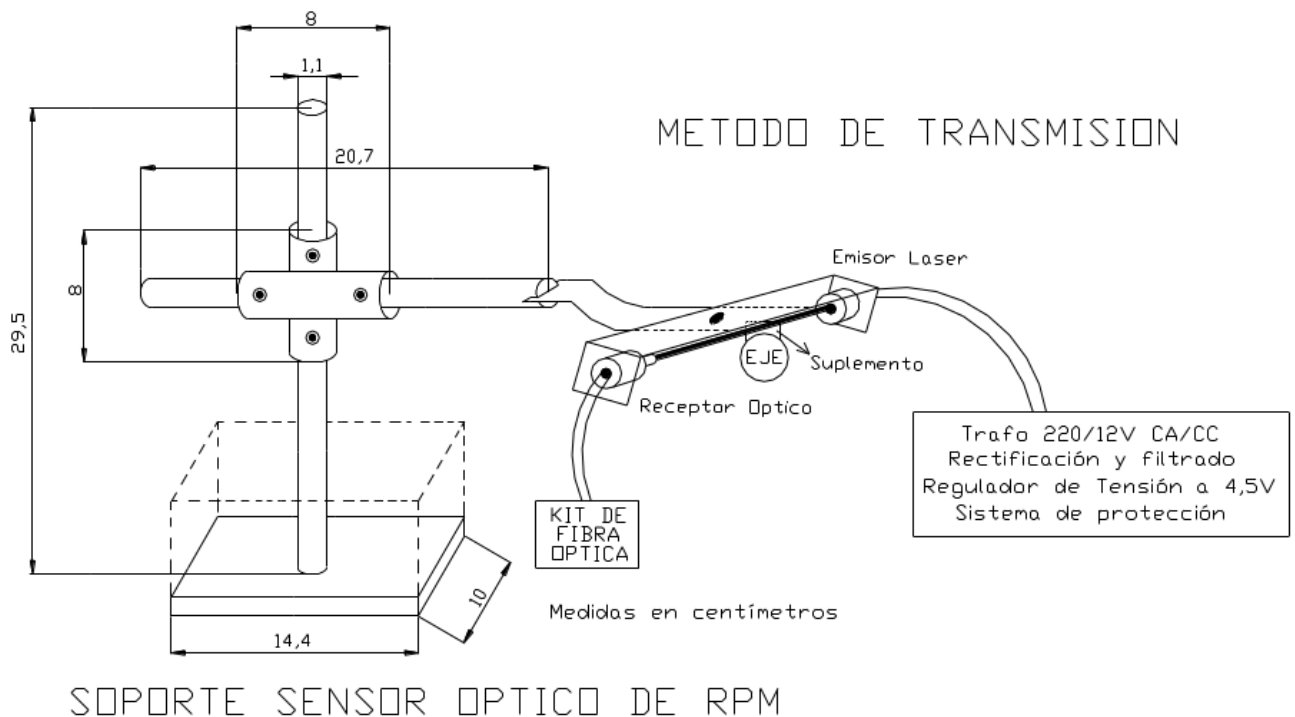




Podemos observar que en los tres casos el periodo no cambia, pero si lo hace el ciclo de trabajo, y lo más importante, **varía la lectura de las RPM ya que esta depende del ancho del pulso (ciclo de trabajo)**. El periodo es $T = 40,40$ mseg y $f = 1/T = 24,75$ Hz , donde obtenemos la velocidad $V = 24,75$ ciclos/seg * 60 seg/min = **1485 rev/min (RPM)**.

Descripción del soporte

Para acceder a los ejes de los distintos motores en forma rápida sencilla y segura, realizamos un soporte de hierro que consta de dos ejes, uno vertical que nos permita fijar la altura y el otro horizontal con el cual logramos el acercamiento deseado al eje. Este eje horizontal, posee en sus extremos el emisor y el receptor de forma que el haz de luz generado por el emisor este alineado con la fibra óptica, el esquema del soporte lo vemos a continuación:



Por último colocamos un interruptor que nos permite manejar la alimentación del emisor.

Utilizamos como receptor una fibra óptica fijada en uno de los extremos del eje horizontal que consta de las siguientes características:

Fibra óptica plástica de 1mm de diámetro de la cubierta (cladding) y 0,98 mm de diámetro del núcleo (core).

Fibra multimodo de índice escalonado.

Material: PMMA (poli-metil, meta-acrilato).

Apertura numérica (NA): 0,5.

Rango de temperatura de operación: -40 °C, 85 °C.

Atenuación típica: 0,22 db/m a 660 nm

Ensanchamiento del pulso: 110 ns/Km

Problemas de la medición usando el principio de transmisión de la luz sin el microcontrolador

Luego del ensayo de laboratorio laser mencionado anteriormente y de varios ensayos en el laboratorio de máquinas eléctricas, utilizando la metodología de los ensayos antes descripta y usando el principio de transmisión de la luz (sin el microcontrolador) en el eje del motor eléctrico y obteniendo como salida del conversor la forma de onda cuadrada deseada, al conectar el circuito receptor al sistema de adquisición de datos obtuvimos en la pc una lectura **inestable e imprecisa**, es decir la lectura variaba y no obteníamos el valor real de las RPM del motor.

Luego de analizar los resultados de los distintos ensayos pudimos observar que las fallas en la lectura se originaban porque encaramos la medición de forma incorrecta ya que desconocíamos las limitaciones que este enfoque de medición tenía.

Análisis de los procesos de medición

Desde un principio, la idea fue utilizar para la medición una computadora personal (PC) de manera de simplificar por un lado la adquisición de datos y por otro las amplias posibilidades de procesamiento que brinda la computadora mediante un software adecuado.

Sin utilizar placas de computadora especiales para adquisición de datos, es decir sólo utilizando los puertos de entrada/salida provistos por la computadora (logrando así el funcionamiento en cualquier máquina estándar), la medición se puede encarar de dos maneras:

- 1 - Que la computadora se encargue de realizar la medición utilizando un hardware sencillo que simplemente convierta la señal provista por el elemento de medida a una señal digital “entendible” por la computadora, la cual se encargará de realizar todo el proceso de medición.
- 2 - Que un hardware preparado se encargue de realizar la medición en todos sus pasos (o la mayoría de ellos) y envíe los datos a la computadora de una manera simple.

El enfoque 1 tiene varias limitaciones:

- En caso de usar puerto paralelo (que es lo más común y sencillo) tenemos un límite de frecuencia de alrededor de 1MHz (velocidad del bus interno donde se encuentra la circuitería del puerto paralelo).
- Necesidad de uso exclusivo del microprocesador de la computadora para realizar la medición. Esto es incompatible con los sistemas operativos modernos multitarea como Windows, Linux o MacOS.

En un principio, al desconocer estos hechos, realizamos el proyecto basándonos en el enfoque 1 utilizando el puerto paralelo. Después de largos ensayos e investigando, nos dimos cuenta de las limitaciones ya comentadas.

Luego, ya decididos por el segundo enfoque, nos informamos de las posibilidades de hardware. La elección fue un microcontrolador marca Microchip modelo PIC16F873. La elección fue por su amplio uso (con la consecuencia de existir mucha información técnica, software y hardware de programación) y reducido costo frente a otras propuestas.

Adquisición de datos con el microcontrolador

Funcionamiento del circuito de adquisición de datos

El circuito consta de tres módulos principales:

- Receptor electro-óptico para fibra óptica
- Microcontrolador. Se encarga de medir la señal digital que llega del receptor óptico y entrega una señal binaria que tiene la información, en forma serie, de la medición realizada.
- Conversor TTL-RS232. Esta etapa final se encarga de convertir los niveles de tensión de la señal entregada por el microcontrolador (según estándar TTL) a las señales de tensión usadas por los puertos serie según el protocolo RS232.

Microcontrolador

El PIC16F873 es uno de los tantos microcontroladores de 8 bits de la empresa Microchip. Sus principales características son:

- CPU RISC (juego reducido de instrucciones): sólo 35 instrucciones
- Instrucciones de ciclo simple (excepto saltos que son de ciclo doble)
- Frecuencia de reloj de entrada: hasta 20MHz
- Memoria de Programa (FLASH): 4096 palabras (14 bits por palabra)
- Memoria de Datos (RAM): 192 bytes
- Memoria de Datos (EEPROM): 128 bytes
- Voltaje de operación: 2V a 5.5V
- 3 puertos (de 8 bits cada uno) de entrada/salida digital/analógica.
- 3 Timers/Contadores
- Módulo USART (transmisión serie).

Por ser en circuito digital secuencial, para su funcionamiento se requiere de una señal de reloj. La forma más habitual de proveerla es utilizando un cristal junto con dos capacitores tipo plate para darle estabilidad a la frecuencia provista. La forma de conexión de estos elementos fue obtenida de la hoja de datos del microcontrolador.

El PIC funciona dividiendo la señal de reloj de entrada por cuatro, para lograr hacer la mayoría de las instrucciones en un solo ciclo. A esta frecuencia (período) la llamamos frecuencia de operación de las instrucciones del PIC, f_{OP} . Es decir que:

$$f_{OP} = f_{CLK} / 4 \quad T_{OP} = T_{CLK} * 4$$

Timer/Contador (TC)

Un TC es un contador hardware que funciona de forma independiente al flujo del programa. La diferencia en los nombres es que el timer cambia de valor (cuenta) según el reloj interno (f_{OP}), mientras que el contador lo hace con una señal de reloj externa.

El Timer 1 (TC1) es de 16 bits (cuenta desde 0000_{16} hasta $FFFF_{16} = 65535_{10}$). Puede operar como timer y contador. Puede generar una interrupción cuando pasa de $FFFF$ a



0000. Tiene 4 selecciones de prescaler: 1:1, 1:2, 1:4 y 1:8. El efecto del prescaler es dividir la frecuencia del reloj de entrada al timer (ya sea interno o externo).

Convertor TTL-RS232

Los niveles de tensión entregados por el puerto RC6 (pin 17) son TTL, es decir 5V para el 1 lógico y 0V para el 0 lógico. El integrado MAX232 se encarga de adaptar estos niveles a los utilizados por el estándar EIA-232E (vulgarmente conocido como RS232) que son desde +3V a +12V para el 0 lógico y desde -3V a -12V para el 1 lógico.

Para la construcción de este módulo se siguió la aplicación típica dada en la hoja de datos.

La salida del MAX232 se conectó al pin 3 (RX, recepción desde el punto de vista de la computadora) del conector DB9.

Software del Microcontrolador

Básicamente el programa debe realizar una medición de período de una señal binaria provista en el puerto RB2 (pin 23) (proveniente del módulo receptor óptico). Existen muchas formas de realizar esto. El enfoque usado consiste en sensar RB2 “buscando” el inicio del período (muestreo). Una vez localizado, se activa el timer 1. Luego, se sigue muestreando hasta localizar el final del período donde se desactiva el timer. La activación del timer 1 hace que se cuenten (hasta su desactivación) pulsos provenientes del reloj interno (más precisamente del prescaler). Con esto logramos medir el período de la señal de entrada. Finalmente, se realiza el proceso de envío de datos en serie.

Cuenta

La cuenta es realizada por el timer 1, usando su variable de cuenta, C, de 16 bits.

Una vez localizado el inicio del período, se inicializa el timer 1 en 0 para que comience a contar (al “ritmo” del reloj interno). Al finalizar el período, el timer 1 tiene un valor de C, ligada directamente con el período de la señal:

$$T = C \cdot 1/f_{\text{TIMER}} \quad (\text{período de la señal a medir})$$

A su vez la frecuencia del timer está dada por la frecuencia interna del PIC dividida por el valor del prescaler. En nuestro caso, con el prescaler configurado en 1:8:

$$f_{\text{TIMER}} = (f_{\text{CLOCK}} / 4) / 8 = f_{\text{CLOCK}} / 32 = 312500 \text{ Hz}$$

Reemplazando:

$$T = C / 312500$$

La elección del prescaler en 1:8 está motivada por la “lentitud” (respecto a la frecuencia del timer) de las señales provistas. Esto establece un mínimo de velocidad medible. Para reducir aún más este límite tendríamos que usar un prescaler mayor (que no es provisto por el microcontrolador) o reducir la frecuencia de funcionamiento general del circuito.

De lo dicho surge una limitación en la mínima frecuencia de la señal a medir debido a la frecuencia del timer y a la cuenta máxima del mismo. Entonces:

$$T_{\text{MIN}} = 65535 / 312500 = 209,712 \text{ ms}$$



$$f_{\text{MIN}} = 312500 / 65535 \approx 4,768 \text{ Hz}$$

$$V_{\text{MIN}} = (312500 / 65535) \cdot 60 \approx 286,1 \text{ rpm}$$

Para los límites máximos, consideramos que se realiza una sola cuenta, entonces:

$$T_{\text{MAX}} = 1 / 312500 = 3,2 \text{ us}$$

$$f_{\text{MAX}} = 312500 / 1 \approx 312500 \text{ Hz}$$

$$V_{\text{MAX}} = (312500 / 1) \cdot 60 \approx 18 \cdot 10^6 \text{ rpm}$$

Estos valores son teóricos considerando un tiempo de muestreo nulo. El tiempo de muestreo implica una limitación en la frecuencia máxima a medir y está dado por:

$$T_{\text{MAX}} \geq 2 \cdot T_{\text{MUESTREO}}$$

En nuestro caso, $T_{\text{MUESTREO}} = 50 \text{ } \mu\text{s}$, con lo que los nuevos límites máximos son:

$$T_{\text{MAX}} = 100 \text{ } \mu\text{s}$$

$$f_{\text{MAX}} = 1 / T_{\text{MAX}} = 10000 \text{ Hz}$$

$$V_{\text{MAX}} = f_{\text{MAX}} \cdot 60 = 600000 \text{ rpm}$$

Muestreo

El muestreo es la función principal del programa. Cada cierto tiempo, X, se verifica el estado de la señal en RB2 para verificar cambios en la misma y así detectar tanto el principio como el fin del período, controlando así la activación o desactivación del timer 1, respectivamente.

El muestreo establece no sólo el límite máximo de medición de frecuencia sino el error de la medida realizada. Directamente:

$$\Delta T = T_{\text{MUESTREO}}$$

Error en la medición

Basándonos en el DT podemos establecer el error de la medición de velocidad haciendo una propagación de errores de:

$$V \pm \Delta V = \frac{60}{T \pm \Delta T} = \frac{60}{T \pm T_{\text{MUESTREO}}}$$

$$\Delta V = \frac{60}{T^2} \cdot T_{\text{MUESTREO}} = \frac{V^2}{60} \cdot T_{\text{MUESTREO}}$$

Con lo que el error en la velocidad medida depende, obviamente, del período medido:



$$\begin{array}{lcl} V = 1500\text{rpm} & \rightarrow & \Delta V = 1,875 \approx 2 \text{ rpm} \\ V = 300\text{rpm} & \rightarrow & \Delta V = 0,075 \approx 1 \text{ rpm} \end{array}$$

Envío de datos

Una vez desactivado el timer 1, se utiliza la rutina de envío de datos en serie, enviándose primero los 8 bits menos significativos y luego los 8 restantes.

El propio PIC se encarga de agregar los bits necesarios para cumplir con el estándar RS232. También se encarga del envío en los tiempos especificados por dicha norma.

Configuramos el puerto RS232 del PIC con los siguientes datos:

- 8 bits de datos (es decir que se requieren dos envíos en nuestro caso)
- 1 bit de stop
- Sin paridad (un método de control de errores que, dada la distancia usada y su efectividad limitada, no lo usamos).
- Velocidad de 9600 bits por segundo (velocidad muy común).

Tiempo entre mediciones

Ya se conocen los límites máximo y mínimo de frecuencia y el error. Falta especificar el tiempo entre mediciones. Este valor es variable, dependiendo del período de la señal medida y del tiempo que se necesita para enviar los datos a la computadora, despreciando los tiempos necesarios para ejecutar las instrucciones del programa.

Tenemos entonces, un período de la señal a medir, luego un tiempo de envío de datos, pero durante el envío de datos ya comenzó el siguiente período de la señal de entrada con lo que dicho período no se medirá. Por lo tanto, cada medición toma 2 períodos de la señal a medir. En esto consideramos que el tiempo de envío de datos es menor que el período de la señal medida. Por tanto, el tiempo entre mediciones es:

$$t_M = 2 \cdot T$$

Veremos el valor del tiempo de envío para saber si nuestra consideración es correcta:

$$T_{\text{envio}} = (10 \text{ bits} / 9600 \text{ bit/seg}) \cdot 2 \approx 2,09\text{ms}$$

Para que la consideración sea válida, la velocidad máxima tiene que ser de:

$$V \leq 60 / T_{\text{envio}} = 28800 \text{ rpm}$$

Esto significa que para las mediciones habituales la consideración es totalmente válida.

Software de Computadora

El circuito de adquisición envía datos de 16 bits a la computadora, siendo este dato la cuenta, C, realizada por el PIC. Podríamos haber enviado a la computadora directamente el valor del período en vez de la cuenta. Pero al tener que trabajar con números reales, es



decir trabajar en el PIC con números en coma flotante, complicaríamos el programa del PIC además de alargar el tiempo entre mediciones.

Por tanto el programa, básicamente, se encarga de obtener todos los números de 16 bits que llegan al puerto, aplicarles un factor de conversión y mostrar los valores en pantalla en distintas unidades.

Sabiendo que:

$$T = C / 312500 \text{ (periodo de la señal a medir)}$$

El factor de conversión será $1/312500 = 3,2 \cdot 10^{-6}$. Como decidimos trabajar todo en microsegundos, el factor usado en el programa es 3,2. Luego, multiplicando por otros factores, obtenemos la velocidad en RPM y el período en milisegundos.

Ensayo laboratorio máquinas eléctricas por transmisión de la luz con microcontrolador

Para realizar la medición de la velocidad de un motor eléctrico del tipo asíncrono trifásico con las siguientes características:

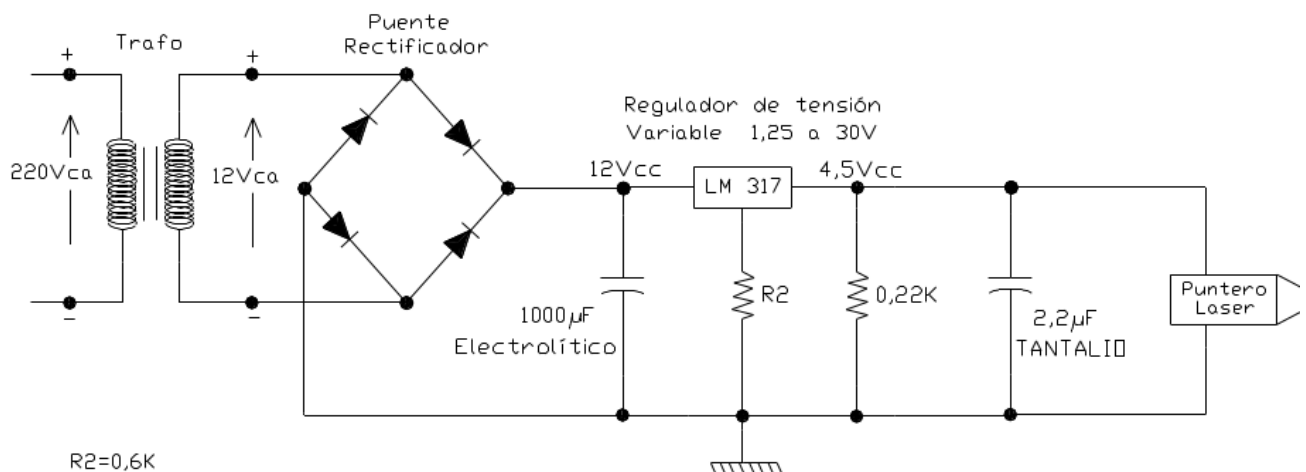
Tipo 112 M4A, 6,5 CV, 1420RPM, de 50 ciclos/segundo, de tensión 380 V en Δ y 660 V en Y, una corriente de 8,3 A en Δ y 4,8 A en Y, $\cos\phi = 0,87$, servicio P, aislamiento clase E, P.33, ubicado en el laboratorio de maquinas eléctricas, primero colocamos un cubo de madera con belcro en el eje del motor, el cual cumple la función de interrumpir la luz incidente para no ser captada por la fibra óptica receptora en cada revolución del eje.

Para aproximar el emisor y el receptor al eje del motor y conseguir un buen acoplamiento óptico utilizamos el soporte del sensor descrito más adelante.

Utilizamos como emisor un puntero laser (diodo laser) alimentado con un tensión 4,5 V, de una potencia de salida de 1mW, el cual emite en una longitud de onda entre 630-680 nm (esta longitud de onda pertenece al color rojo en el rango espectro de luz visible).

La alimentación con tensión continua de 4,5 V al puntero laser la realizamos con un circuito que consta básicamente de un transformador, un rectificador y un filtro capacitivo a la entrada y uno a la salida, el capacitor de tantalio ubicado en la salida absorbe mejor los picos de tensión que puedan producirse en la línea y con esto protege mejor al laser que los condensadores comunes. El esquema del circuito lo podemos ver en la figura siguiente:

Circuito de alimentación del emisor laser



Cálculo de la resistencia R2 del regulador de tensión que alimenta al laser

Nuestra tensión de salida V_{out} del circuito regulador de tensión es la tensión de entrada del laser (4,5V) que es la tensión buscada en nuestro calculo.

Utilizamos la siguiente ecuación:

$$V_{out}=1,25(1+R2/R1)$$

$$R1=0,22K \quad V_{out}=4,5V$$

Despejo R2:

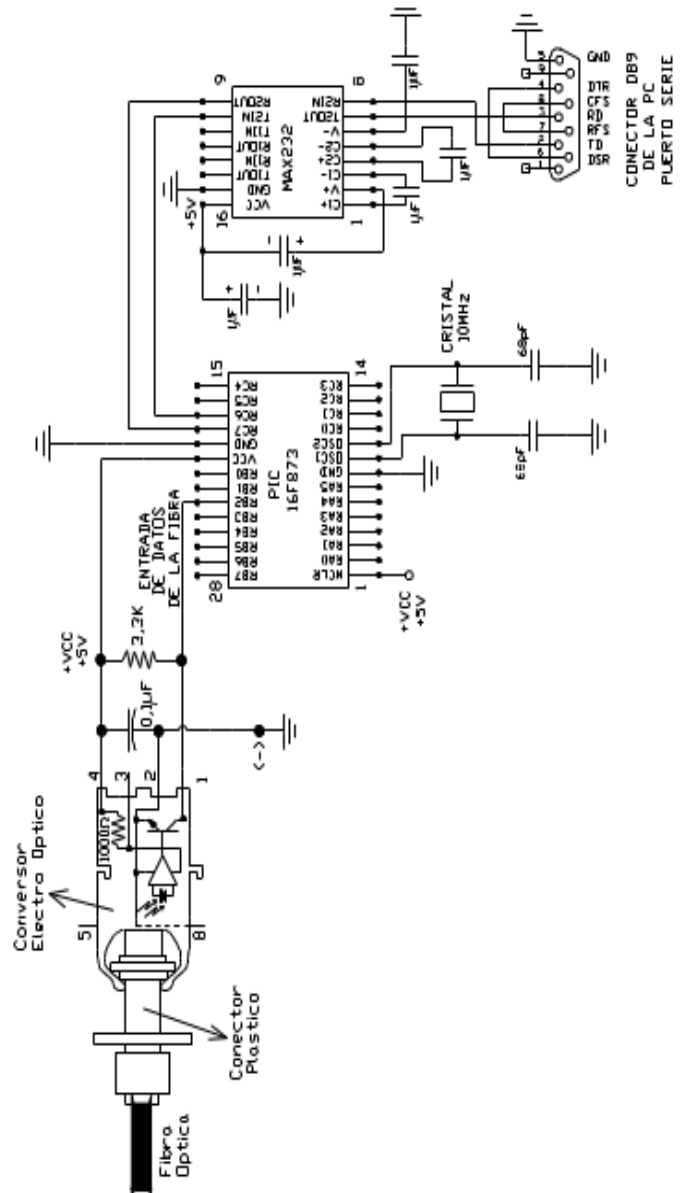
$$R2=0,22K(4,5v/1,25-1)=0,572k$$

Para $R1=0,22K$, R2 vale 0,572K como esta resistencia no existe en el mercado, uso el valor más próximo superior: 0,6K y vuelvo a calcular la V_{out} :

$$V_{out}=1,25(1+0,6K/0,22K) \rightarrow \mathbf{V_{out}=4,66V}$$

Como receptor empleamos la fibra óptica y un conversor que forman parte del Kit Hewlett Packard HFBR-0501, compuesto por una fibra óptica plástica PMMA (polímero compuesto de poli-metil, meta-acrilato) de 1mm de diámetro con conectores plásticos (lentes) en ambos extremos y un conversor electro-óptico ubicado en el otro extremo de la fibra, ambos conector plástico y conversor están diseñados para tener las menores pérdidas de acoplamiento posibles, este conversor forma parte de una placa de adquisición de datos que consta básicamente del conversor electro-óptico propiamente dicho, de un microcontrolador(PIC 16F873) y de un circuito integrado (MAX 232). El circuito de la placa de adquisición de datos se esquematiza en la figura siguiente:

Conversor electro-óptico y circuito receptor completo con microcontrolador





Tanto el emisor como el receptor son desmontables del soporte, el puntero posee una ficha para conectarlo con el circuito de alimentación.

Realizamos tres ensayos variando la altura del laser y la fibra óptica.

Primero colocamos el haz laser en una altura intermedia entre el eje y el extremo del elemento interruptor de luz (cubo de madera) y realizamos la medición de la velocidad.

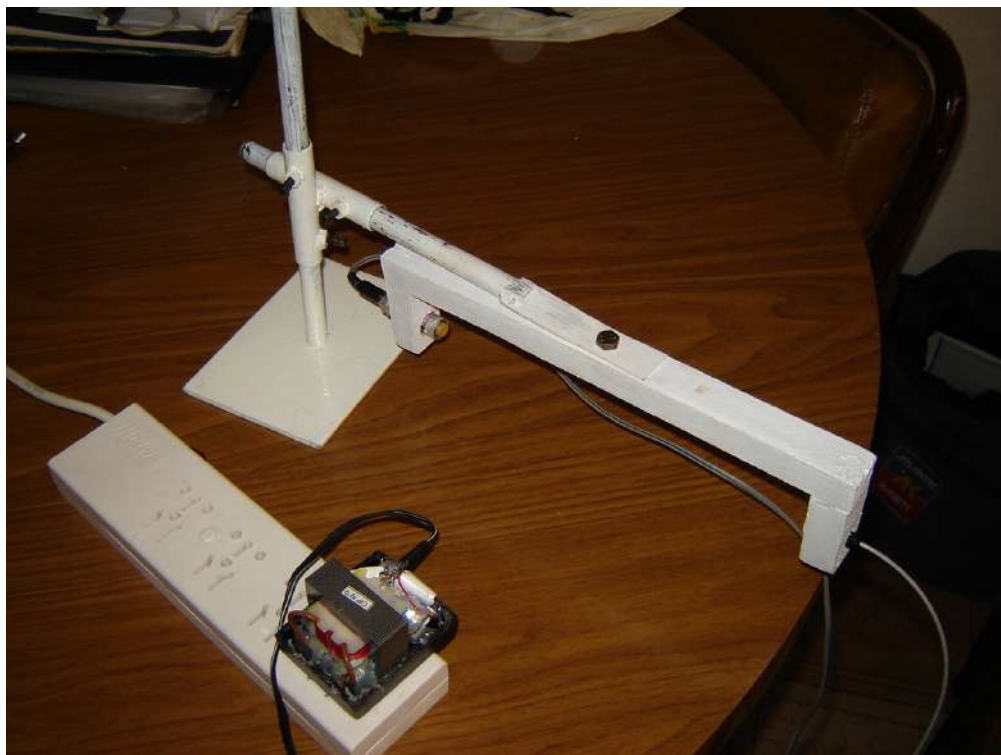
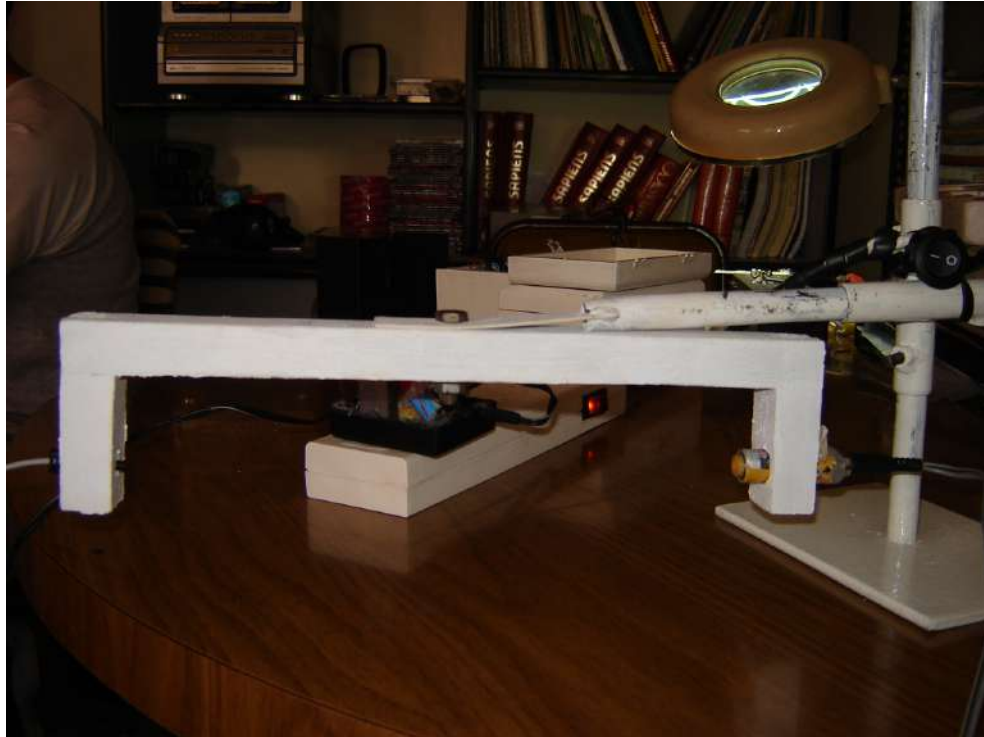
Luego aumentamos la altura del sensor, es decir colocando el haz de luz mas alejado del eje del motor (cerca del punto más alto del elemento que interrumpe el haz de luz), que corresponde a un menor ancho del pulso (ciclo de trabajo).

Por último disminuimos la altura del sensor y colocamos el haz de luz casi tangente al eje del motor (mayor ciclo e trabajo).

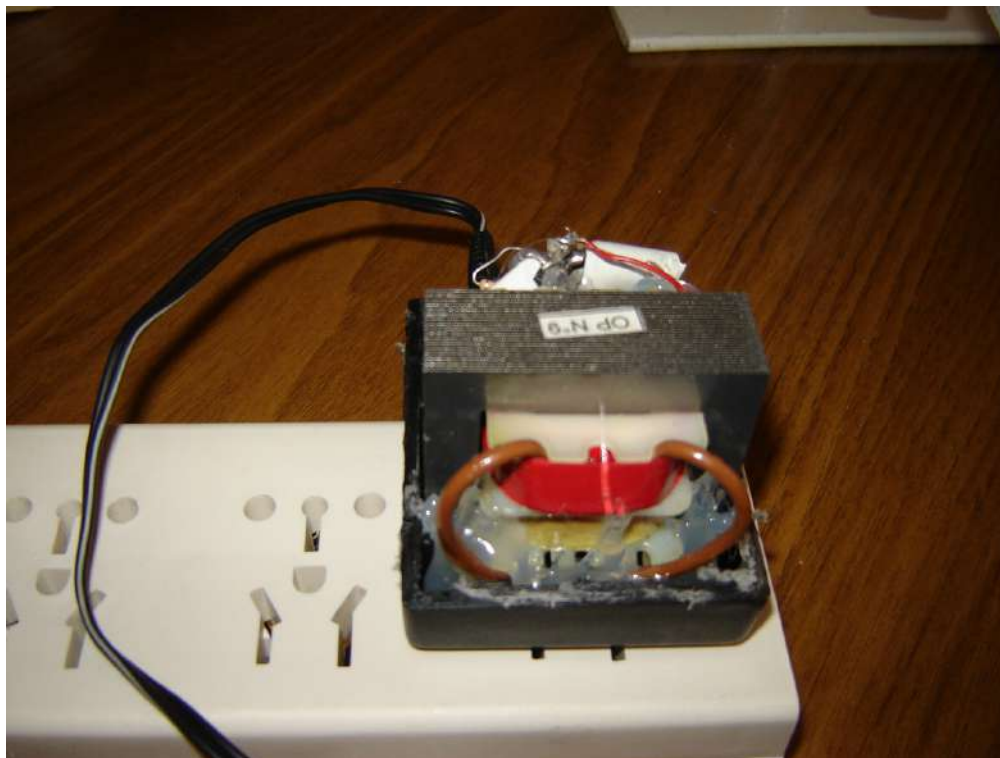
Podemos observar que en los tres casos el periodo no cambia, pero si lo hace el ciclo de trabajo, y lo más importante, no varía la lectura de las RPM ya que esta es independiente del ancho del pulso. Obtuvimos un periodo de $T = 40,40$ mseg, una frecuencia de $f = 1/T = 24,75$ Hz ,y una velocidad $V = 24,75$ ciclos/seg * 60 seg/min = 1485 rev/min (RPM).

Que la medición no varíe con la altura del emisor-receptor es muy importante ya que la misma no es igual en cada medición porque depende de la altura que le de el usuario al brazo emisor-receptor en el momento de realizarla.

Fotos del soporte del Medidor de RPM:



Fotos del circuito de alimentación del Laser:



Fotos del circuito de adquisición de datos:



Evaluación económica

El costo de nuestro proyecto final está directamente ligado a los distintos componentes que forman el medidor de velocidad de motores eléctricos, los principales elementos constitutivos son:

- El Kit de fibra óptica Hewlett Packard HFBR-0501 compuesto por una fibra óptica plástica PMMA (polímero compuesto de poli-metil, meta-acrilato) de 1mm de diámetro con conectores plásticos (lentes) en ambos extremos, un conversor electro-óptico y un conversor ópto-eléctrico.
- La placa de adquisición de datos, formada básicamente por un microcontrolador (PIC 16F873), un circuito integrado (MAX232).
- El soporte sensor.
- El emisor laser.
- Circuito de alimentación del laser cuyos elementos son: un transformador (220V/12V), un rectificador y un filtro capacitivo a la entrada y uno a la salida del regulador de tensión.

Detalles de los costos

Kit de fibra óptica Hewlett Packard HFBR-0501	\$ 183
PIC 16F873	\$ 38
MAX232	\$ 17
Cristal de 10 Mhz	\$ 6
Regulador variable de tensión LM317	\$ 14
3 Capacitares electrolíticos	\$ 2,4
1 Capacitor de tantalio	\$ 1,3
Conector DB9 (puerto serie)	\$ 11
Gabinete metálico de 10 x 10	\$ 13,5
Placa de cobre de simple face	\$ 4,5
Transformador 220/9V	\$ 13,8
Transformador 220/12V	\$ 13,8
4 diodos rectificadores	\$ 3,2
1 resistencia 0,22 K	\$ 0,15
1 resistencia 0,6 K	\$ 0,15
Puntero Laser	\$ 6,8
Soporte sensor	\$ 7,8
5 tornillos soporte	\$ 1,5
2 fichas macho-hembra tipo audio	\$ 1,6
Ficha macho 220V con 1 metro de cable de 2x1	\$ 2,5
Total Medidor RPM	\$ 342



Medidores de RPM digitales

Tacómetro de mano óptico DT 6234 B (Marca Sheitler)	\$ 180
Tacómetro de mano SMT 200 C (Marca Sheitler)	\$ 720
Tacómetro PCE-T236 (Marca PC Group)	\$ 660
Tacómetro PCE-151 (óptico y de contacto) (con conexión RS 232)	\$ 900
Medidor de revoluciones laser PCE-155 (Marca PC Group)	\$ 860
Medidor de revoluciones laser PCE-155 KIT (Marca PC Group)	\$ 1396
Tacómetro estroboscopio DT-2259 (Marca Sheitler)	\$ 1160
Tacómetro contador digital PAX I (Marca Sheitler)	\$ 1084
Medidor de velocidad de ejes rotantes DT-2857 (hasta 1000rpm)	\$ 450
Tacómetro de contacto y óptico PLT-5000 (Marca Sheitler)	\$ 807
Tacómetro óptico sin contacto CDT-1000 (Marca Sheitler)	\$ 540
Tacómetro de contacto DT-105 A y DT-107 A (Marca Sheitler)	\$ 825
Tacómetro Marca Controles (hecho en uruguay) (hasta 300 RPM)	\$ 380

Teniendo en cuenta la mano de obra de un operario para realizar el soporte de alrededor de \$80 y la de un técnico electrónico para realizar la placa de adquisición de aproximadamente unos \$100. Llegamos a un costo total de **\$522**.

Comparando el valor de nuestro medidor de RPM, con otros disponibles en el mercado, vemos que su precio es menor al de la mayoría, con la ventaja que el mismo puede guardar el historial de valores medidos en la PC, a través de la creación de un archivo Excel para almacenar los datos.

Vemos que el precio de un medidor comercial con la posibilidad de guardar las mediciones en la PC (Tacómetro PCE-151, óptico y de contacto, con conexión RS 232)

Es de \$900.

Como conclusión de nuestra evaluación económica podemos mencionar que el medidor de RPM tiene un costo menor a uno disponible comercialmente de similares características, además su precio es comparable en la mayoría de los casos a los tacómetros comerciales en venta en la actualidad.

Sitios Web con los datos de los medidores de RPM digitales

<http://www.controles.com/espanol/Automatismos/pdf/contprog/MED-RPM.pdf>

<http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-revolucion/medidor-estroboscopio.htm>

http://www.pce-iberica.es/tienda-online/index.html?target=dept_39.html

<http://www.scheitler.com.ar/Ofertas/DetallesNuevo.asp?>

G=Tacometros&IdOferta=322&IdRubro=102

<http://www.abq-instrumentos.com/tacometro/index.html>

Impacto ambiental

El objetivo de cualquier estudio de impacto ambiental es identificar los efectos que puede causar cualquier proyecto sobre el ambiente, estimar la magnitud de esos efectos y prevenirlos, si es posible evitarlos o minimizarlos.

Para poder evaluar correctamente el impacto ambiental de cualquier proyecto, es indispensable proyectar el modo en que la nueva acción modificará el territorio. Para esto, es imprescindible conocer el diseño completo del nuevo proyecto, para poder describir las etapas de preparación del sitio, instalación, operación y abandono. Esta tarea de describir el territorio modificado tiene dos grandes componentes: uno llamado instancias descriptivas, en donde se describen el medio abiótico, biótico y cultural, y la otra parte son las instancias de integración e interpretación de toda la información que se ha recabado. Las evaluaciones de impacto ambiental, así como las que apoyan el ordenamiento del territorio, sirven para alimentar a las instancias de decisión, es decir, no son una instancia de decisión en sí misma, sino que ayudan a los niveles autorizados para tomar decisiones informadas.

Cuando hablamos de residuo, nos referimos a toda aquella sustancia, elemento u objeto que el usuario elimina, se propone eliminar o esta obligado a hacerlo.

Y un residuo peligroso es todo aquel residuo o mezcla de residuos que presenta riesgos para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto, como consecuencia de presentar algunas de las siguientes características:

Toxicidad aguda, toxicidad crónica, toxicidad extrínseca, inflamabilidad, reactividad y corrosividad.

Las operaciones de eliminación de estos residuos peligrosos se dividen en dos partes:

- 1) Aquellas que no conducen a la recuperación de recursos, el reciclaje, la regeneración, el reuso u otros casos.
- 2) Aquellas que pueden conducir a la recuperación de recursos, el reciclaje, la regeneración, el reuso u otros casos.

-Características de la fibra óptica

La fibra optica utilizada en nuestro proyecto (fibra óptica plástica PMMA (polímero compuesto de poli-metil, meta-acrilato) utilizada en también en iluminación, es un producto ecológico de última generación, cuyas características principales son:

Bajo consumo, durabilidad, seguridad, atractivo visual, escaso mantenimiento, fácil instalación y una de las características principales es la luz fría, es decir, no transmite rayos UV ni IR, con la cual la iluminación no afecta a la temperatura ambiente, sin afectar el gradiente térmico.

Estas características la diferencian de todo sistema convencional y se aprecian desde el punto de vista tecnológico, operativo, funcional y estético.

La norma IEEE realizo recientemente un trabajo sobre el impacto ambiental de la llamada “contaminación electrónica”, producida por los desechos de los microcomponentes tales como transistores bipolares de juntura, transistores de efecto de campo, zener, amplificadores operacionales, todo tipo de resistencias y capacitores y circuitos integrados en general, poniendo especial énfasis en la deposición final de estos residuos.



Las fibras ópticas al estar construidas con polímeros de tecnología espacial y poseer protección contra los rayos ultravioletas e infrarrojos, da como resultado una vida útil ilimitada y totalmente inocua al medio ambiente.

Conclusiones

La fibra óptica permitirá que sean transferidos de un punto a otro más información y datos, de la forma más rápida y precisa de lo que nunca se hubiese imaginado. Llegarán a ser como un cable convencional, fáciles de construir con las tolerancias precisas de gran exactitud e infatigables, formando una especie de circuito “permanente” que mejora nuestra forma de vida.

En el corto plazo el cable convencional que conocemos quedará obsoleto en las comunicaciones y transmisiones de datos. Por lo tanto los conocimientos que se adquieran sobre fibra óptica, fuentes de luz, receptores y elementos de control de luz significará un importante progreso dentro de la ciencia e ingeniería del futuro.

Con nuestro proyecto pudimos ver como se pueden realizar de forma relativamente sencilla un sensor para la medición de las RPM de un motor eléctrico utilizando solo la fibra óptica sin necesidad de un transductor electromecánico y sin adicionar ningún elemento internamente al motor, además observamos las enormes ventajas que presenta la fibra óptica en aplicaciones de monitoreo de magnitudes mecánicas por su bajo peso, diámetro y su bajo costo, con la gran ventaja que presenta para la transmisión de datos su gran ancho de banda y sobre todo la total ausencia de interferencias electromagnéticas, un flagelo hasta ahora insalvable en la transmisión de datos en la industria.

Básicamente realizamos en nuestra tesis tres tipos de formas de mediciones primero utilizamos la reflexión de la luz en el eje del motor que teóricamente era muy sencilla de realizar, ya que es el método más común de los medidores actuales. pero nos encontramos con la dificultad de que la lectura dependía de cuan cerca esté el sensor de la parte reflectante del eje del motor (de la distancia entre el sensor y el eje del motor), que era muy incomoda desde el punto de vista practico la alineación del emisor y receptor para lograr un buen acoplamiento óptico entre los mismos y que además la lectura variaba con el ancho del elemento reflectante.

Luego cambiamos a la transmisión de luz en la cual el emisor y receptor estaban enfrentados y alineados con lo cual nos asegurábamos de forma fácil un buen acoplamiento óptico, pues a simple vista veíamos cuando la luz incidía perfectamente en el núcleo de la fibra, pero el problema consistía ahora en la adquisición de datos ya que al conectar la placa de adquisición al puerto paralelo de la computadora y utilizar un software específico para realizar la cuenta de las RPM este usaba los recursos de Windows que es un sistema operativo multitarea y esto desestabilizaba y hacia imprecisa la lectura.

Por último recurrimos a realizar la adquisición de datos en forma externa al CPU, es decir realizábamos el conteo de los pulsos con un microcontrolador (“mini” CPU independiente). Con esto logramos una total independencia de nuestro medidor con el sistema operativo de Windows, lo que se reflejaba en una lectura precisa y de gran estabilidad de la velocidad del motor eléctrico.



Referencias

- Introducción a la fibra óptica y el láser (Edward L. Safford).
- Fibra óptica (Sr. Lennart Lija de Estocolmo – Suecia ; para L. M. Ericsson)
- Sistemas de comunicación (A. Bruce Carlson).
- Ondulatoria Elemental (Dr. Daniel R. Avalos , Dra. Hilda A. Larrondo).
- Física (Paul A. Tipler).
- Introducción a los sistemas de comunicaciones y sensores basados en fibra óptica (Dr. Ricardo Duchowicz).
- Curso: Aplicaciones de las fibras ópticas: Sistemas de comunicaciones de alta calidad (Dr. Ricardo Duchowicz, ing. Sergio Noriega).

Sitios de Internet

www.monografias.com
www.elkonet.com
www.analiticasa.com.ar
www.facalu.com.ar
www.gruposchneider.com.ar
www.siemens.com
www.sica.com
www.arturosoria.com
www.radioptica.com
www.usuarios.lycos.es/fibra_optica
www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/tec_007520-08
www.pofto.com
www.mostcooperation.com
www.agilent.com
www.goodworkint.com/?gclid=COSDt9OWkokCFQVMVAodJ2fK_w
www.ub.es/javaoptics/applets/fibraEs.jnlp
www.yio.com.ar/fo/