



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

T E S I S

ENLACE Y APLICACIÓN DE FIBRA ÓPTICA
BASADO EN MICROCONTROLADOR

PRESENTA

JESÚS URIEL BALTAZAR HERNÁNDEZ

PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA

ASESOR

DR. EN CIENCIAS GILBERTO GONZALEZ AVALOS



MORELIA, MICHOACÁN, ENERO DE 2016

Agradecimientos

A mis padres Josefina y Manuel

A mis hermanos: Leticia, Maribel, Jovita, Hortensia, Daniel y Rodrigo.

A mis cuñados: Marcelino, Lázaro, Pedro y Enrique.

A mi asesor, el Dr. Gilberto Gonzales Avalos.

*A todos los profesores de la Facultad de los que aprendí mucho en todo el transcurso de la
carrera.*

*A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pero sobre todo
a la Facultad de Ingeniería Eléctrica.*

A mis grandes amigos y compañeros de la facultad: Marisela y Miguel (Kevin)

A mis camaradas: Miguel Ángel, Uriel y Juan Pablo.

A Hortensia y Maritza.

A Miriam

A todos ellos gracias!!.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis amados padres:

Josefina Hernández Cárdenas

y

Manuel Baltazar Cortes

Índice

Agradecimientos	ii
Dedicatoria.....	iii
Índice	iv
Resumen	vii
Palabras Clave	vii
Abstract.....	viii
Keywords.....	viii
Lista de figuras	ix
Glosario de términos.....	xii

Capítulo 1 Introducción1

1.1 Tecnologías actuales Microcontrolador-Fibra óptica	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Justificación	3
1.4 Metodología	4
1.5 Contenido de la Tesis.....	4

Capítulo 2 Antecedentes de fibras ópticas5

2.1 Introducción	5
2.2 Sistema de comunicación por fibra óptica	6
2.3 Historia de la fibra óptica.....	7
2.3.1 Uso de la luz como medio de comunicación en la antigüedad	7
2.3.2 Los primeros experimentos e invención de la fibra óptica	7
2.3.3 Las primeras aplicaciones y nuevos descubrimientos	8
2.4 Investigaciones en la actualidad.....	10
2.5 Características de la fibra óptica	10

2.5.1	Principio de funcionamiento.....	10
2.5.2	Ángulo de aceptación.....	13
2.5.3	Apertura numérica	14
2.5.4	Rayos oblicuos.....	17
2.6	Tipos de fibra óptica	18
2.6.1	Fibra multimodo	18
a)	Fibras multimodo de índice de paso.....	18
b)	Fibras multimodo de índice graduado.....	19
2.6.2	Fibra monomodo	20
2.6.3	Otro tipo de fibras.....	21
a)	Fibras de revestimiento de plástico.	21
b)	Fibras todo de plástico.....	22
c)	Fibras con propósito de iluminación.	23
2.7	Ventajas de las comunicaciones por fibra óptica.....	23
2.8	Campos de aplicación de la fibra óptica	25
 Capítulo 3 Enlace de dos Microcontroladores por fibra óptica		29
3.1	Introducción	29
3.1.1	Microcontrolador pic18F4550.....	30
3.1.1.1	MPLAB IDE	32
3.1.1.2	PICKit 3	34
3.1.2	Fibra óptica HFBR-BWS10	36
3.1.3	Transmisor HFBR-1412 y Receptor HFBR-2412	37
3.2	Bus de comunicación I ² C.....	40
3.2.1	Características.....	40
3.2.2	Protocolo de programación.....	42
3.3	Comunicación entre dos microcontroladores	45
3.3.1	Registros de pic18F4550	45
3.3.2	Librería I ² C de MPLAB C18.....	45
3.3.3	Programación del bus I ² C	46

3.4	Enlace de fibra óptica	48
3.5	Implementación del enlace	53
Capítulo 4 Aplicación utilizando el enlace de fibra óptica		55
4.1	Introducción	55
4.1.1	Semáforo.....	56
4.2	Diseño del semáforo	58
4.3	Sincronización de semáforos	59
4.3.1	Sistema simultaneo	59
4.3.2	Sistema alterno	60
4.3.4	Sistema progresivo limitado	61
4.3.5	Sistema progresivo flexible	61
4.4	Sincronización de un sistema de semáforos con fibra óptica	62
4.5	Resultados de la implementación del sistema de semáforos	66
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones		69
5.1	Conclusiones	69
5.2	Recomendaciones	70
Bibliografía.....		71
Apéndices		73
Registro SSPSTAT		74
Registro SSPCON1		75
Registro SSPCON2		76
Código para el dispositivo maestro		77
Código para el dispositivo esclavo		79
Sincronización de un sistema de semáforos por I ² C		80

Resumen

El presente trabajo está enfocado al uso de uno de los medios de transmisión más eficaces utilizados en la actualidad: La fibra óptica.

Primeramente se implementará un enlace digital entre dos microcontroladores utilizando como medio de transmisión un cable de fibra óptica. Para realizar este enlace se utilizará el protocolo de comunicación I²C que se caracteriza por utilizar sólo dos señales para establecer la comunicación. Una señal se encargará de generar la señal de reloj que sincronizará a todos los dispositivos conectados al sistema, mientras que la otra actuará como vehículo por donde se moverán los datos transmitidos del maestro al esclavo.

Después, el enlace se utilizará para realizar una aplicación que consiste en sincronizar un sistema de semáforos. El sistema estará formado por un maestro que se encargará de estar enviando las fases de cada uno de los cruces de semáforos.

Palabras Clave

Fibra óptica, Microcontrolador, Comunicación, Sincronización de Semáforos, Bus I²C.

Abstract

The present work is about one of the most efficient transmission mediums at the present time: the optic fiber.

In the first part, a digital link between two microcontrollers is implement using optic fiber as transmission medium. To realize this link, the I²C protocols is implemented used this protocol just use two signals to establish the communication. A signal will generate the clock's signal to sync up all the connected devices. The other one will be a path in which the information data flows in the master-slave process.

In the second part the link was implemented and it is use to realize an application for sync a traffic light systems up. The main system consists on the sending information data from the master.

Keywords

Optic Fiber, Microcontroller, Communication, sync traffic light system, I²C bus.

Lista de figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 Elementos de un sistema de comunicación.....	5
Figura 2.2 Sistema de comunicación por fibra óptica	6
Figura 2.3 Narinder Sing Kapany, inventor de la fibra óptica	8
Figura 2.4 Refracción, en donde un rayo de luz incide de un material de menor a mayor índice de refracción	11
Figura 2.5 Ángulo crítico de refracción ($n_1 < n_2$). Cuando θ_1 aumenta, θ_2 aumenta, pero no sobrepasa a θ_{2C}	12
Figura 2.6 Reflexión total interna ($n_1 > n_2$). Cuando θ_1 es mayor que θ_{1C} , (rayo 4), la luz deja de ser refractada por lo que se refleja totalmente.	13
Figura 2.7 Ángulo de aceptación al proyectar un haz de luz en una fibra óptica.	14
Figura 2.8 Dirección de un rayo de luz que está dentro del cono de admisión.	15
Figura 2.9 Trayectoria helicoidal de un rayo de inclinación en una fibra óptica.	17
Figura 2.10 Fibra multimodo de índice de paso	18
Figura 2.11 Fibra multimodo de índice graduado	19
Figura 2.12 Fibra monomodo	20
Figura 2.13 Fibra de revestimiento de plástico	22
Figura 2.14 Fibra todo de plástico	22

Capítulo 3

Figura 3.1 Esquema de pines del pic18F4550.....	31
Figura 3.2 Líneas del bus de comunicación I ² C	31
Figura 3.3 Entorno de desarrollo de MPLAB IDE.....	32
Figura 3.4 Ventanas principales de MPLAB IDE	33
Figura 3.5 PICKit 3	35
Figura 3.6 Conexión del PICKit 3 con el microcontrolador	36

Figura 3.7 Cable de fibra óptica HFBR-AWS010.....	37
Figura 3.8 Configuración de pines del HFBR-1412.....	38
Figura 3.9 Configuración de pines del HFBR-2412.....	38
Figura 3.10 Transmisor HFBR-1412 y receptor HFBR-2412.....	39
Figura 3.11 Conexión de bus I ² C con un maestro y tres esclavos.....	41
Figura 3.12 Condición de inicio del bus I ² C	42
Figura 3.13 Envío de dirección al dispositivo esclavo	43
Figura 3.14 Reconocimiento de la dirección por el dispositivo esclavo	43
Figura 3.15 Transferencia de datos.....	43
Figura 3.16 Reconocimiento de un byte recibido.....	44
Figura 3.17 Fin de transferencia de datos.....	44
Figura 3.18 Transmisión de un byte	44
Figura 3.19 Transmisión del modo I ² C maestro.....	46
Figura 3.20 Recepción del modo I ² C esclavo.....	47
Figura 3.21 Configuración típica para el transmisor HFBR-1412	48
Figura 3.22 Transistor en corte, cuando la entrada de datos es cero.	49
Figura 3.23 Transistor en saturación, cuando la entrada de datos es uno.....	49
Figura 3.24 Tablas utilizadas para calcular el valor de R1. a) Corriente IF vs longitud de fibra óptica. b) Corriente IF vs voltaje (VF)	50
Figura 3.25 Configuración típica para el receptor HFBR-2412	51
Figura 3.26 Enlace de fibra óptica con microcontrolador	52
Figura 3.27 Envío de un byte: 11111111	53
Figura 3.28 Envío de un byte: 10011001	54

Capítulo 4

Figura 4.1 Secuencia de las luces de un semáforo	56
Figura 4.2 Semáforo con 3 lámparas a base de iluminación LED	58
Figura 4.3 Semáforo con una sola cara.....	59
Figura 4.4 Esquema de una avenida principal con 3 intersecciones	62

Figura 4.5 Esquema de sincronización de un sistema de semáforos	63
Figura 4.6 Combinación de datos digitales para cada fase del semáforo	64
Figura 4.7 Diagrama de conexión de un sistema de sincronización de semáforos	65
Figura 4.8 Implementación del sistema de semáforos.....	66
Figura 4.9 Fases de semáforos en cada intersección	67
Figura 4.10 Sucesión de luces del semáforo implementado.....	67
Figura 4.11 Vista lateral del sistema de semáforos	68

Glosario de términos

Término	Descripción
RAM	Memoria de Acceso Aleatorio
EEPROM	Memoria de solo lectura programable y borrrable eléctricamente
E/S	Entrada y Salida
MBps	Megabytes por segundo
LED	Diodo Emisor de Luz
m	metro
μm	micrómetros
nm	nanómetros
dB/km	Decibelios por kilómetro
MHz km	Mega Hertz por kilómetro
GHz km	Giga Hertz por kilómetro
pH	Potencial de Hidrógeno
RF	Radio Frecuencia
I ² C	Inter-Circuitos-Integrados
KBits/s	Kilobits por segundo
A/D	Analógico/Digital
D/A	Digital/Analógico
RTC	Reloj de Tiempo Real
LCD	Display de Cristal Líquido
SDA	Línea de Datos Serie
SCL	Señal de Sincronía
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
ST	Conector – Punta Recta
SMA	Conector – Subminiatura
SC	Conector para el suscriptor

Término	Descripción
FC	Conector de Férula
°C	Grados centígrados
Ω	Ohm
V	Volt
mA	mili Amperes
RGB	Rojo, Verde, Azul (LED)

Introducción

La tecnología crece a pasos agigantados, cada día se realizan nuevas investigaciones de diferentes dispositivos buscando que los sistemas sean más pequeños y que operen a velocidades relativamente altas.

En el presente capítulo se dará una introducción a dos dispositivos que tienen un gran impacto en la actualidad, ya que su uso es cada vez más frecuente en diferentes áreas.

También se presenta el objetivo de este trabajo justificando las razones de llevar a cabo este proyecto, así como también se muestra la metodología de investigación que se utilizó para realizarlo.

1.1 Tecnologías actuales Microcontrolador-Fibra óptica

Uno de los logros más sobresalientes en el campo de la electrónica y la comunicación ha sido el invento de nuevos dispositivos como por ejemplo el microcontrolador y la fibra óptica.

El primer invento del que haremos mención es el microcontrolador. Este dispositivo es un circuito integrado donde su función principal es integrar inteligencia a cualquier artefacto. Su aplicación es muy extensa, los podemos encontrar en casi todos los aparatos electrónicos: cámaras, celulares, televisiones, electrodomésticos, juguetes, automóviles, etc.

Estos circuitos integrados cada día están evolucionando, presentando nuevas características que los hacen útiles en una infinidad de aplicaciones.

Las principales características de un microcontrolador son las siguientes [1]:

Cuenta con una Unidad Central de Proceso, que puede ser de 8, 16 o 32 bits. Se puede conectar un oscilador para poder generar frecuencias en múltiplos enteros del cristal de referencia.

Utiliza tres tipos de Memoria para almacenar datos: RAM, EEPROM y Memoria Flash. La memoria RAM es utilizada para almacenar información de manera temporal para realizar cálculos u operaciones. La memoria EEPROM se utiliza para el almacenamiento a largo plazo de los datos del programa. Finalmente la memoria Flash es una evolución de la memoria EEPROM que permite la lectura y escritura en una misma operación, funcionando a mayores velocidades que la memoria EEPROM.

También posee periféricos de entrada y salida que permiten conectarse con otros dispositivos, estas líneas de E/S están destinadas para proporcionar el soporte para las señales de entrada, salida y control. Del mismo modo, cuenta con periféricos de comunicación, para la comunicación entre microcontroladores y otros periféricos externos como por ejemplo la computadora.

En la actualidad se fabrican millones de estos dispositivos, lo que genera competencia en el mercado donde muchas empresas se dedican a la fabricación de estos instrumentos. Algunas de las marcas que se dedican a ello, son: Microchip, Motorola, Intel, Philips, National Instruments, Toshiba, Siemens, entre otras.

La fibra óptica es un medio de transmisión que consiste en un delgado hilo transparente que puede ser de vidrio o de plástico flexible, donde a través de este se envía de un extremo a otro un haz de luz donde lleva la información que se va transmitir.

Su funcionamiento se basa en las propiedades de refracción y reflexión. Cuando un rayo de luz pasa de un material de ciertas características a otro con diferentes características, un rayo puede reflejarse totalmente a lo largo de un conducto cerrado consiguiendo transmitir pulsos de luz a grandes distancias.

La aplicación de este medio de transmisión es muy amplia. Podemos encontrarla en diferentes campos como por ejemplo en medicina, telefonía, internet, industria y sistemas de instrumentación óptica.

Otro uso importante que se le da a la fibra óptica, es en aplicaciones con propósitos de iluminación, utilizándose regularmente en lugares que serían difíciles de iluminar. También se usan para fines de decoración. Este tipo de fibra es una alternativa de iluminación que permite un bajo consumo de energía.

1.2 Objetivo

El objetivo de esta tesis consiste en implementar un enlace digital de dos microcontroladores utilizando como medio de transmisión fibra óptica. Posteriormente, realizar una aplicación que consista en sincronizar un sistema de semáforos empleando el enlace desarrollado.

1.3 Justificación

La comunicación es fundamental en la vida cotidiana, es uno de los factores que más influye en el desarrollo de la sociedad. Por esta razón, se están buscando nuevas tecnologías como medio de transmisión de datos como lo es la fibra óptica, ya que esta presenta muchas ventajas frente a otros medios de transmisión, como lo es el típico cable coaxial de cobre. Algunas de estas ventajas son las siguientes: velocidad mayor a la que se transmiten los datos, menor peso y tamaño, mayor ancho de banda e inmunidad a las interferencias. Es por ello que tomando en cuenta las ventajas mencionadas, este trabajo propone realizar la comunicación entre dos microcontroladores mediante fibra óptica. Así mismo, este enlace puede ser empleado en aplicaciones donde el sistema de comunicación este expuesto a radiaciones electromagnéticas que puedan ocasionar pérdidas de información.

1.4 Metodología

Para llevar a cabo el presente trabajo se realizaron los siguientes pasos.

1. Investigación bus de comunicación I²C.
2. Implementación del bus I²C utilizando dos pic18F4550.
3. Reemplazo de cable de cobre por cable de fibra óptica.
4. Utilización del enlace para realizar la sincronización de un sistema de semáforos.
5. Construcción y pruebas del sistema de semáforos.

1.5 Contenido de la Tesis

A continuación se presenta un breve resumen de cada capítulo.

En el capítulo 1, se da una reseña del impacto que tienen en la actualidad los microcontroladores y la fibra óptica. También, se describe el objetivo de la tesis y el argumento del porque se eligió realizar este trabajo.

En el capítulo 2, se presenta una breve historia de la fibra óptica, así como el principio de funcionamiento y las principales características que esta posee.

En el capítulo 3, se describen las principales características del bus de comunicación I²C. Así mismo se explica el proceso mediante el cual se realiza la comunicación entre dos microcontroladores utilizando fibra óptica como medio de transmisión.

En el capítulo 4, se realiza una aplicación del enlace digital microcontrolador-fibra óptica, que consiste en la sincronización de un sistema de semáforos.

En el capítulo 5, de acuerdo a los resultados obtenidos se presentan las conclusiones y mediante estas se dan algunas recomendaciones.

Antecedentes de Fibras Ópticas

La fibra óptica es una nueva tecnología que desempeña un papel relevante en las telecomunicaciones. Sus características hacen posible que se puedan transportar grandes volúmenes de información de manera eficiente y a grandes distancias.

A continuación se presenta un breve desarrollo histórico de la fibra óptica que la llevó a ser uno de los medios de transmisión más utilizados en la actualidad. Así mismo se dará a conocer el principio de funcionamiento y las principales características que permiten ser un éxito en las múltiples aplicaciones donde es empleada.

2.1 Introducción

La comunicación puede ser definida como la transferencia de información de un punto a otro. Cuando la información es para ser transportada a cualquier distancia generalmente se requiere un sistema de comunicación [2]. En la figura 2.1 se muestran los elementos básicos que componen un sistema de comunicación.

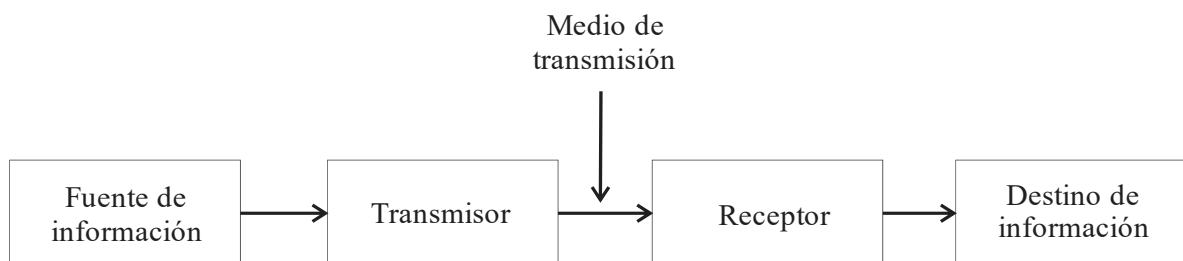


Figura 2.1 Elementos de un sistema de comunicación

Dentro de este sistema, existe un mensaje el cual se introduce al transmisor. El transmisor es un circuito electrónico que convierte la información de la fuente original en una señal que pueda ser transmitida a través de un determinado medio de transmisión. El medio de transmisión transporta las señales desde el transmisor hasta el receptor. La función del receptor es recibir la señal transmitida a través del medio de transmisión, amplificarla y restablecerla a su forma original [2].

2.2 Sistema de comunicación por fibra óptica

Existen diferentes canales de comunicación que es el medio por el que se transmite la información desde el emisor hasta el receptor en un sistema de comunicación. Pueden ser guiados, por ejemplo: par trenzado, cable coaxial, fibras ópticas, etc. y no guiados, por ejemplo: radio, microondas, satélite, etc.

Los avances en la tecnología de fibras ópticas con baja atenuación, han hecho posible que se logre desarrollar sistemas de comunicación mediante fibras ópticas como canal de transmisión.

En su forma más simple un sistema de comunicación por fibra óptica está constituido por tres elementos [3], como se muestra en la figura 2.2.



Figura 2.2 Sistema de comunicación por fibra óptica

El emisor óptico tiene por función transportar la información en forma de señal eléctrica a información en forma de luz. El receptor óptico tiene la función de transformar la información óptica recibida en información con la forma de señal eléctrica. El canal de comunicación utiliza como medio de transmisión fibra óptica [3].

2.3 Historia de la fibra óptica

Desde tiempos remotos el hombre ha utilizado la luz como medio de comunicación. Con el transcurso de los años, mediante descubrimientos y experimentos se llegó a la invención de la fibra óptica.

2.3.1 Uso de la luz como medio de comunicación en la antigüedad

El primer registro que se tiene acerca del uso de la luz como medio de comunicación data de los años 750 A.C. con el desarrollo de la heliografía por los griegos. Esta consistía en utilizar la luz del sol y reflejarla en superficies brillosas como los espejos. Con esta técnica enviaban señales entre dos poblaciones distantes con un código predeterminado en el que tanto el emisor como el receptor entendieran la información [4].

En el año 430 A.C. los ejércitos romanos utilizaban antorchas en grandes grupos en las cimas de las montañas, con las que enviaban mensajes para comunicarse en tiempos de guerra. Sin embargo en muchas ocasiones los mensajes eran usados por los enemigos ya que la información era fácil de descifrar [4].

Estas dos formas de comunicación perduraron durante mucho tiempo. No fue hasta el año de 1799 durante la revolución francesa que el científico e ingeniero francés Claude Chappe construyó un sistema de telegrafía óptica que se extendía por toda Francia. El sistema consistía en dos torres construidas en las cimas de las colinas en la cuales mandaban mensajes por medio de luz a muchos kilómetros de distancia [5].

Hasta aquí, la luz era una buena opción como medio de comunicación, sin embargo estas señales luminosas eran muy visibles por lo que tenían muchos inconvenientes. El siguiente gran reto para el ser humano era controlar el objeto más veloz que viaja en el vacío y utilizarla como medio de transmisión de información.

2.3.2 Los primeros experimentos e invención de la fibra óptica

John Tyndall físico irlandés en 1870, mostró que la luz al propagarse en un medio de alto índice de refracción no puede penetrar en un medio que tiene un índice más bajo cuando

esta luz llega con un ángulo suficientemente pequeño. Este principio, conocido con el nombre de reflexión total interna es la base del funcionamiento de una fibra óptica [3].

En el año de 1880, Alexander Graham Bell experimento con un dispositivo al que llamo *fotófono*. El instrumento estaba formado por espejos y detectores de selenio, que transmitía ondas sonoras sobre un rayo de luz. Con el fotófono pudo comprobar que era posible transportar la voz humana a través de la luz a una distancia de 200 metros [3] [6].

En los años 50 un joven llamado Narinder Sing Kapany, entro a trabajar con Harold Hopkins quien había realizado un trabajo sobre óptica. Comenzaron a basarse en los estudios de John Tyndall y finalmente mediante múltiples experimentos fueron capaces de conducir un haz de luz a través de un conducto cerrado, que condujeron a la invención de la fibra óptica [5].



Figura 2.3 Narinder Sing Kapany, inventor de la fibra óptica

2.3.3 Las primeras aplicaciones y nuevos descubrimientos

En 1956 Basil Hirschowitz, Wilbur C. Peters y Lawrence E. Curtiss, utilizaron un haz de luz para transmitir imágenes, con esto construyeron la primera fibra óptica semiflexible con la que desarrollaron el primer dispositivo óptico para realizar una endoscopia [5].

Un nuevo descubrimiento del uso de la luz estimuló el interés en la comunicación óptica en al año de 1960. Se trata del rayo láser. Este dispositivo proporcionaba una fuente de luz coherente además de la posibilidad de modulación de alta frecuencia. A través del rayo láser se podían enviar mensajes a altas velocidades y con una amplia cobertura. Sin embargo

la transmisión de la luz en la atmosfera se veía muy afectada por perturbaciones tales como lluvia, nieve, neblina, polvo y la turbulencia atmosférica, por lo que su uso se restringió a aplicaciones de comunicación a corta distancia. Aunque el uso del láser para la comunicación óptica de espacio libre resultó ser algo limitada, la invención del láser tuvo el mérito de revivir la idea de utilizar la luz para transportar información [3].

En 1965 Charles Kuen Kao y G. Z. Hockham se enfrentaron al estudio de la luz como medio de transmisión en la comunicación, comenzaron su estudio encerrando un rayo luminoso en un largo tubo teniendo poco éxito, ya que a pocos metros la intensidad de la luz decaía hasta perderse. Después de varios intentos, un año más tarde llegaron a la conclusión de que si se conseguía elaborar una delgada fibra de vidrio de una pureza desconocida hasta entonces, la luz podía viajar durante varios kilómetros sin presentar grandes pérdidas, las cuales no rebasarían los 20 decibelios por kilómetro [7].

El siguiente gran avance de esta tecnología fue en el año de 1970, investigadores de la empresa CORNING basándose en los principios de fabricación propuestos por Kao fueron capaces de desarrollar la primera fibra óptica con atenuaciones muy bajas de hasta 0.5 decibelios por kilómetro [5]. Actualmente, la empresa ofrece una línea completa de las fibras monomodo y multimodo para todas las aplicaciones de la red.

En abril de 1977 General Telephone and Electronics envió la primera transmisión telefónica a través de fibra óptica con una tasa de transmisión de 6 Mbps en Long Beach, California [8].

En 1980, descubrieron que se podían fabricar fibras ópticas con alto grado de transparencia a partir de cristal de silicio puro. Para poder obtener el cristal se basaban en seleccionar el equilibrio correcto de componentes de vapor y optimizar sus reacciones. La tecnología en desarrollo se basaba principalmente en el conocimiento de la termodinámica química [8].

En 1988, se comenzaba a demostrar las grandes capacidades de la fibra óptica frente al cable coaxial que llevaron a un cambio tecnológico. El primer cable transatlántico de fibra óptica el TAT-08 comunicaba Estados Unidos, Francia e Inglaterra. Utilizaba un cristal tan transparente que los amplificadores estaban a una distancia de 64 kilómetros. Este cable estuvo al servicio hasta el año del 2002 [8].

2.4 Investigaciones en la actualidad

Recientemente, un grupo de investigadores del Colegio de Universitario de Londres demostraron una nueva forma de procesar la señal emitida a través de la fibra óptica. Como sabemos uno de los principales inconvenientes es la pérdida de la señal en la transmisión a grandes distancias. Actualmente, según los investigadores la información a través de fibra óptica puede viajar hasta 3,190 kilómetros sin tener error alguno. Para seguir enviando esa información y evitar pérdidas es necesario amplificar esa señal debilitada. La nueva técnica demostrada por el equipo de investigadores dirigido por Polina Bayvel consiste en fusionar todas las frecuencias de datos en un canal único con el que se puede conseguir alargar la transmisión hasta 5,890 kilómetros, logrando así un mayor tiempo en degradarse la señal [9].

Otro grupo de investigadores de la Universidad de Eindhoven y la Universidad Central de Florida, lograron crear un nuevo cable de fibra óptica capaz de transportar hasta 255 Terabits por segundo, este tipo de cable ofrece un ancho de banda 21 veces mayor a la fibra óptica estándar que actualmente se utiliza en las telecomunicaciones. Además de esto también se aplicó una técnica conocida como multiplexado espacial en la cual es posible transmitir en paralelo señales de datos codificados de múltiples fuentes logrando así mover hasta 5.1 Terabits en cada hilo de fibra óptica [10].

2.5 Características de la fibra óptica

Algunas características que definen a la fibra óptica son el ángulo de aceptación, la apertura numérica y los rayos oblicuos. Para comenzar a analizarlas es necesario primero analizar el principio de funcionamiento.

2.5.1 Principio de funcionamiento

Para comprender la propagación de la luz a través de un conducto cerrado, es necesario analizar las leyes de la óptica geométrica, donde tomaremos las leyes de refracción y reflexión. La refracción es el cambio de dirección que experimenta un rayo de luz, cuando este pasa de un material a otro. Para considerar la refracción es necesario tomar en cuenta el índice de refracción del medio dieléctrico. El índice de refracción de un medio se define como la

relación de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio, es decir un rayo de luz viaja más lentamente en un medio ópticamente denso, que en otro menos denso.

La luz se refracta cuando atraviesa dos diferentes medios n_1 y n_2 [3], como se muestra en la figura 2.4.

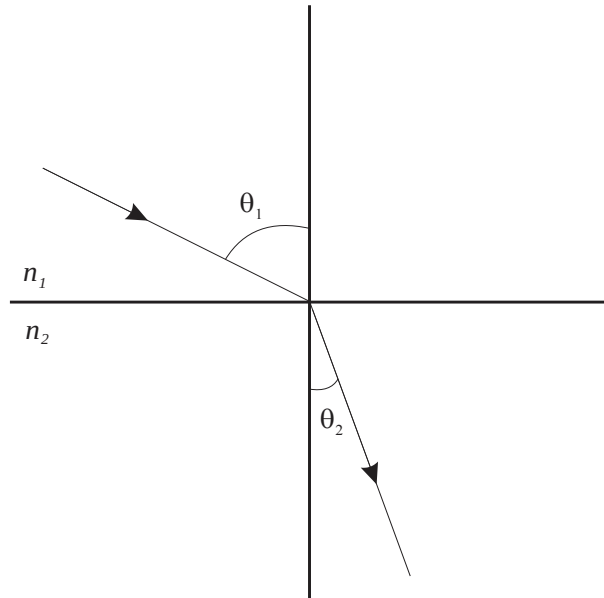


Figura 2.4 Refracción, en donde un rayo de luz incide de un material de menor a mayor índice de refracción

La relación que existe entre el seno del ángulo de incidencia θ_1 y el seno del ángulo θ_2 es constante y se define por:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

La cual se conoce como *ley de Snell* [3].

Considerando el fenómeno de la refracción y los índices de refracción de los medios, se pueden considerar dos casos.

Caso 1. Cuando la luz pasa de un medio con un índice de refracción menor a otro medio con un índice de refracción mayor [3], la refracción se produce como se muestra en la figura 2.5.

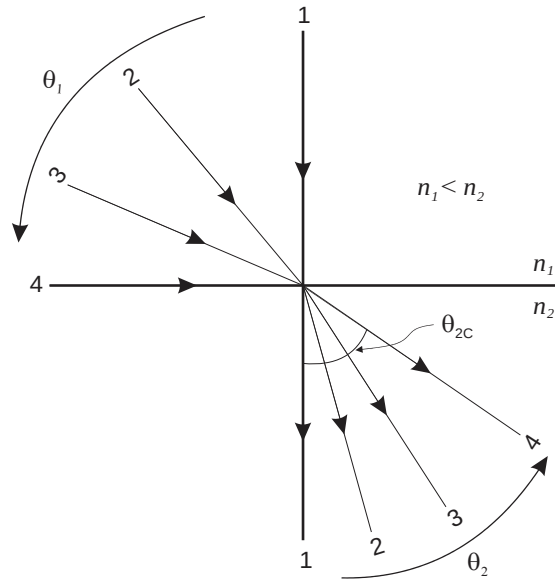


Figura 2.5 Ángulo crítico de refracción ($n_1 < n_2$). Cuando θ_1 aumenta, θ_2 aumenta, pero no sobrepasa a θ_{2C} .

Se tiene $\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1$

En este caso existe un valor máximo del ángulo de refracción θ_{2C} , valor que corresponde a

$\text{sen } \theta_1 = 1 (\theta_1 = 90^\circ)$.

$\theta_{2C} = \arcsen \frac{n_1}{n_2}$ θ_{2C} se conoce como ángulo crítico de refracción.

Caso 2. Cuando la luz pasa de un medio con un índice de refracción mayor a otro medio con un índice de refracción menor [3], la refracción se produce como se muestra en la figura 2.6.

$\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1$

Para el rayo 4, $\theta_2 = 90^\circ$, $\text{sen } \theta_2 = 1$.

$1 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_{1C}$, $\theta_{1C} = \arcsen \frac{n_2}{n_1}$

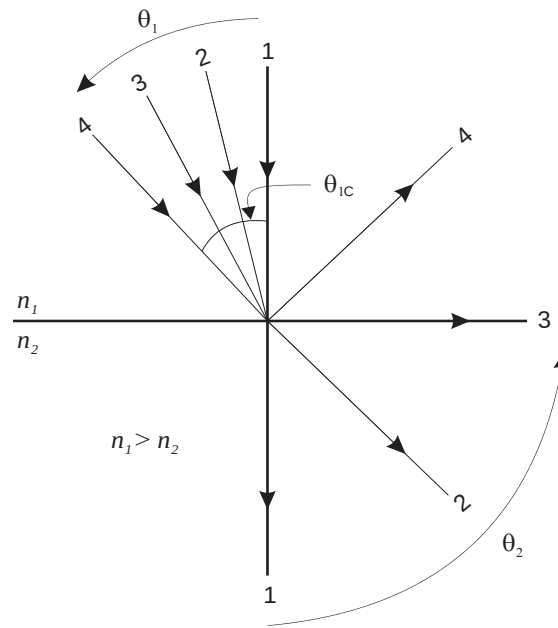


Figura 2.6 Reflexión total interna ($n_1 > n_2$). Cuando θ_1 es mayor que θ_{1c} , la luz deja de ser refractada por lo que se refleja totalmente.

Si $\theta_1 > \theta_{1c}$, la luz no se refracta, sino que se refleja totalmente en el medio original y su ángulo se conoce como ángulo crítico o ángulo mínimo de refracción total interna. Por lo tanto se tendrá una refracción total interna si la luz alcanza la interfaz ($n_1 > n_2$) con un ángulo superior al ángulo crítico.

2.5.2 Ángulo de aceptación

Una vez que se explicó el principio de funcionamiento de la fibra óptica, es necesario analizar las consecuencias del ángulo de incidencia de un rayo de luz sobre la fibra óptica.

No todos los ángulos de incidencia del rayo de luz son útiles para poder obtener una reflexión total interna a través de la interfaz núcleo-revestimiento.

En la figura 2.7 podemos observar que existe un determinado intervalo en el que si el ángulo es incidido fuera del llamado cono de aceptación, la luz ya no se refleja internamente sino que se refracta a través del revestimiento ocasionando pérdidas por radiación como por ejemplo el rayo B.

Si el rayo se incide dentro del cono de aceptación definido por θ_a , por ejemplo el rayo A, primero se refracta a través de la interface aire-núcleo, y después será transmitido a la interface núcleo-revestimiento, logrando así una reflexión total interna a través de la fibra óptica [6].

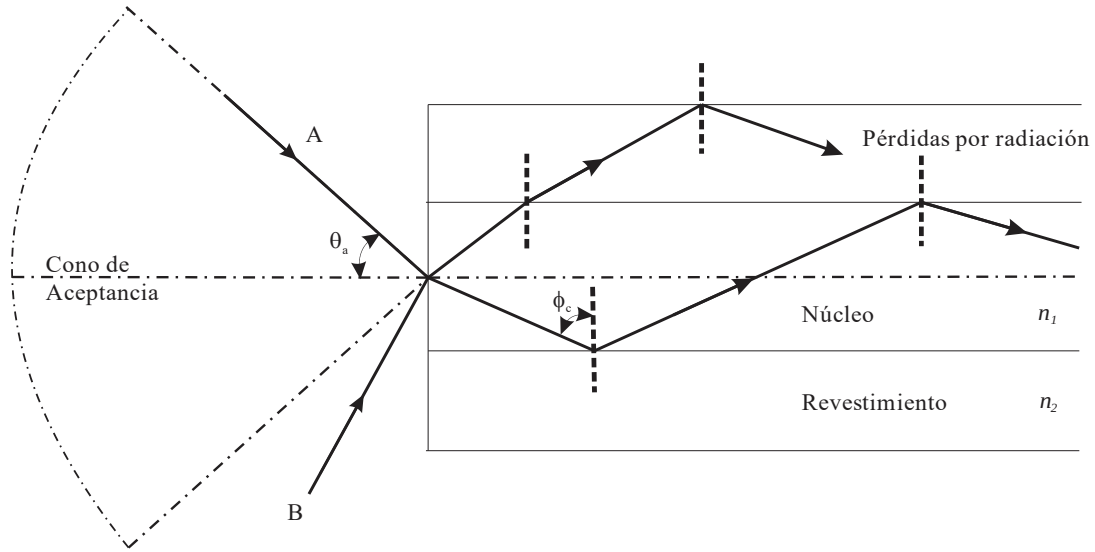


Figura 2.7 Ángulo de aceptación al proyectar un haz de luz en una fibra óptica.

El ángulo máximo de entrada θ_a está definido por:

$$\theta_a = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Donde n_0 es el índice de refracción del aire, el cual es de $n_0 = 1.0$

Por lo tanto, la ecuación anterior se puede reducir a [6]:

$$\theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

2.5.3 Apertura numérica

Es posible realizar una relación más general que englobe tanto el ángulo de aceptación como los tres índices de refracción por los que atraviesa el rayo, que son: el aire, el núcleo y el revestimiento.

La apertura numérica nos da un concepto más general y es de mucha importancia ya que predice de manera precisa si un rayo de luz podrá ser propagado a través de la fibra óptica [3].

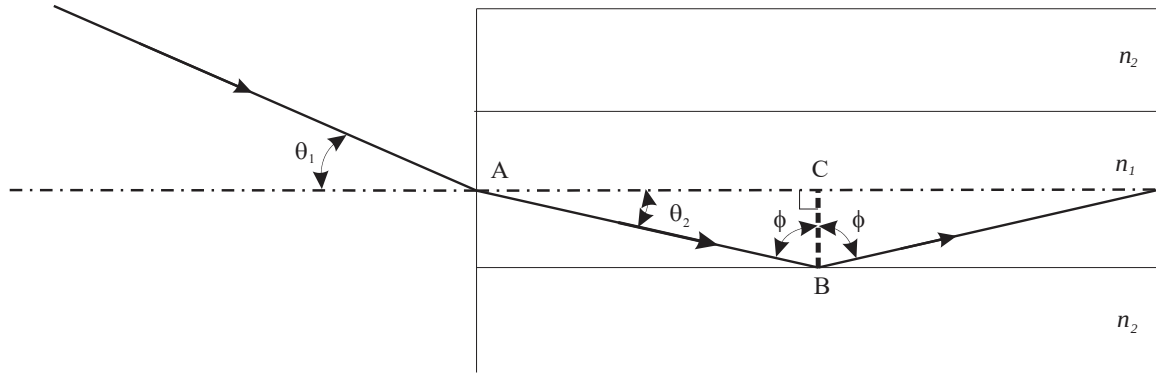


Figura 2.8 Dirección de un rayo de luz que está dentro del cono de admisión.

En la figura anterior se tiene un rayo de luz con un ángulo θ_1 , el cual está dentro del ángulo máximo de entrada θ_a . Este Rayo entra a la fibra a través de la interface aire (n_0) – núcleo (n_1), donde este último tiene un índice de refracción mayor al del revestimiento (n_2).

Utilizando la refracción en la interface aire-núcleo y de acuerdo a la *ley de Snell* dada por la ecuación:

$$n_0 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Considerando el triángulo ABC que se forma en la figura 2.7, tenemos:

$$\emptyset = \frac{\pi}{2} - \theta_2$$

Entonces la *ley de Snell* se convierte en:

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \emptyset \right)$$

$$n_0 \sin \theta_1 = n_2 \cos \emptyset$$

Utilizando la identidad trigonométrica $\sin^2 + \cos^2 = 1$:

$$\cos \emptyset = \sqrt{1 - \sin^2 \emptyset}$$

Entonces:

$$n_0 \sin \theta_1 = n_2 \sqrt{1 - \sin^2 \emptyset}$$

Cuando se considera el límite para la reflexión total interna, $\emptyset$ se hace igual al ángulo crítico θ_a para la interface núcleo-revestimiento. También θ_1 se convierte en el ángulo de aceptación θ_a .

Considerando lo anterior la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$n_0 \sin \theta_a = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_a}$$

$$\text{Además } \sin \theta_a = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Por lo tanto: } n_0 \sin \theta_a = n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}}$$

Finalmente, la apertura numérica está definida por [6]:

$$A_N = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

En algunas ocasiones la apertura numérica se da en términos de la diferencia de índices de refracción relativa Δ , la cual se obtiene de:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

Entonces la apertura numérica también queda determinada por:

$$A_N = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Las ecuaciones obtenidas son muy útiles para medir la capacidad de recolección de luz de una fibra óptica. Estas expresiones pueden servir para diámetros hasta de 8 μm . Para diámetros más pequeños no son útiles ya que no se toman en cuenta la interferencia de los componentes que forman la fibra óptica. Por lo tanto, para estos casos debe aplicarse la teoría de modo electromagnético.

2.5.4 Rayos oblicuos

Hasta ahora se ha considerado la propagación de rayos meridionales, es decir aquellos que se propagan en el plano que contiene el eje central de la guía de fibra óptica. Sin embargo existen otro tipo de rayos que siguen una trayectoria eléctrica helicoidal, como se muestra en la figura 2.9 [6].

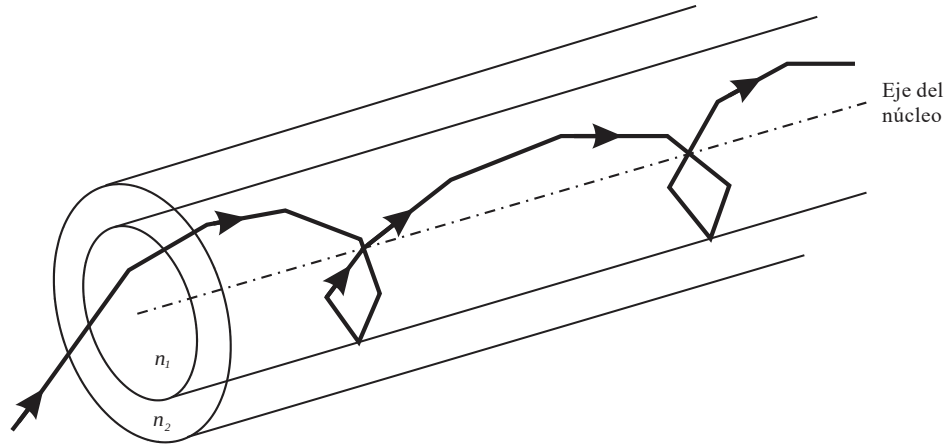


Figura 2.9 Trayectoria helicoidal de un rayo de inclinación en una fibra óptica.

Para calcular el ángulo de aceptación y la apertura numérica para un rayo de inclinación de este tipo, se tienen las siguientes expresiones:

Angulo máximo de entrada o ángulo de aceptación para un rayo oblicuo

$$\theta_{as} = \frac{n_1}{n_0 \cos \gamma} \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}}$$

La apertura numérica se puede calcular de la siguiente manera [6],

$$N_A = R_0 \sin \theta_{as} \cos \gamma = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Esta expresión indica que el ángulo de aceptación para rayos oblicuos es mayor que para rayos meridionales.

2.6 Tipos de fibra óptica

De acuerdo al modo de transmisión existen dos tipos de fibra óptica: la multimodo y la monomodo. El termino modo está relacionado con el número y variedad de longitud de onda que pueden ser propagadas a través de la fibra óptica.

2.6.1 Fibra multimodo

La fibra multimodo está diseñada para distancias de transmisión corta. Tiene un diámetro del núcleo mayor que la fibra monomodo, lo que permite propagar muchos rayos de luz simultáneamente, tomando cada uno un camino diferente.

De acuerdo a los modos de propagación, este tipo de fibras pueden ser [6]:

a) Fibras multimodo de índice de paso

Estas fibras tienen grandes diámetros del núcleo y grandes aperturas numéricas para facilitar el acoplamiento eficiente de fuentes de luz incoherente como por ejemplo los Diodos Emisores de Luz (LED). Las características de representación de este tipo de fibras pueden variar de acuerdo al material de construcción. La estructura típica para una fibra multimodo de índice de paso es como se muestra en la figura 2.10.

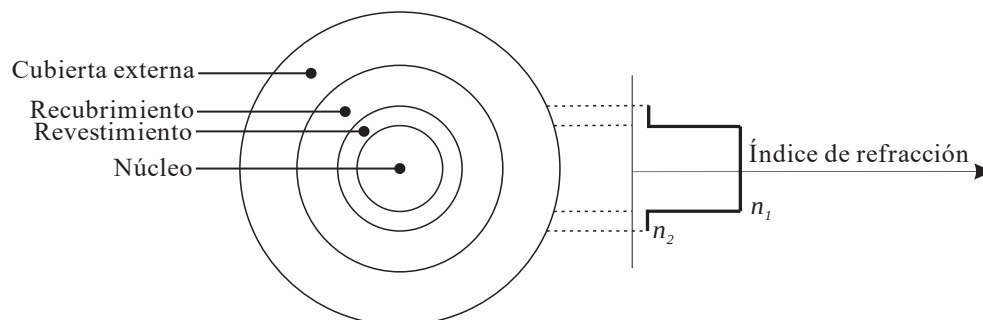


Figura 2.10 Fibra multimodo de índice de paso

Las características de este tipo de fibra son las siguientes:

- Estructura
 - Diámetro del núcleo ----- 100 a 300 μm
 - Diámetro del revestimiento ----- 140 a 400 μm
 - Diámetro de la cubierta amortiguador ----- 400 a 1000 μm
 - Apertura numérica ----- 0.16 a 0.5

- Atenuación

Para una longitud de onda de 0.85 μm la atenuación es de 2.6 a 50 dB/km. La amplia variación en la atenuación se debe a los métodos de preparación de la fibra. Para una fibra de vidrio de varios componentes se tiene una atenuación de 40 dB/km, mientras que para una fibra de silicio dopado es de 5 dB/km.

- Ancho de Banda

El ancho de banda es de 6 a 50 MHz km.

- Aplicaciones

Se utilizan principalmente para distancias cortas ya que cuenta con un ancho de banda limitado, además de que es de bajo costo.

b) Fibras multimodo de índice graduado

Las fibras multimodo de índice graduado generalmente son fabricados a partir de materiales con un grado de pureza mayor que el de las fibras multimodo de índice de paso, esto con el fin de reducir las pérdidas de la fibra. La estructura típica de este tipo de fibra se muestra en la figura 2.11.

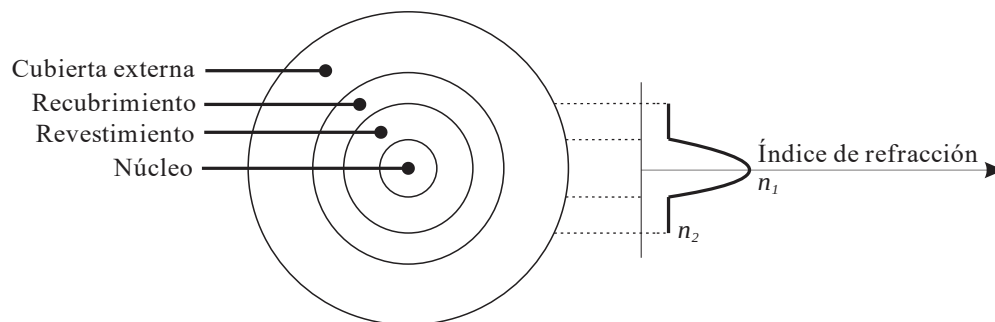


Figura 2.11 Fibra multimodo de índice graduado

Características:

• Estructura

- Diámetro del núcleo ----- 50 a 100 μm
- Diámetro del revestimiento ----- 125 a 150 μm
- Diámetro de la cubierta amortiguadora ---- 400 a 1000 μm
- Apertura numérica ----- 0.2 a 0.3

• Atenuación

Las pérdidas son de 2 a 10 dB/km a una longitud de onda de 0.85 μm . El promedio de pérdidas es de alrededor de 0.4 y 0.25 dB/km en longitudes de onda de 1.3 y 1.55 μm , respectivamente.

• Ancho de banda

El ancho de banda es de 200 MHz km a 3 GHz km.

• Aplicaciones

Estas fibras son ideales en distancias medias y longitudes de onda medias y altas.

2.6.2 Fibra monomodo

Las fibras monomodo son las más delgadas y sólo permiten que se transmita un sólo rayo de luz, son de alta calidad lo que permite una mayor capacidad para transmitir información. No sufre de problemas de atenuación como en el caso de las fibras multimodo por lo que se pueden lograr transmitir información a mayores distancias sin presentar atenuación. El inconveniente que presenta este tipo de fibras es que es difícil de construir, manipular y es más costosa. La estructura típica para una fibra monomodo de índice de paso se muestra en la figura 2.12 [6].

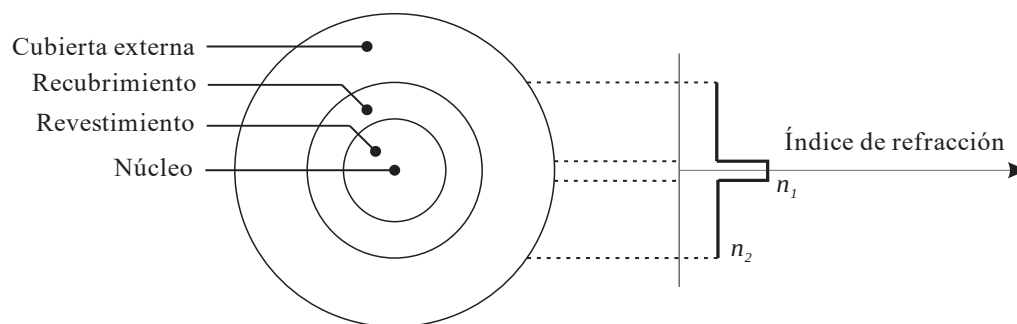


Figura 2.12 Fibra monomodo

Características:

- Estructura
 - Diámetro del núcleo ----- 7 a 10 μm
 - Diámetro del revestimiento ----- 125 μm
 - Diámetro de la cubierta amortiguadora --- 500 a 1000 μm
 - Apertura numérica ----- 0.08 a 0.15
- Atenuación

De 2 a 5 dB/km con un límite de dispersión de alrededor de 1 dB/km a una longitud de onda de 0.85 μm . Además las pérdidas promedio son de 0.35 y 0.21 dB/km en longitudes de onda de 1.3 y 55 μm respectivamente.
- Ancho de banda

Mayor a 500 MHz km. En teoría la longitud de onda es limitada por la dispersión del material y por la guía de onda a unos 40 GHz km en una longitud de onda de 0.85 μm . sin embargo, en la práctica excede 10 GHz km a una longitud de onda de 1.3 μm .
- Aplicaciones

Este tipo de fibras son ideales para larga y media distancia, así como para longitudes de ondas muy altas.

2.6.3 Otro tipo de fibras

Existen otros tipos de fibras, como por ejemplo [6]:

a) Fibras de revestimiento de plástico.

Las fibras de revestimiento de plástico son multimodo y pueden ser de perfil de índice de paso o de índice graduado. Tienen un revestimiento de plástico y un núcleo de vidrio lo cual causa que exhiban pérdidas por radiación inducida más bajas con respecto a fibras del núcleo y revestimiento de vidrio de silicio.

Este tipo de fibras son más económicas que las correspondientes a las fibras de vidrio pero más limitadas en las características de rendimiento.

Una estructura típica para este tipo de fibras se muestra a continuación:

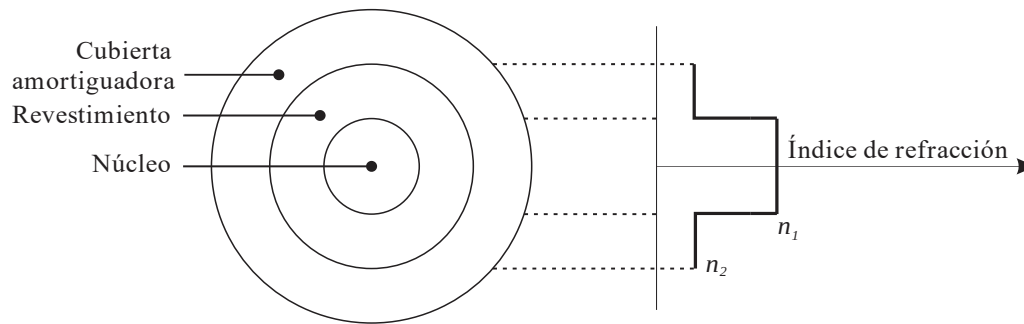


Figura 2.13 Fibra de revestimiento de plástico

b) Fibras todo de plástico.

Las fibras todo de plástico son exclusivamente de índice de paso multimodo en largos diámetros de revestimiento. Estas fibras son usualmente más económicas, su rendimiento es restringido, dándoles un uso limitado en aplicaciones de comunicación.

Las fibras de plástico tienen ciertas ventajas sobre las de vidrio. La primera es que las de plástico son más flexibles y, en consecuencia, más robustas que el vidrio. Son fáciles de instalar, pueden resistir mejor los esfuerzos, son menos costosas y pesan 60% menos que el vidrio. La desventaja de las fibras de plástico es su alta atenuación característica: no propagan la luz con tanta eficiencia como el vidrio. En consecuencia, las fibras de plástico se limitan a tramos relativamente cortos, como por ejemplo dentro de un sólo edificio o un complejo de edificios.

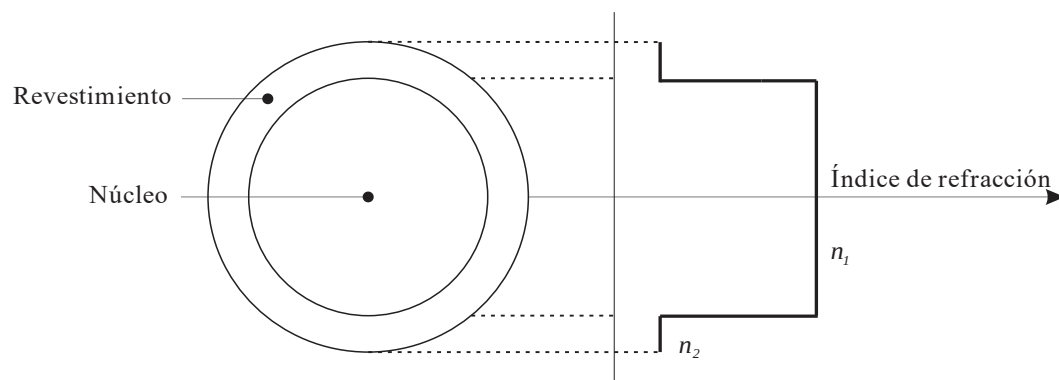


Figura 2.14 Fibra todo de plástico

c) Fibras con propósito de iluminación.

La fibra óptica de iluminación es una clase de fibra que se caracteriza por utilizarse con fines decorativos, o de iluminar cualquier espacio. Existen dos tipos de fibra óptica de iluminación: La fibra de punto final y la fibra perimetral.

Fibra de punto final: Este tipo de fibra óptica tiene como finalidad conducir la luz desde el generador hasta los proyectores o puntos de luz de la instalación. Esta fibra está recubierta por una funda opaca y resistente a los productos químicos que se utilizan para el tratamiento del agua. Se puede mojar sin problemas ya que no conduce electricidad [11].

Fibra perimetral: Este tipo de fibra se utiliza para iluminar secciones continuas. La particularidad de esta fibra es que emite luz por toda su longitud, es ideal para iluminar una zona larga. La fibra perimetral puede ser utilizada tanto en piscinas de nueva construcción así como piscinas ya existentes [11].

Entre las ventajas que ofrece este tipo de fibras, podemos mencionar que tienen un bajo consumo de energía y se pueden utilizar en muchas aplicaciones de iluminación. Presenta mayor seguridad, ya que hay ausencia de calor y electricidad, pudiendo tener contacto directamente con el agua sin temor a que se produzcan descargas eléctricas.

2.7 Ventajas de las comunicaciones por fibra óptica

La comunicación por fibra óptica ofrece cierto número de ventajas respecto a los medios de transmisión tradicionales como por ejemplo el cable coaxial de cobre. Estas ventajas son [3]:

a) Potencial ancho de banda

La fibra óptica proporciona un ancho de banda significativamente mayor que los sistemas de cable metálico o sistemas de radio de ondas milimétricas.

b) Tamaño y peso pequeño

Un cable de fibra óptica es, por lo menos diez veces más ligero y más compacto que un cable coaxial. Esta es una excelente ayuda que permite economizar el transporte a la hora de la instalación de los cables; resuelve el problema de la congestión de conductos en las ciudades, así como también permite una expansión de transmisión de señal dentro de los móviles como aviones, satélites, barcos y en cualquier lugar donde el espacio sea limitado.

c) Aislamiento eléctrico

Las fibras ópticas se fabrican a partir de vidrio o en ocasiones de plástico. Estos materiales son aislantes eléctricos y por lo tanto esto hace que las interferencias electromagnéticas externas no perturben la transmisión de la fibra. La transmisión será de muy buena calidad sin que se necesite una protección costosa contra el ruido electromagnético externo. Esta propiedad es una gran ventaja donde se producen variaciones bruscas de tensión y corriente.

d) Diafonía

En un sistema de comunicación por fibra óptica se puede garantizar que no hay interferencia óptica entre las fibras, y por lo tanto, a diferencia de la comunicación utilizando conductores eléctricos, la diafonía es despreciable, incluso cuando muchas fibras están cableadas juntas.

e) Seguridad de la señal

La luz de la fibra óptica no irradia de manera significativa y por lo tanto ofrece un alto grado de seguridad. Una fibra óptica no se puede intervenir por medio de mecanismos eléctricos convencionales como conducción superficial o inducción electromagnética, por lo que es muy difícil que un intruso pueda acceder a la información de la transmisión de una señal. Esta ventaja hace que la fibra óptica sea indispensable en aplicaciones donde se requiera un alto grado de confidencialidad.

f) Baja atenuación

El desarrollo de las fibras ópticas en los últimos años ha dado como resultado la producción de cables de fibra con muy baja atenuación o pérdida de transmisión en comparación con los mejores conductores de cobre. Las fibras se han fabricado con pérdidas tan bajas como de 0.15 dB/ km y esta característica se ha convertido en una importante ventaja en la comunicación por fibra óptica. Gracias a esto se han implementado enlaces de comunicaciones con repetidores ópticos o amplificadores en separaciones extremadamente grandes, lo que reduce el costo y la complejidad del sistema.

g) Robustez y flexibilidad

La estructura de un cable de fibra ha sido desarrollada de tal manera que sea flexible, compacto y extremadamente resistente. Son inmunes a condiciones adversas de humedad y temperatura y se pueden utilizar incluso para cables subacuáticos. Debido a la flexibilidad que presentan pueden ser dobladas en radios pequeños si sufrir daño alguno.

h) Fiabilidad del sistema y facilidad de mantenimiento

El mantenimiento que se requiere para un sistema de fibra óptica es menor que el requerido para un sistema convencional debido a que requieren pocos repetidores electrónicos en un enlace de comunicaciones, no hay corrosión y no se ve afectado por cortocircuito, sobretensiones o electricidad estática.

2.8 Campos de aplicación de la fibra óptica

Las diferentes áreas de aplicación del uso de la fibra óptica son las siguientes [12] [3]:

a) Medicina

Las propiedades de la fibra óptica, tales como la flexibilidad y la transparencia juegan un rol importante en la ciencia de la medicina. Diagnósticos, endoscopia y aplicaciones quirúrgicas en donde se utilizan haces de fibra óptica para enviar puntos de luz y poder ver el interior del cuerpo humano que en la antigüedad era inaccesible. Los campos generales donde se emplea la fibra óptica son los siguientes:

Diagnósticos.- complementa a la radiología, al proporcionar visiones cercanas y amplificadas de puntos concretos y permitir la toma de muestras. El fibroscopio es particularmente útil para la detección de cánceres y úlceras en estado inicial que no son visibles a través de rayos X.

Terapéutico.- permiten la actuación quirúrgica en vías biliares para eliminar cálculos, extraer cuerpos extraños, etc.

Postoperatorio.- observación directa y prácticamente inmediata a la operación de las zonas afectadas.

b) Industria

La fibra óptica puede utilizarse de muchas maneras en la industria. Puede ir desde las tareas más sencillas hasta en el uso de un control sofisticado. A continuación se presentan los usos más importantes de este medio de transmisión en esta área.

Plantas químicas.- El principal uso que se le da a la fibra óptica en las plantas químicas es en el área de control de procesos. La fibra óptica tiene la capacidad de detectar cambios físicos y químicos. Es por ello que se utiliza para detectar estos cambios y activar mecanismos de control. Generalmente los parámetros más comunes a detectar son la temperatura, la presión de la velocidad del flujo, el valor de pH y la densidad del gas. Para cada parámetro se utilizan sensores de fibra óptica colocadas en diferentes ubicaciones y realizan un monitoreo continuo en diferentes puntos de un proceso químico.

Industria aeroespacial.- La fibra óptica tiene dos ventajas en la industria aeroespacial: peso ligero y la impermeabilidad a las interferencias electromagnéticas.

Un avión puede necesitar toneladas de cable de cobre para el cableado de los equipos de comunicación, mecanismos de control e iluminación general. Se necesita de un blindaje metálico en los cableados de sistemas de comunicación y control para evitar interferencias electromagnéticas. Si se sustituye los cables de cobre por fibra óptica que pesan una décima parte que el de cobre y además se retira el blindaje metálico, se puede reducir la cantidad de peso de una aeronave y por lo tanto aumentar su valiosa capacidad de carga útil, además de que es una alternativa mucho más segura pues no es susceptible a causar incendios.

Industria automotriz.- Debido al gran desarrollo tecnológico que está teniendo el automóvil surge la necesidad de transmitir datos a una mayor velocidad, por lo que es conveniente reemplazar el cableado de cobre por uno de fibra óptica tomando en cuenta las nuevas tecnologías que están surgiendo en esta área de la industria: futuras direcciones y frenos eléctricos, nuevo sistema de iluminación, calefacción inteligente, conexión a internet, etc. El uso de la fibra óptica ayudaría además de la ya mencionada alta velocidad de transmisión a reducir enormemente la cantidad de cables así como también el número de conexiones.

c) Instrumentación

En la actualidad existen muchos sensores que utilizan fibra óptica, y se aprovecha que a través este medio no circula corriente eléctrica, dándoles cierta ventaja respecto a los sensores eléctricos. Este tipo de sensores son utilizados para condiciones arduas: alta vibración, calor extremo y ambientes húmedos, explosivos o corrosivos. Además debido a la flexibilidad que las caracteriza pueden colocarse en espacios muy reducidos de forma precisa.

Algunos sensores que incluyen esta tecnología son los siguientes:

- Sensores acústicos
- Sensores eléctricos
- Sensores magnéticos
- Sensores de rotación
- Sensores de aceleración
- Sensores de presión
- Sensores de temperatura

d) Área militar

Las fibras ópticas no irradian energía de RF, y en consecuencia no pueden interferir con otros sistemas de comunicación, esta característica hace que los sistemas de fibras ópticas sean ideales para aplicaciones militares en las que los efectos de las armas nucleares tienen un efecto devastador sobre los sistemas electrónicos convencionales de comunicación.

Otra cualidad por la que se usa en esta área es la seguridad, ya que este medio de transmisión es mucho más seguro que los cables metálicos presentando un alto grado de confidencialidad. En una fibra óptica es imposible que un intruso pueda entrar al cable de fibra sin que el usuario se dé cuenta.

e) Telecomunicaciones

La fibra óptica actualmente es utilizada por muchas compañías de telecomunicaciones para enviar señales de telefonía, conexión vía internet y señales de televisión.

Internet.- El servicio de conexión a internet por fibra óptica, es una de las herramientas más rápidas para navegar en internet, lo que hace posible que millones de personas puedan hacer multitareas en cuestión de segundos como bajar música, videos y comunicarse en línea a través de las redes sociales.

Telefonía.- Las empresas de telecomunicaciones utilizan fibra para conectar todas sus oficinas centrales y switches de larga distancia ya que la fibra tiene un ancho de banda miles de veces mayor que el del cable de cobre y puede transportar señales cientos de veces más lejos antes de necesitar un repetidor lo que hace que el costo de una conexión telefónica sobre fibra sea sólo un pequeño porcentaje del costo de la misma conexión con cobre.

Televisión por cable.- Los enlaces de fibra óptica para video pueden transportar señales de alta definición a lo largo de decenas de kilómetros, eliminando de manera eficaz limitaciones de distancia, y protegiendo al mismo tiempo, contra los problemas eléctricos que pueden afectar un enlace de cobre. Las empresas de televisión por cable utilizan fibra porque les otorga mayor confiabilidad y les brinda la oportunidad de ofrecer nuevos servicios.

Enlace de dos Microcontroladores por Fibra Óptica

La fibra óptica, como ya se ha dicho, es un medio de transmisión muy utilizado en comunicaciones, que permite enviar gran cantidad de datos a una gran distancia, con velocidades relativamente altas. Es el medio de transmisión por excelencia al ser inmune a las interferencias. En este capítulo se expone el procedimiento que se llevó a cabo para realizar el enlace de dos microcontroladores a través fibra óptica, así como información básica acerca del protocolo de comunicación I²C.

3.1 Introducción

Para implementar el enlace, además de utilizar un protocolo de comunicación, se utilizaron los siguientes elementos:

- a) Microcontrolador pic18F4550
- b) Transmisor HFBR-1412
- c) Receptor HFBR-2412
- d) Fibra óptica HFBR-BWS10

Enseguida se describirán las características de cada uno de estos dispositivos.

3.1.1 Microcontrolador pic18F4550

Los microcontroladores pic18F, pertenecen a la familia de gama media de los micros de 8 bits de Microchip. Sus características hacen que estos dispositivos puedan ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones, por ejemplo: teléfonos inteligentes, accesorios de audio, periféricos para juegos de video, dispositivos médicos avanzados, entre otras [13].

El pic18F4550 pertenece a este grupo de dispositivos. Cuenta con puertos de entrada/salida, módulos PWM, comparadores, temporizadores y periféricos de comunicación avanzados.

En la siguiente lista se describen las principales características de este microcontrolador [1].

CARACTERISITICAS

PIC18F4550

Frecuencia de operación	Hasta 48 MHz
Memoria de programa (bytes)	32768
Memoria RAM (bytes)	2048
Memoria EEPROM (bytes)	256
Interrupciones	20
Puertos de E/S	5 puertos: A,B,C,D, E
Temporizadores	4
Módulos de Comparación/Captura/PWM (CCP)	1
Módulos de Comparación/Captura/PWM mejorado (ECCP)	1
Canales de comunicación serie	MSSP, USART
Canal USB	1
Puerto paralelo de transmisión de datos (SPP)	1
Canales de conversión de A/D de 10 bits	13 canales
Comparadores analógicos	2
Juego de instrucciones	75

Los pic 18F, se producen en empaquetados que van desde 8 a 80 pines, presentando cada uno diferentes características. Generalmente se diferencian en la capacidad y tipo de memoria, encapsulado y numero de puertos de E/S. El pic18F4550 posee 40 pines, como se muestra en la figura 3.1, donde se describen cada uno de ellos.

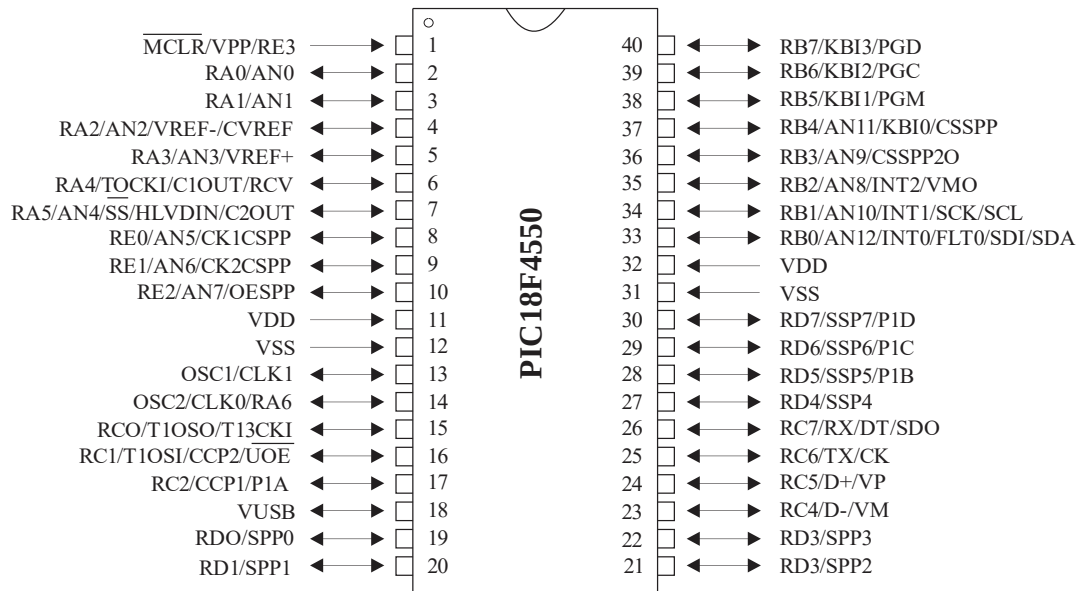


Figura 3.1 Esquema de pines del pic18F4550

Para realizar el enlace de fibra óptica, se utilizarán los pines 33 y 34. En estas líneas se ubica el bus de comunicación I²C (figura 3.2). La línea 33 (SDA) por donde fluyen los datos, y la línea 34 (SCL) que genera la señal de reloj. En la sección 3.2 se explicará más a detalle acerca de estas dos líneas de comunicación.

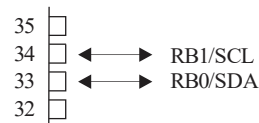


Figura 3.2 Líneas del bus de comunicación I²C

Para poder utilizar los microcontroladores y disponer de todas sus funciones, es necesario del uso de un software y de un programador, con los que se permita escribir el código fuente, compilarlo y posteriormente programarlo en un micro. Para ello Microchip desarrollo un entorno llamado MPLAB IDE y un programador PICKit 3.

3.1.1.1 MPLAB IDE

MPLAB IDE es un programa de software gratuito que se ejecuta en una PC (Windows, Mac y Linux) y se utiliza para desarrollar aplicaciones de microcontroladores Microchip. Se llama un entorno de desarrollo integrado o IDE, ya que proporciona un único “medio ambiente” integrado para desarrollar código para microcontroladores embebidos [14]. En la figura 3.3 se muestra el entorno de MPLAB IDE.

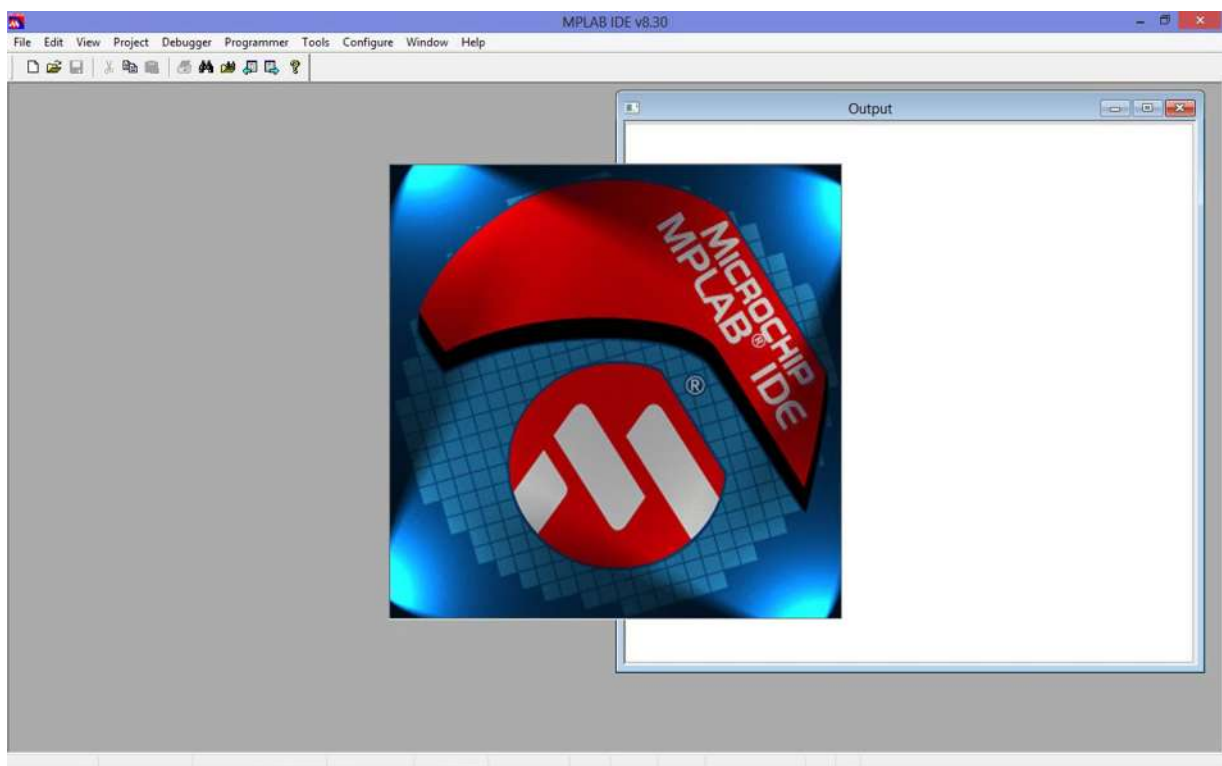
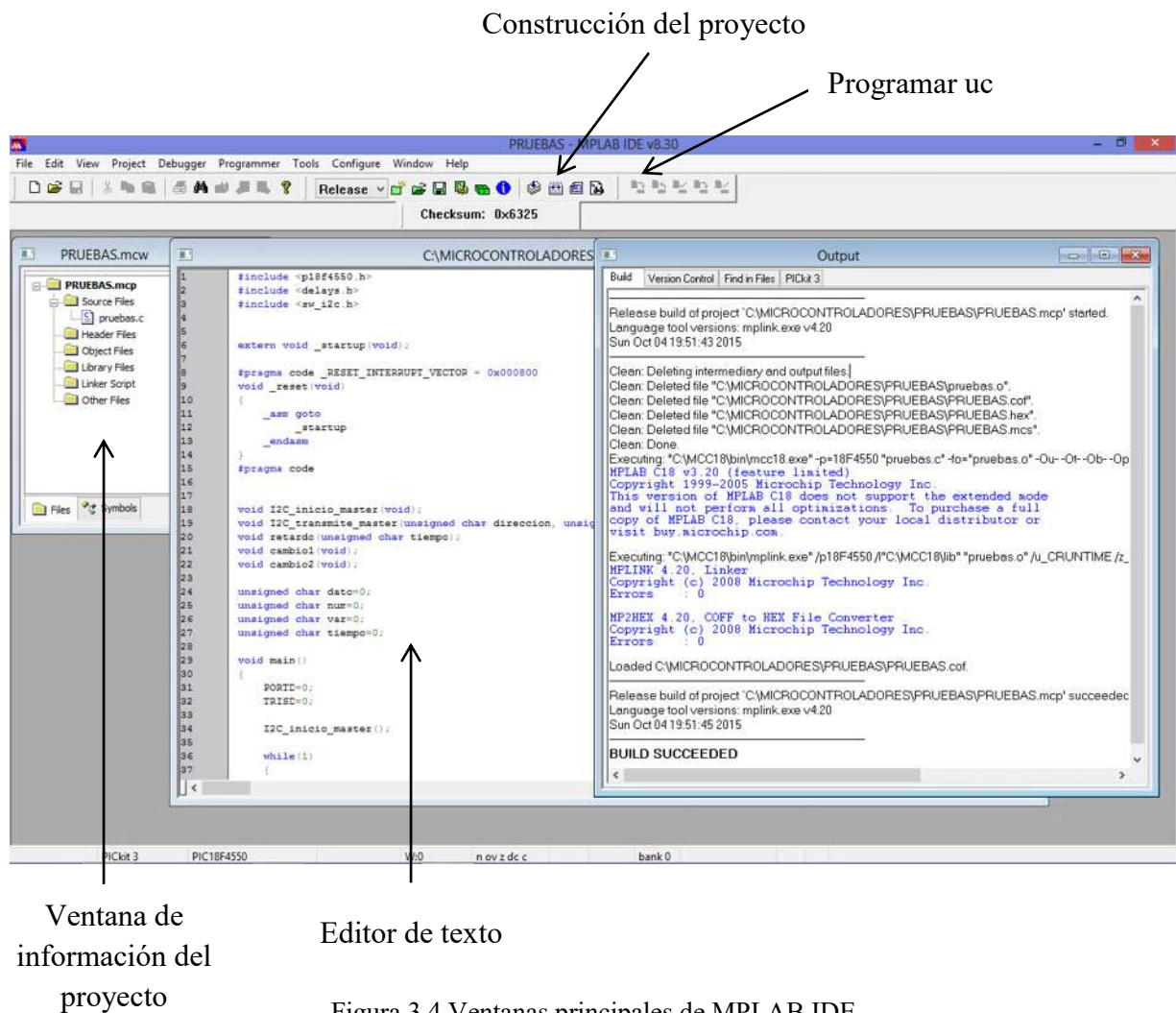


Figura 3.3 Entorno de desarrollo de MPLAB IDE

Los pasos a seguir para desarrollar una aplicación con MPLAB IDE son:

- 1.- Selección del dispositivo
2. Crear el proyecto.
3. Seleccionar las herramientas de lenguaje (Toolsuite).
4. Crear el código fuente (.asm ó .c)
5. Agregar los archivos al proyecto.



En la figura 3.4, se muestran las principales ventanas de trabajo durante la implementación del proyecto.

En la primera ventana se indica información del proyecto, por ejemplo el nombre del archivo fuente o las librerías utilizadas. En la segunda ventana se observa el editor de texto, donde se realiza la escritura del programa fuente y finalmente la tercera ventana, donde se muestran los resultados de la construcción del proyecto, incluyendo los errores encontrados.

El software además cuenta con otras funciones: se pueden realizar simulaciones y hacer una visualización de registros y memoria.

3.1.1.2 PICkit 3

El PICkit 3 (figura 3.5) es un sencillo programador de bajo costo, que se utiliza para el desarrollo de hardware y software de los microcontroladores Microchip PIC. El circuito es controlado por una PC junto con el programa MPLAB IDE.

El programador Pickit 3 presenta las siguientes características [15]:

- Soporte USB de máxima velocidad utilizando los drivers estándar de Windows
- Ejecución en tiempo real
- Monitor de sobre voltaje y sobre corriente incorporado
- Los procesadores funcionan a velocidades máximas
- Soporta bajo voltaje 5.0 V (Rango 1.8 a 5.0)
- LEDS indicadores de diagnóstico (*power, active, status*)
- Pulsador para poner en modo de actualización de *firmware* y para la función *programmer to go*
- Lectura y escritura de programas y de los datos de la memoria del microcontrolador
- Borrado del espacio de memoria de programas de verificación
- Congelamiento de los periféricos en los breakpoints



Figura 3.5 PICkit 3

La descripción de los pines del PICkit 3 se muestra a continuación

Conector Pickit 3	Microcontrolador
1	MCLR/Vpp
2	VDD
3	Ground
4	PGD (ICSPDAT)
5	PGC (ICSPCLK)
6	PGM (LVP)

Hay tres formas de programar un dispositivo con la unidad PICkit 3 [15]:

- A través de MPLAB IDE con el PICkit 3 conectado al PC
- Utilizando la función “*programmer to go*”. Se crea una imagen de programación y se almacena en el PICkit 3. Una vez realizado lo anterior es posible trasladar el PICkit 3 a otros lugares donde no se cuente con una computadora, tampoco será necesario el software MPLAB IDE. Se podrá programar el dispositivo con solo pulsar un botón.
- A través de “Programador de aplicaciones PICkit 3”, un programa de software que le permite a los dispositivos programar sin usar MPLAB IDE.

De los tres casos anteriores, la conexión del inciso a), se muestra en la figura 3.6.

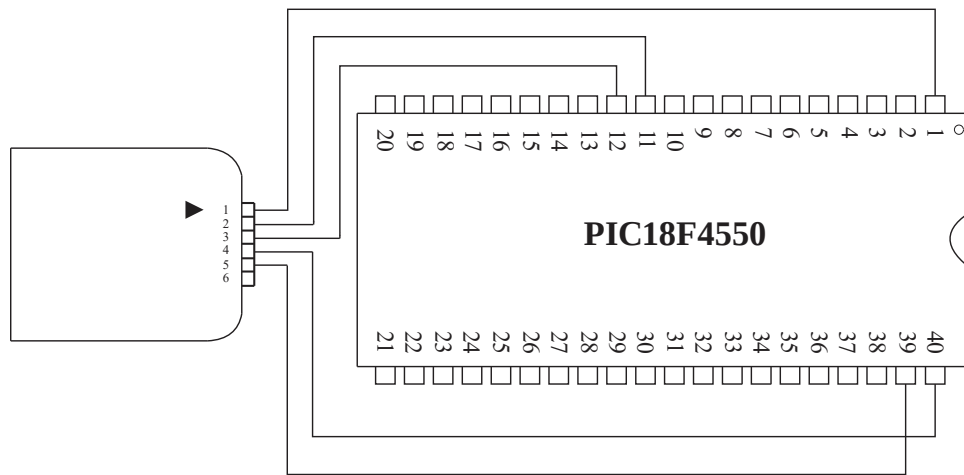


Figura 3.6 Conexión del PICkit 3 con el microcontrolador

3.1.2 Fibra óptica HFBR-BWS10

La fibra óptica utilizada para llevar a cabo la comunicación entre dos microcontroladores es cable de fibra óptica de vidrio con conector SMA, con diámetro de 100/140 μm de 3m de longitud y de canal sencillo [2]. Las especificaciones se muestran a continuación:

- Dimensiones mecánicas:
 - Diámetro del núcleo: 10 μm
 - Diámetro del revestimiento: 140 μm
 - Diámetro de la capa primaria: 900 μm
 - Diámetro del cable exterior: 2.9 μm
- Especificaciones ópticas a 850nm
 - Atenuación máxima: 6dB/km
 - Atenuación típica = 5.5 dB/km
 - Ancho de banda modal mínima=100 MHz-km
 - Apertura numérica = 0.29

- Modos de propagación de la luz en esta fibra óptica

$$V = \frac{2\pi}{850nm} (50\mu m)(0.29) = 107.1837$$

La fibra óptica mencionada, es una fibra multimodo de índice de paso que se muestra en la figura 3.7



Figura 3.7 Cable de fibra óptica HFBR-AWS010

3.1.3 Transmisor HFBR-1412 y Receptor HFBR-2412

La serie HFBR-0400 están diseñados para proporcionar un alto rendimiento en los enlaces de comunicación de fibra óptica para los sistemas de información y aplicaciones industriales, con enlace a grandes distancias.

Los transmisores y receptores son directamente compatibles con conectores "estándar de la industria": ST, SMA, SC y FC. Pueden emitir eficientemente una longitud de onda de 820nm.

El transmisor óptico HFBR-1412 (figura 3.8), contiene un emisor de Arseniuro de galio-aluminio capaz de emitir eficientemente en una longitud de onda de 820 nm para los siguientes tamaños de fibra: 50/120 μm , 62.5/125 μm y 100/140 μm . Esto permite flexibilidad de diseño en la elección del tamaño de la fibra. El transmisor óptico seleccionado proporciona una potencia óptica de -12 dBm a una corriente de 60 mA y a una temperatura de 25°C. Está diseñado para proporcionar un alto rendimiento en los enlaces de comunicación de fibra óptica permitiendo largas longitudes de enlace [16].

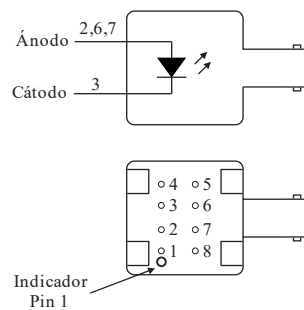


Figura 3.8 Configuración de pines del HFBR-1412

El receptor óptico HFBR-2412 (figura 3.9), está diseñado para funcionar con transmisores ópticos HFBR-1412 y cable de fibra óptica de 50/120 μm , 62.5/125 μm y 100/140 μm . Incorpora un fotodiodo integrado que contiene un amplificador de fotodetector. La salida de este es de tipo transistor schottky [16].

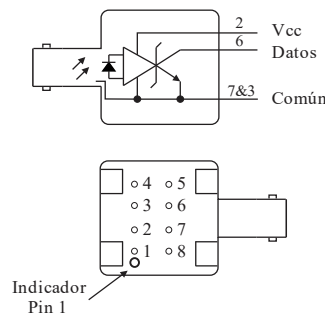


Figura 3.9 Configuración de pines del HFBR-2412

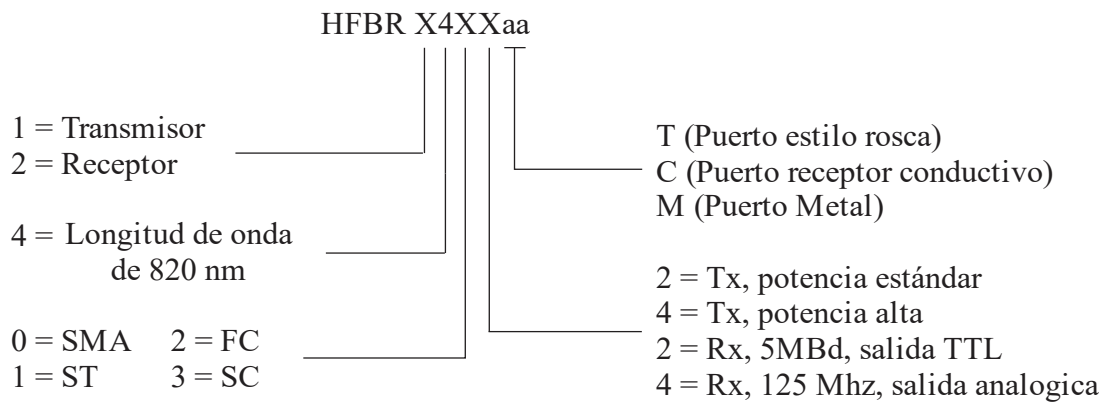
Las principales aplicaciones en las que se pueden emplear estos dispositivos son [16]:

- Redes de área local
- Enlaces periféricos de computadora
- Enlaces del monitor con la computadora
- Enlaces de vídeo
- Módems y multiplexores
- Enlaces de control industrial



Figura 3.10 Transmisor HFBR-1412 y receptor HFBR-2412

El número de guía con el que se identifican a los transmisores y receptores de la serie HFBR-0400, se describen de la siguiente forma:



3.2 Bus de comunicación I²C

El bus de comunicación I²C (*Inter Integrated Circuit*), es un protocolo de comunicación diseñado por Philips Semiconductors (ahora NXP Semiconductors), que se utiliza para la comunicación entre circuitos integrados [17].

Actualmente, este protocolo de comunicación se implementa en más de 1000 circuitos integrados fabricados por más de 50 empresas [17], teniendo una gran aceptación en el mercado por lo que los principales fabricantes de dispositivos semiconductores incluyen al menos un bus I²C que permita la interacción con otros dispositivos. Algunos dispositivos que incorporan este bus de comunicación son los siguientes:

- Actuadores (servos, válvulas, etc.)
- Convertidores A/D y D/A
- Sensores (temperatura, inclinación, velocidad, campo magnético, etc.)
- Memoria EEPROM
- Reloj/calendario de tiempo real (RTC)
- LCD con driver
- Microcontroladores

3.2.1 Características

El bus I²C tiene la característica que la comunicación se realiza a través de dos señales además del común o tierra. La metodología de comunicación es en serie y síncrona. Una de las señales se utiliza para enviar la información mientras que la otra controla la sincronización del reloj. En seguida se describen cada una de estas señales [1].

- SDA (*System Data*) – línea por donde se mueven los datos de un dispositivo a otro.
- SCL (*System Clock*) – línea de reloj que sincroniza el sistema.
- GND (*Masa*) – línea común de conexión entre todos los dispositivos conectados al bus.

Para realizar la comunicación se necesita de al menos un dispositivo configurado como maestro, el cual tiene la iniciativa en la transferencia de datos, decide a que dispositivos esclavos enviar la información y cuando finalizar la comunicación. Los esclavos conectados al bus, tienen la función de recibir los datos enviados por el maestro. Cada dispositivo conectado al bus tiene una dirección asignada por el usuario. Cuando el maestro inicia una comunicación primero envía la dirección del dispositivo con el que se quiere comunicar y los esclavos comprueban si la dirección concuerda con la suya, en caso de que la dirección coincida con un dispositivo, este enviará un señal de conformidad indicando al maestro que está listo para recibir los datos. Los demás dispositivos al no corresponder a esa dirección, ignoraran la solicitud y se pondrán todos a la espera de que el maestro inicie una nueva secuencia de comunicación [1].

Las dos líneas del bus son del tipo drenador abierto, es decir un estado similar al de colector abierto, pero asociadas a un transistor de efecto de campo. Se deben polarizar en estado alto por medio de resistencias pull up que defina una estructura de bus que permita conectar en paralelo múltiples entrada y salidas.

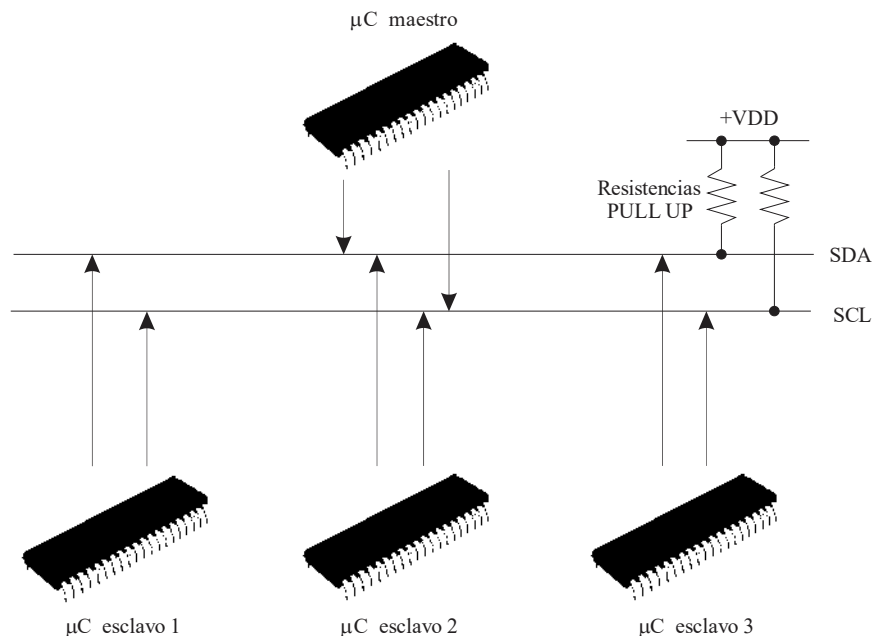


Figura 3.11 Conexión de bus I²C con un maestro y tres esclavos

El bus de comunicación I²C, como todo caso, presenta ventajas y desventajas frente a otros protocolos de comunicación, por lo que es importante considerarlas antes de desarrollar una aplicación.

Ventajas

- Pocos cables de interconexión
- Conexión de dispositivos a distancia
- Componentes con encapsulado reducido

Desventajas

- Velocidad inferior en comparación a otros protocolos
- Disponibilidad de circuitos que soporten el bus

3.2.2 Protocolo de programación

El protocolo de programación que se describirá a continuación sólo muestra los pasos para una configuración donde se tiene un solo maestro y varios esclavos, es decir unidireccional. La configuración multimaestro no se presenta en este trabajo debido a que el objetivo principal es realizar un enlace de dos microcontroladores por fibra óptica. Para más información acerca de este protocolo, se pueden consultar el manual señalado en la bibliografía [1].

La transmisión de datos se inicia con la condición de inicio (START) de transferencia de datos. El dispositivo maestro deberá poner a nivel bajo la línea de datos (SDA) y dejando a nivel alto la línea de reloj (SCL).

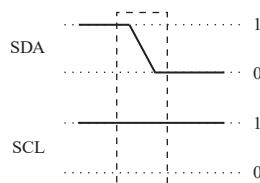


Figura 3.12 Condición de inicio del bus I²C

Al iniciar la transmisión, el maestro envía la dirección del esclavo con el que desea establecer la comunicación. La dirección contiene siete bits que componen la dirección del dispositivo al que se desea enviar la información. Tras la dirección se adjunta un octavo bit que corresponde la operación que se va a realizar (0 = escritura, 1 = lectura).

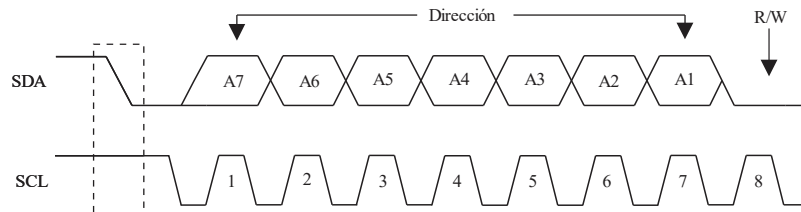


Figura 3.13 Envío de dirección al dispositivo esclavo

Una vez que el maestro envía la dirección, el esclavo genera un bit de reconocimiento (ACK) ubicado después del octavo bit que ha enviado el maestro. Si no se genera este bit de reconocimiento, la comunicación se interrumpe generando una señal de STOP.

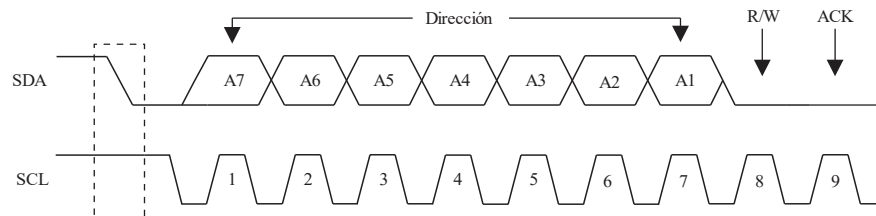


Figura 3.14 Reconocimiento de la dirección por el dispositivo esclavo

El bit de reconocimiento ACK, le permite al maestro si el esclavo reconoció la solicitud para iniciar el intercambio de información. En ese momento el maestro comienza a transmitir los datos.

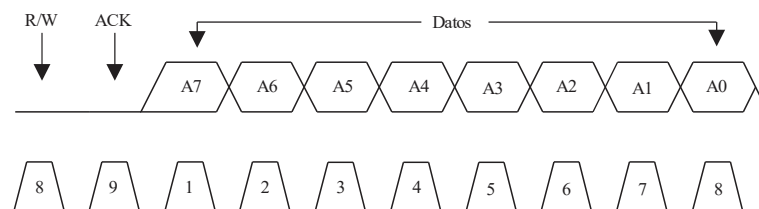


Figura 3.15 Transferencia de datos

Al enviarse el primer dato, el esclavo deberá generar un bit de reconocimiento ACK después del octavo bit. Por cada byte enviado se debe de poner el noveno bit a nivel lógico bajo (ACK=0) para continuar enviando información, si no se realiza esto, la comunicación se interrumpe y se genera una señal de STOP.

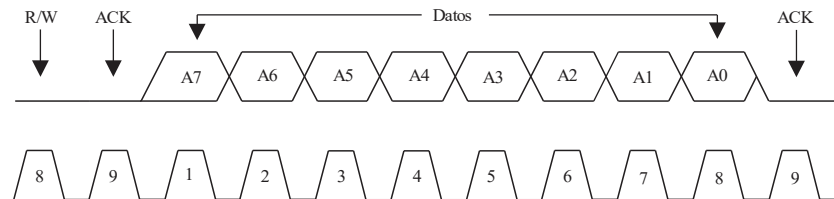


Figura 3.16 Reconocimiento de un byte recibido

La condición de fin de transferencia se produce cuando un dispositivo maestro pone en estado alto la línea de datos (SDA), de igual manera la línea de reloj (SCL) también se deja en estado alto [1].

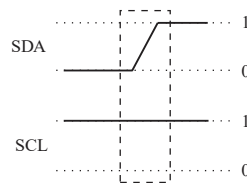


Figura 3.17 Fin de transferencia de datos

Básicamente este es el protocolo que se sigue en el bus de comunicación I²C para mandar información de un byte, el cual se resume en la figura 3.18.

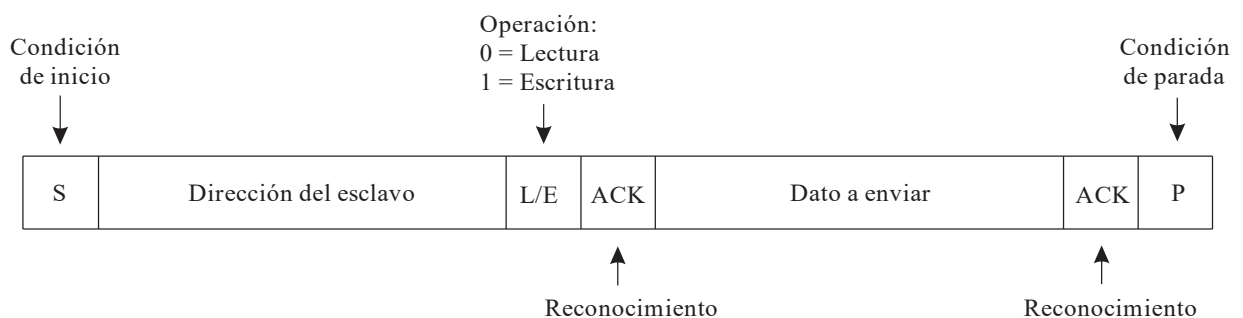


Figura 3.18 Transmisión de un byte

3.3 Comunicación entre dos microcontroladores

Los microcontroladores cuentan con registros asociados al bus de comunicación I²C, que se utilizan para realizar diferentes modos de operación. Igualmente existen librerías que incorporan este protocolo, haciendo más fácil la programación.

3.3.1 Registros de pic18F4550

El pic18F4550 tiene seis registros, utilizados para configurar el módulo I²C. Por ejemplo, se usan para disponer el dispositivo como maestro, esclavo o multimaestro. También se emplean para cargar la dirección del dispositivo esclavo, el dato a enviar, modificar los bits de reconocimiento, entre otras.

Estos registros se describen a continuación [1].

- El registro **SSPCON1** y **SSPCON2** son registros de control.
- El registro **SSPSTAT** es un registro de estado.
- El registro **SSPADDD** define la dirección del esclavo o los baudios de la comunicación del maestro.
- El registro **SSPBUF** es un buffer de transmisión/recepción serie donde se va a leer o escribir los datos a transmitir.
- El registro **SSPSR** es un registro de desplazamiento, en este se carga el dato y lo desplaza para transmitirlo o recibirlo.

La información detallada de cada registro, se encuentra en el apéndice A.

3.3.2 Librería I²C de MPLAB C18

Microchip tiene muchas librerías ya definidas que simplifican la programación. La librería “<sw_i2c.h>” incorpora funciones que están diseñadas para implementar un bus I²C, mediante pines de E/S desde un microcontrolador. Las siguientes funciones se utilizan para el modo maestro [18].

SWAckI2C	Genera un bit de reconocimiento
SWPutI2C	Escribe un byte en el bus I ² C
SWStartI2C	Genera una condición de inicio del bus I ² C
SWStopI2C	Genera una condición de parada del bus I ² C

3.3.3 Programación del bus I²C

La programación del dispositivo maestro y esclavo, se realizó utilizando las funciones anteriormente descritas. También se utilizaron los registros asociados al bus I²C. El siguiente diagrama (figura 3.19) [1] muestra la rutina que debe seguir el dispositivo maestro.

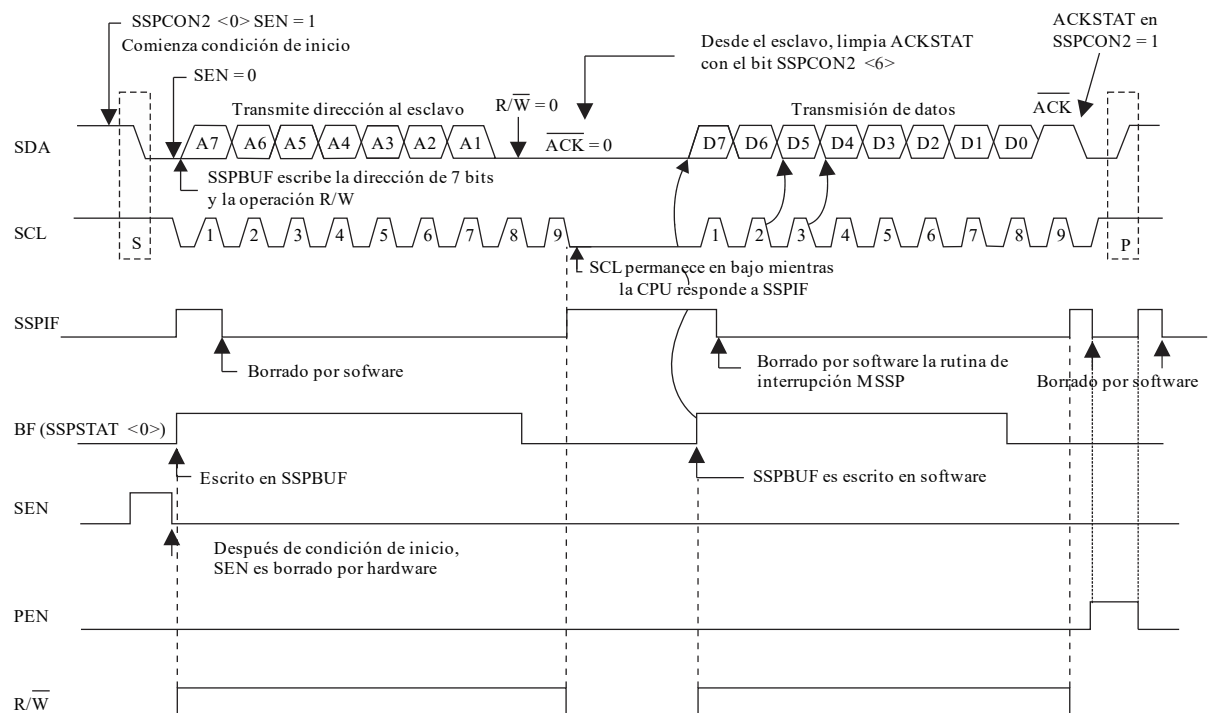


Figura 3.19 Transmisión del modo I²C maestro

Sin embargo, como ya se dijo, se cuenta con una librería asociada al bus I²C, por lo que no fue necesario configurar todos los registros anteriores en modo maestro. Para ello, sólo se utilizó la siguiente instrucción [18]:

```

SWStartI2C();
SWPutcI2C(direccion);
SWAckI2C();
SWPutcI2C(dato);
SWAckI2C();
SWStopI2C();

```

Con lo anterior, es posible establecer una condición de inicio y terminación, así como enviar la dirección y los datos.

Para el otro dispositivo, en la figura 3.20 se muestra la secuencia a seguir para establecer la comunicación en I²C modo esclavo [1].

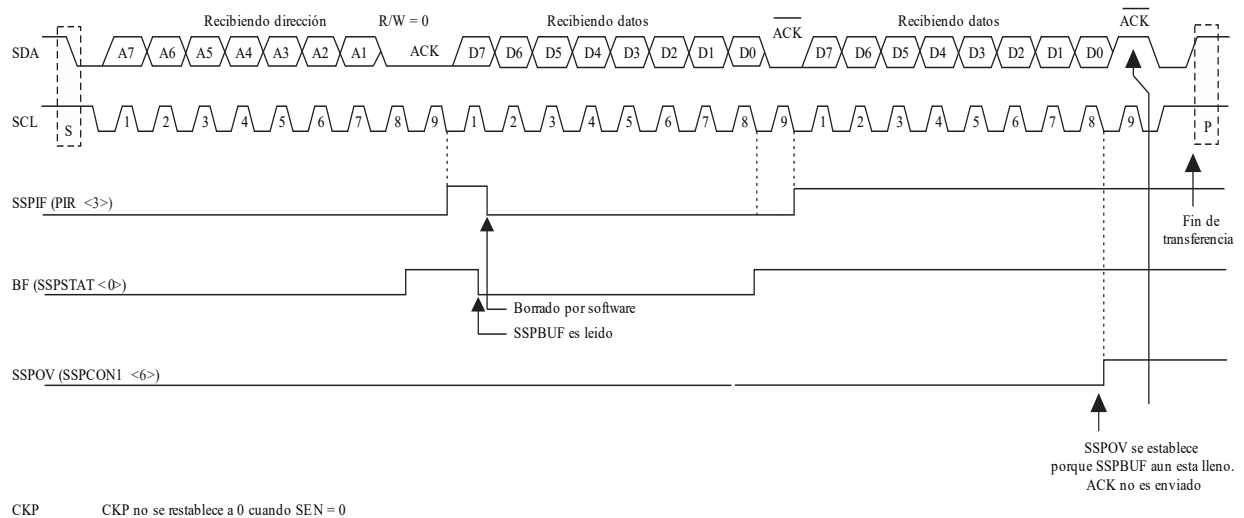


Figura 3.20 Recepción del modo I²C esclavo

En cambio, para el caso del dispositivo esclavo, se utilizaron todos los registros correspondientes al bus I²C.

El código de programación completo de ambos dispositivos, se muestran en el apéndice B.

3.4 Enlace de fibra óptica

Para realizar el enlace de fibra óptica, se implementó el circuito presentado en la hoja de datos [16]. En la imagen 3.21 se muestra la conexión del transmisor HFBR-1412.

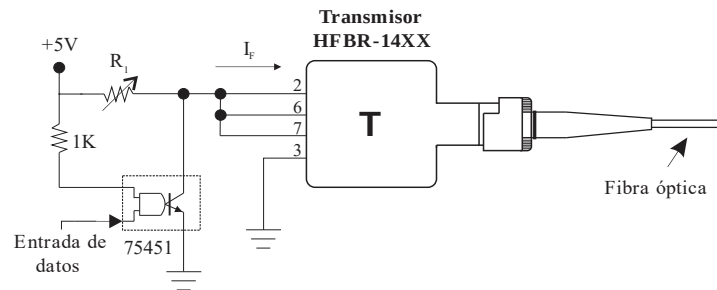


Figura 3.21 Configuración típica para el transmisor HFBR-1412

La salida de datos del microcontrolador (pin 34), produce una corriente muy pequeña del orden de los micro amperes. Esta corriente es insuficiente para activar el LED. Es por ello que se utiliza una compuerta AND del tipo SN75451B. Esta compuerta, tiene la característica de poseer un transistor conectado internamente a su salida, permitiendo así tener el control de la corriente.

Una de las entradas de la compuerta será fija y permanecerá en estado alto. En la otra entrada se conectara la señal SDA proveniente del microcontrolador. Dependiendo del estado lógico de esta última entrada, se presentan los siguientes casos:

- Si la entrada es “0”, la salida de la compuerta también será “0” (figura 3.22). Por lo tanto el transistor entrara en corte originando una corriente de colector mínima (prácticamente igual a cero) y un voltaje de colector a emisor máximo, casi igual al voltaje de alimentación ($V_{cc} = 5$ volts).
- Cuando se tiene un valor de “1” a la entrada, de igual manera a la salida de la compuerta se tendrá un “1” (figura 3.23). Esto ocasiona que el transistor entre en la zona de saturación, ocasionando que la corriente de colector sea máxima y el voltaje de colector a emisor sea nulo.

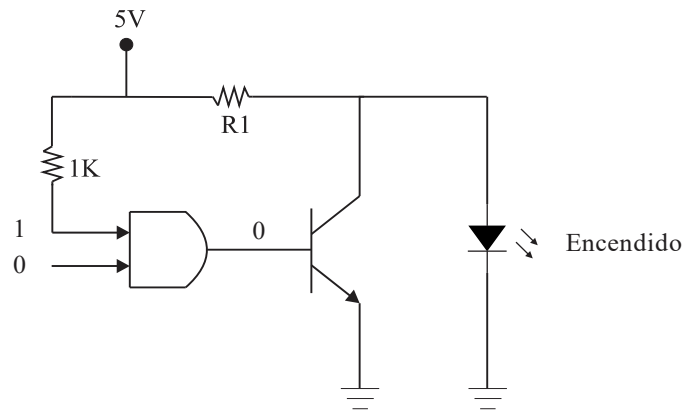


Figura 3.22 Transistor en corte, cuando la entrada de datos es cero.

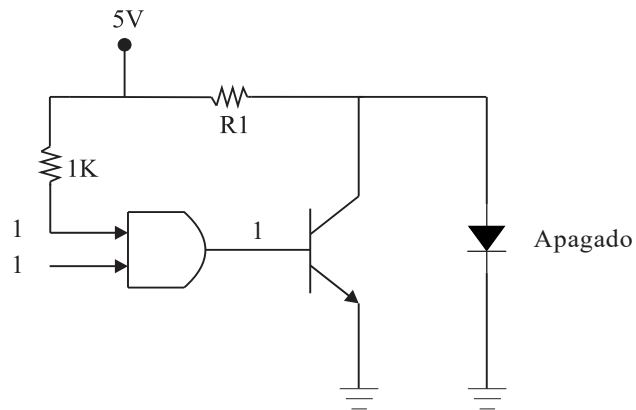


Figura 3.23 Transistor en saturación, cuando la entrada de datos es uno

Con lo expuesto anteriormente, se obtiene la siguiente tabla de verdad de la compuerta SN75451B. La salida de datos (Colector a emisor), por ende debe ser igual a la entrada SDA. Sin embargo se observa que la salida está invertida a la entrada de datos, por lo que será necesario invertir la señal antes de ingresarla al transmisor.

Entrada fija	Entrada de datos	Salida
1	1	0
1	0	1

La resistencia R1, es el único elemento que será necesario calcular, el cual limitará la corriente a través del LED.

Para el cálculo se consideró la distancia de la fibra óptica utilizada y las tablas que proporciona la hoja de datos.

La distancia de la fibra óptica es de 3 metros, con diámetro de 100/140 μm . De la figura 3.24 (a), la corriente de excitación I_F para esa longitud corresponde a un valor de 3.33 mA aproximadamente. Considerando esa corriente, de acuerdo a la tabla de la figura 3.23 (b), se observa que para un valor de 3.33 mA le pertenecen aproximadamente 1.46 volts.

Por lo tanto, el valor de la resistencia es:

$$R1 = \frac{V_{cc} - V_f}{I_F} = \frac{5v - 1.46v}{3.33 \text{ ma}} = 1.063 \text{ K}\Omega$$

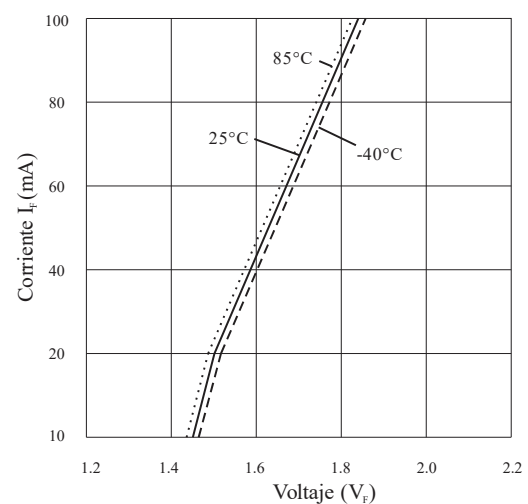
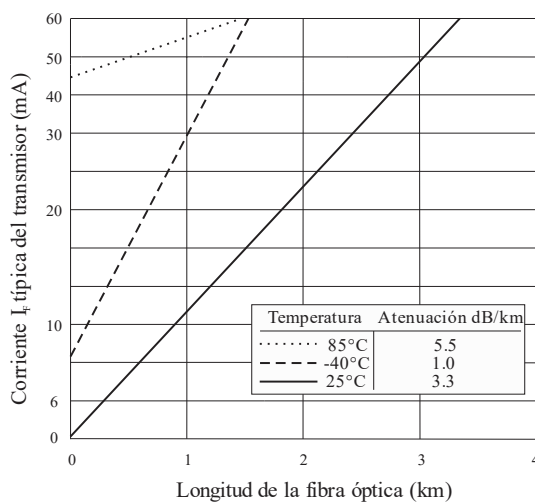


Figura 3.24 Tablas utilizadas para calcular el valor de R1. a) Corriente I_F vs longitud de fibra óptica.
b) Corriente I_F vs voltaje (V_f)

Sin embargo, al implementar el enlace con el valor de la resistencia calculada anteriormente, se comprobó que la comunicación falla, debido a que la corriente no es suficiente para alimentar el diodo. Posteriormente se realizó una prueba en la que se fue variando la resistencia R1 hasta que la transmisión de datos fuera satisfactoria.

Con el experimento anterior se observó que el enlace comienza a transmitir a partir de un valor de resistencia de 438Ω aproximadamente, es decir para enlaces mínimos de 1 km de longitud.

Este inconveniente, fue ocasionado debido a la corta longitud de la fibra óptica utilizada. El cálculo de R1, es necesario sólo en caso de que la fibra empleada sea como mínimo de 1 km de longitud. Para longitudes por debajo de esa longitud, puede considerarse el valor de 438Ω , el cual no genera ningún inconveniente.

Para el circuito receptor, igualmente se utilizó el circuito propuesto en la hoja de datos, que se muestra en la figura 3.25.

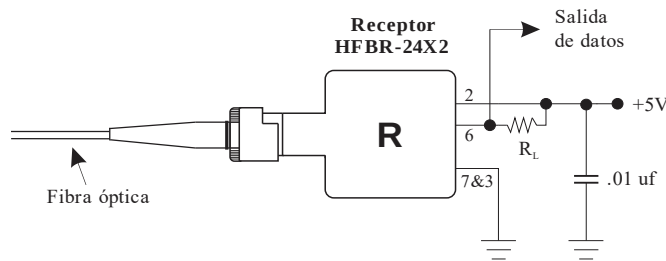


Figura 3.25 Configuración típica para el receptor HFBR-2412

La alimentación para el esquema anterior, es de un voltaje de 5 volts. Es esencial que se conecte un condensador cerámico desde el pin 2 (V_{CC}) al pin 3 (tierra), de un valor de 0.01 micro faradios [16].

Finalmente en la imagen 3.26, se ilustra la conexión total para implementar el enlace de fibra óptica con dos microcontroladores. En el esquema, un dato de 1 byte es generado por el dispositivo maestro. Este dato es transmitido por la fibra óptica hasta el receptor esclavo, el cual lo mostrará a través del puerto D.

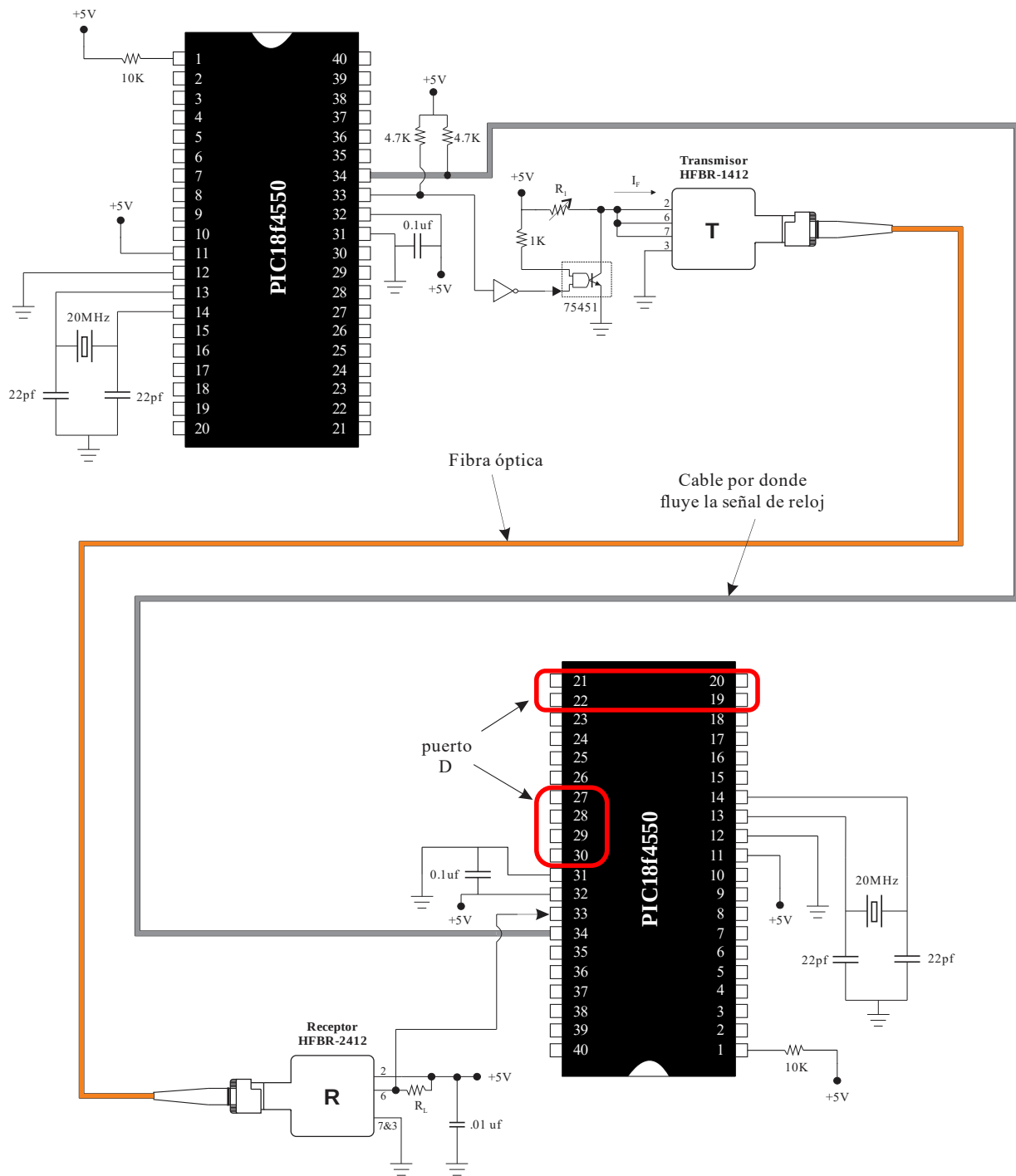


Figura 3.26 Enlace de fibra óptica con microcontrolador

3.5 Implementación del enlace

En las siguientes imágenes se muestran la implementación del enlace en una placa protoboard. En la primera (figura 3.27) se observa el microcontrolador configurado para enviar el siguiente dato: 11111111.

El dato recibido por el esclavo, se muestra a través del puerto D.

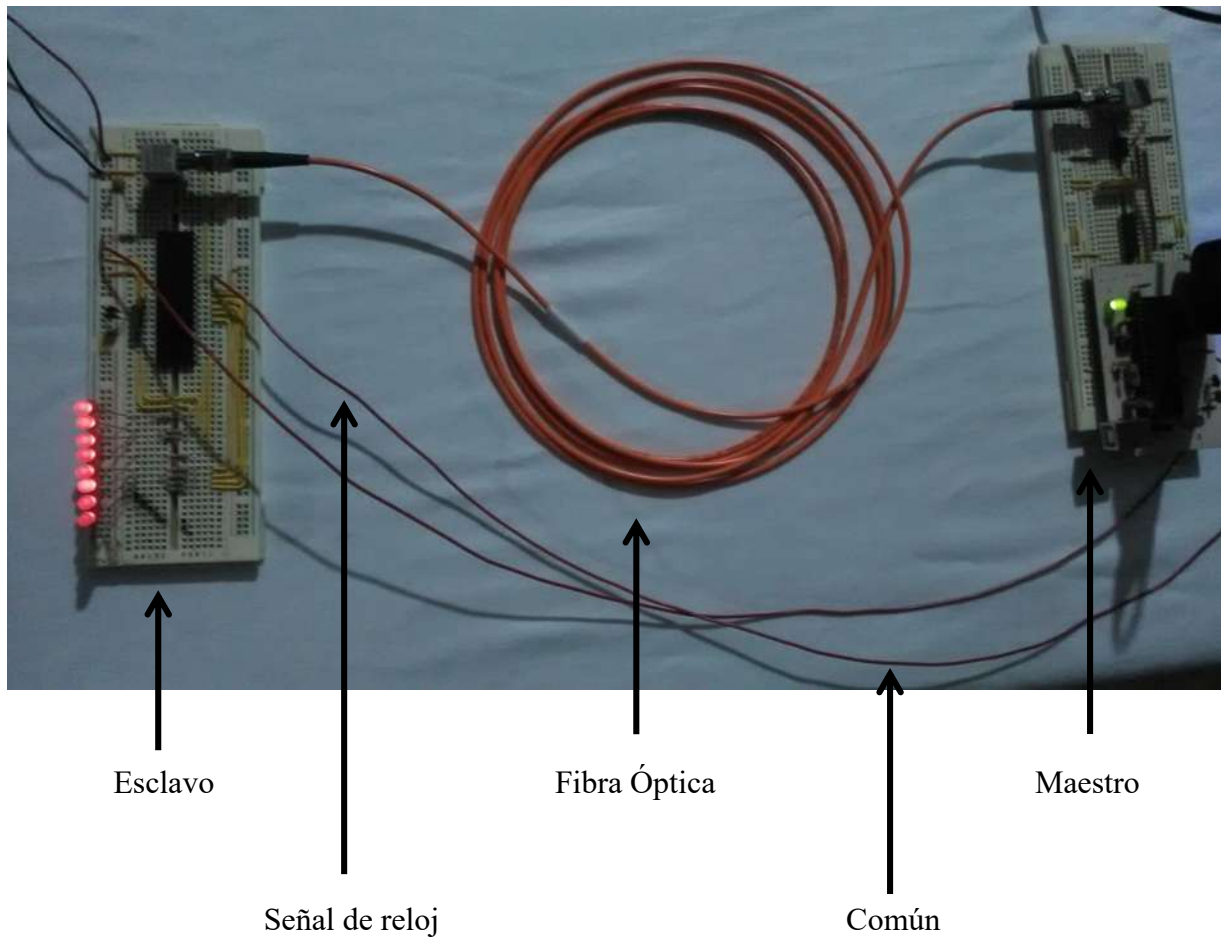


Figura 3.27 Envío de un byte: 11111111

Del mismo modo, en la segunda imagen (figura 3.28), se muestra el envío de otro dato. En este caso la información enviada es: 10011001

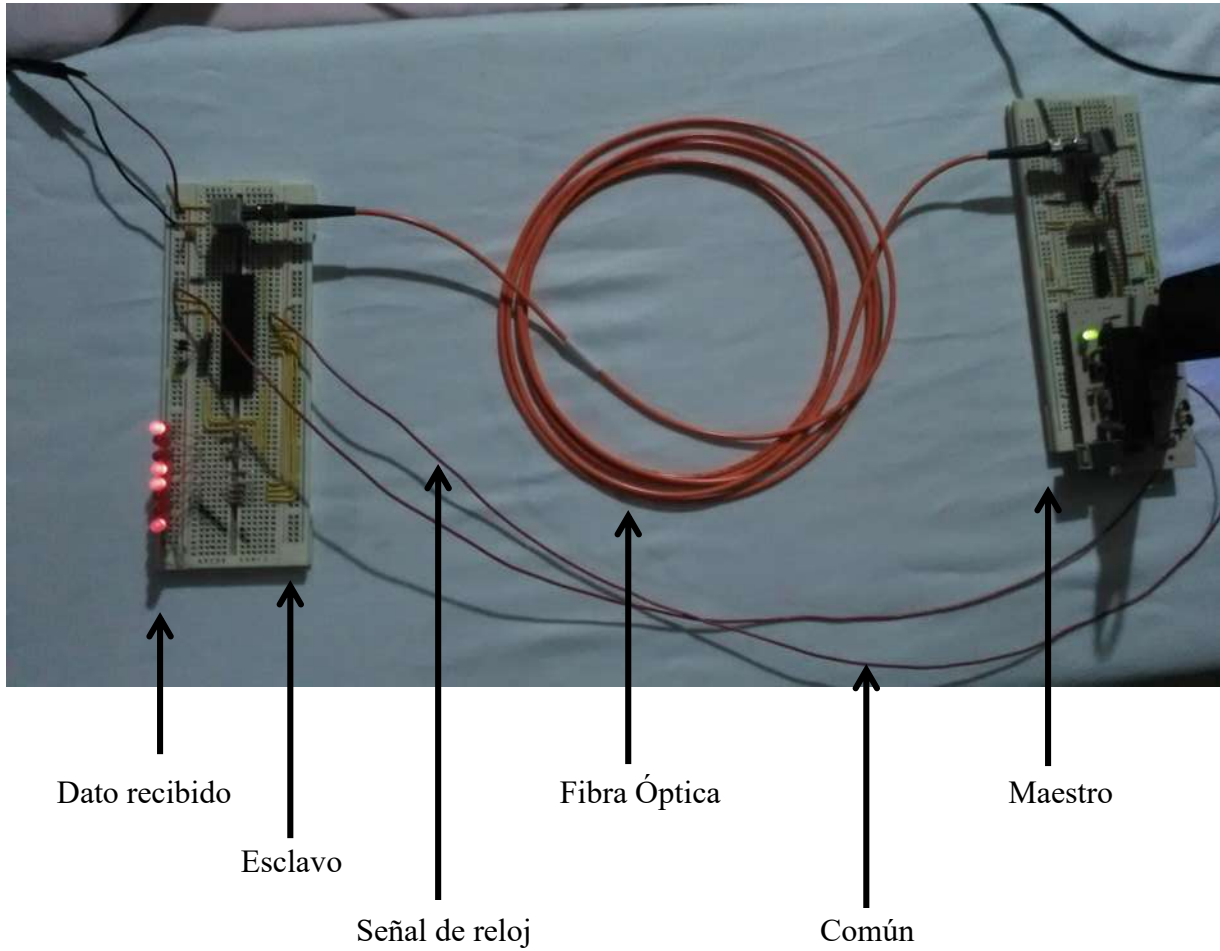


Figura 3.28 Envío de un byte: 10011001

Aplicación utilizando el enlace de fibra óptica

El enlace de comunicación desarrollado, puede ser utilizado en muchas aplicaciones donde el sistema requiera bajas pérdidas de información, así como velocidades altas de transmisión. Sin embargo, este trabajo está más enfocado a la implementación del enlace, por lo que su uso se limitó a una aplicación sencilla basada en realizar la sincronización de un sistema de semáforos, en donde a través de un solo microcontrolador (maestro) se controlen los estados de cada semáforo (esclavos).

4.1 Introducción

Debido al incremento de automotores en los últimos años, además del aumento de movilización de personas en el cumplimiento diario de sus labores, surge la necesidad de sistemas de semaforización cada vez más seguros, rápidos y eficientes. Debido a ello, permanentemente se proponen diferentes estrategias para mejorar la infraestructura de los sistemas de semáforos.

A continuación, se da la definición de semáforo, además de la descripción de cada uno de los elementos que lo conforma.

4.1.1 Semáforo

El semáforo es un dispositivo de señalización mediante el cual se regula la circulación de vehículos y peatones en las vías, asignando el derecho de paso secuencialmente por las indicaciones de luces de color rojo, amarillo y verde controladas por un control de tráfico electrónico [19].

Las luces de color indican las siguientes funciones:

- Verde:
 - Si la luz es fija indica “avanzar”.
 - Si la luz es intermitente, alerta el cambio de luz a rojo.
- Amarillo:
 - Advierte que la luz roja aparecerá de inmediato.
 - Si la luz es intermitente, significa “precaución”.
- Rojo:
 - Detenerse

El orden en que se encienden y apagan las luces de los semáforos, generalmente tienen la secuencia que se muestra en la figura 4.1.

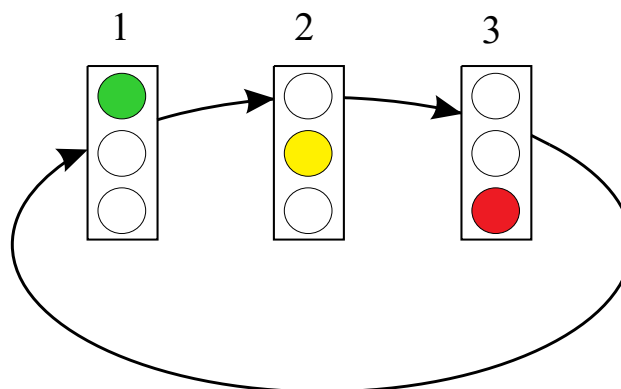


Figura 4.1 Secuencia de las luces de un semáforo

El semáforo consta de una serie de elementos físicos, como la cabeza, soporte, cara, lente, visera, y placa de contraste. Sus definiciones y características se enumeran a continuación [19].

- a) **Cabeza:** Es el armazón donde se localizan las partes visibles del semáforo (luces) y que están orientadas en diferentes direcciones.
- b) **Soportes:** Son las estructuras que sujetan la cabeza del semáforo y que tienen la función de ubicarlo en la posición que permitan al conductor y al peatón la mejor visibilidad.

Algunos elementos de soporte deberán permitir ajustes angulares, verticales u horizontales de las caras de semáforos.

Por su ubicación en la intersección, los soportes se clasifican en:

- Ubicación a un lado de la vía:
 - Postes
 - Ménsulas cortas
- Ubicados en la vía:
 - Ménsulas largas sujetas a postes laterales
 - Cables de suspensión
 - Postes y pedestales en islas

- c) **Cara:** Es la parte donde se localizan las luces del semáforo.
- d) **Lente:** Parte de la unidad óptica que dirige la luz de la lámpara a la dirección deseada.
- e) **Visera:** Es un elemento que se coloca encima o alrededor de cada una de las unidades ópticas y se utiliza para impedir que los rayos del sol incidan en este y den la impresión de estar iluminadas. También se usan para evitar que la luz del semáforo se observe en otras direcciones que no sea a la que este enfocada.
- f) **Placa de contraste:** Elemento utilizado para incrementar la visibilidad del semáforo y evitar que otras fuentes lumínicas confundan al conductor.

El semáforo se utiliza para desempeñar básicamente las siguientes funciones [19]:

1. Interrumpir periódicamente, por lapsos cortos de tiempo, el flujo vehicular o peatonal para permitir el paso a otra corriente vehicular.
2. Regular la velocidad de los vehículos para mantener la circulación continua a una velocidad constante.
3. Controlar la circulación por cada carril.
4. Reducir el número de accidentes.
5. Mantener ordenado el tránsito.
6. Establecer la dirección del movimiento del tránsito.

4.2 Diseño del semáforo

Actualmente debido a su rentabilidad, se están utilizando lámparas a LED para la señalización luminosa, puesto que las lámparas de LED utilizan solo 10 % de la energía consumida por las lámparas incandescentes, tienen una vida estimada 50 veces superior, y por tanto generan importantes ahorros de energía y de mantenimiento, satisfaciendo el objetivo de conseguir una mayor fiabilidad y seguridad pública [20].

La mayor parte de los semáforos actuales, utilizan 3 lámparas para mostrar los colores característicos de este dispositivo, como se muestra en la figura 4.2.



Figura 4.2 Semáforo con 3 lámparas a base de iluminación LED

Para este trabajo, se propone (solo el diseño) que el semáforo, muestre los 3 colores en una sola cara, como se muestra en la figura 4.3. Para esto, se pueden utilizar diodos LED bicolor RG. Esto para tener un diseño más innovador.



Figura 4.3 Semáforo con una sola cara

4.3 Sincronización de semáforos

La clasificación más útil de los sistemas de control de semáforos está basada en el método de coordinación. Puesto que el propósito de esta coordinación es organizar y dar fluidez al tránsito, es esencial entender de qué manera opera la corriente vehicular según los diversos sistemas. Según esto, existen cuatro tipos de sincronización de semáforos no accionados o pre-sincronizados [19]: sistema simultáneo, sistema alterno, sistema progresivo limitado y sistema progresivo flexible.

4.3.1 Sistema simultaneo

En un sistema simultáneo todos los semáforos muestran la misma indicación a lo largo de la vía aproximadamente al mismo tiempo.

En todas las intersecciones, la sincronización esencialmente es la misma y las indicaciones cambian simultáneamente o casi al mismo tiempo, de manera que todos los semáforos indiquen luz verde en la dirección de la calle principal y luz roja en todas las caras que den a las calles secundarias, cambiando alternadamente.

Si únicamente se trata de coordinar hasta cinco intersecciones muy próximas entre sí, deberá emplearse este sistema, dejando un tiempo de luz verde suficiente en la calle principal para permitir que pase una proporción mayor de circulación. Cuando la intensidad del tránsito es alta, el sistema simultáneo puede dar buenos resultados. Cuando el volumen de tránsito es bajo este sistema no es recomendable, debido a que se propician altas velocidades entre tiempos de luz verde y la velocidad media resulta baja debido a la detención simultánea de todo el tránsito a lo largo de la vía, que impide el movimiento continuo.

4.3.2 Sistema alterno

En el sistema alterno los semáforos adyacentes o grupos de semáforos adyacentes muestran indicaciones alternas a lo largo de una ruta determinada. El sistema puede ser sencillo, en el que los semáforos adyacentes muestran indicaciones contrarias u opuestas. Los sistemas alternos dobles y triples consisten en un grupo de dos o tres semáforos que respectivamente muestran indicaciones contrarias.

El sistema alterno usualmente es un mejoramiento del sistema simultáneo en el sentido de que a través de una serie de intersecciones controladas de esta manera puede haber, un movimiento continuo de grupos de vehículos a una velocidad predeterminada, siendo esto sumamente eficiente donde las longitudes de las cuadras, o de los grupos alternados de cuadras, son iguales.

En estos sistemas se deja un desfase de medio ciclo entre grupos de intersecciones adyacentes. El sistema alterno puede ser operado con un solo control, aunque es recomendable el uso de controles locales para una mayor flexibilidad en la operación.

4.3.4 Sistema progresivo limitado

En el sistema progresivo limitado se fija una duración común a los ciclos y las indicaciones de luz verde se dan independientes, de acuerdo con las exigencias de cada intersección y de conformidad con un programa de tiempos para permitir circulación continua o casi continua de grupos de vehículos que circulan a la velocidad de proyecto.

La supervisión de un sistema progresivo limitado se hace mediante un controlador maestro a través de interconexión de cables o por medio de señales transmitidas por ondas. Puede utilizarse para mantener relaciones de sincronización (desfasamiento) apropiadas entre semáforos, o pueden emplearse controladores impulsados por motores sincrónicos operados por una fuente común o sincronizada eléctricamente sin interconexión o supervisión remota mediante un control maestro. Pero las fallas de energía, los descensos bruscos del voltaje y las variaciones de temperatura pueden causar que los controladores individuales se salgan de su ritmo e interrumpan el movimiento planificado de los vehículos.

4.3.5 Sistema progresivo flexible

Este sistema abarca todas las características del anterior y tiene una serie de características adicionales que dependen del tipo de controlador de la intersección, del control maestro y de otros accesorios. Se usa un ciclo común en todo el sistema. No obstante, la duración del ciclo se puede variar con la frecuencia que se desee, en función del día de la semana y/o la hora del día.

Mediante el uso de controles en intersecciones con carátulas múltiples, es posible establecer varios programas para la división del ciclo y cambiar los desfases con la frecuencia deseada. Se pueden establecer programas de tiempo predeterminados en los controles múltiples, favoreciendo o dando preferencia a las circulaciones de máxima demanda durante el día o la semana, demandas fuera de la hora pico y otras condiciones del tránsito.

Los motores sincrónicos operados desde una fuente de energía de frecuencia variable pueden proporcionar varias longitudes de ciclo diferentes y el número de programaciones posibles pueda expandirse adecuadamente.

En un sistema progresivo es necesario conocer las demandas de tránsito para poder seleccionar los programas de tiempo y coordinación apropiados. Las mediciones de intensidades de tránsito y de velocidad son esenciales para determinar correctamente las duraciones de ciclos, sus divisiones y desfases. Con objeto de obtener la máxima flexibilidad, los aforos de tránsito deben efectuarse frecuentemente.

4.4 Sincronización de un sistema de semáforos con fibra óptica

El sistema de semáforos que se implementará, consistirá de 3 cruces de semáforos de una avenida principal. Para ello se considerará el sistema simultáneo que se describió anteriormente. En la figura 4.4 se muestra una representación de las 3 intersecciones.

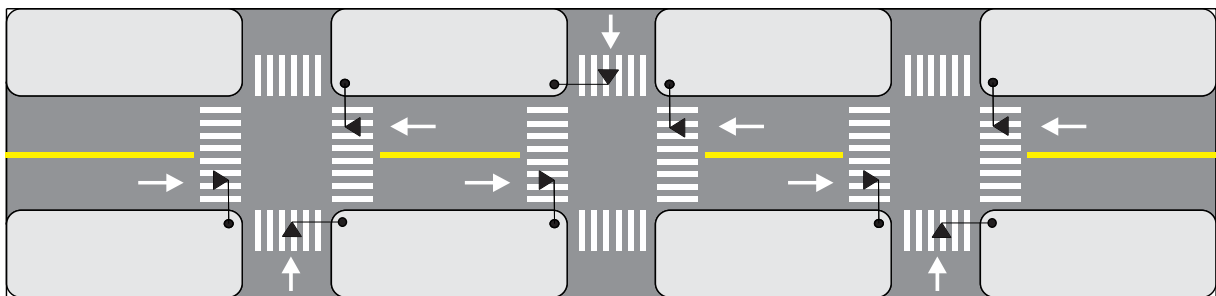


Figura 4.4 Esquema de una avenida principal con 3 intersecciones

El sistema, estará controlado por un solo dispositivo maestro (microcontrolador 1), el cual estará enviando los estados a cada uno de los 3 esclavos (microcontroladores 2, 3 y 4). En la figura 4.5 se muestra como se realizará la sincronización utilizando 4 microcontroladores.

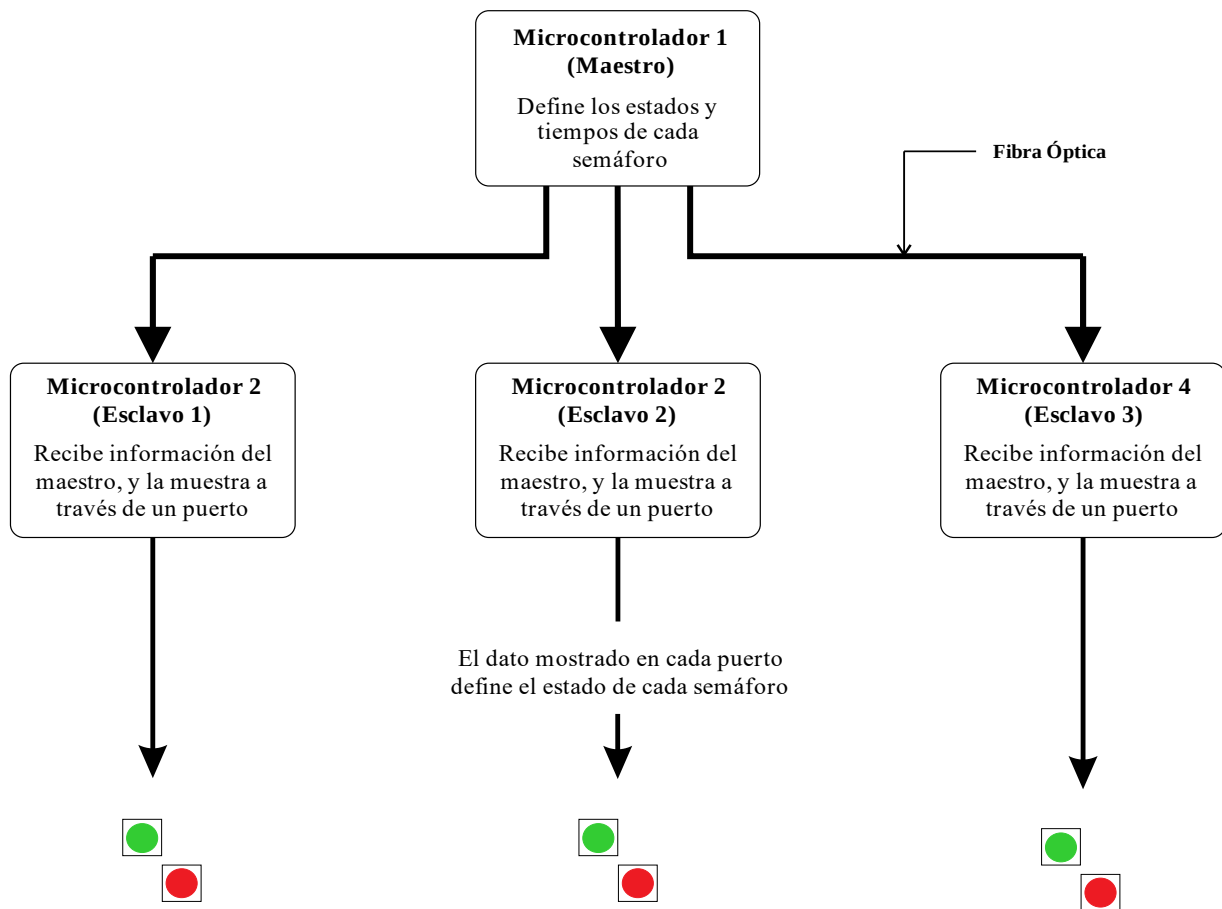


Figura 4.5 Esquema de sincronización de un sistema de semáforos

El puerto donde se mostraran los datos recibidos del dispositivo maestro, es el puerto D. Este puerto es de 8 bits, de los cuales sólo se utilizarán 4, para formar dos semáforos (1 cruce). Cada pin del puerto, activará la luz correspondiente según sea el estado del semáforo. Con un “0” lógico la luz estará desactivada mientras que con un “1” lógico la luz permanecerá encendida. En la figura 4.6 se muestra la combinación de la salida digital del microcontrolador para cada fase del semáforo.

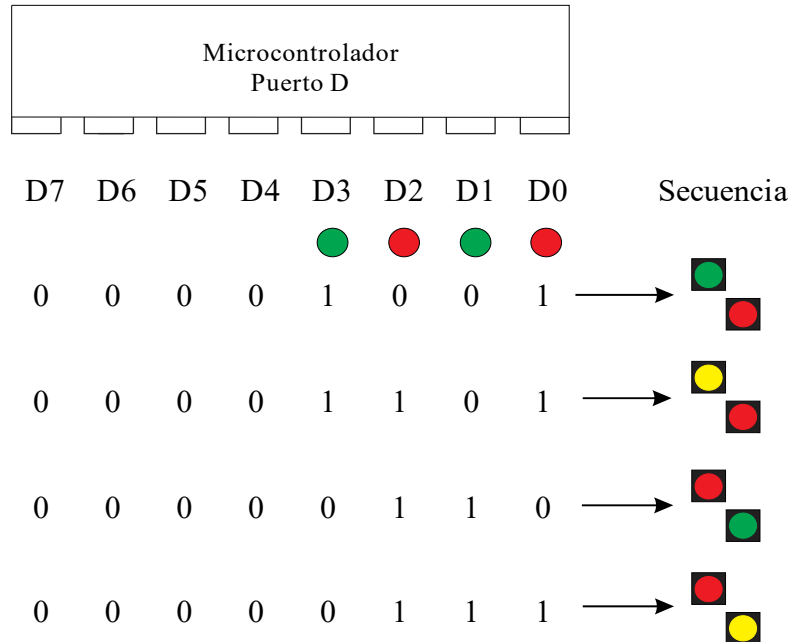


Figura 4.6 Combinación de datos digitales para cada fase del semáforo

El sistema de sincronización, funcionará de la siguiente manera: El microcontrolador maestro, generará un dato digital equivalente al estado del semáforo según corresponda. Este dato será transmitido primero a un microcontrolador (esclavo 1). Después ese mismo dato será enviado al segundo microcontrolador (esclavo 2). Finalmente, el dato será comunicado al tercer microcontrolador (esclavo 3).

La propuesta para este sistema, consiste en que la comunicación que se establece entre el dispositivo maestro y los tres esclavos sea a través de fibra óptica. Para ello es necesario establecer tres enlaces. Sin embargo en la implementación solo uno de estos enlaces utilizó fibra óptica. Esto fue debido a que sólo se contaba con un transmisor/receptor y un cable de fibra óptica. Para los otros 2 enlaces se empleó cable de cobre.

En el siguiente esquema (figura 4.7), se muestra el diagrama de conexión del sistema anteriormente descrito. En el grafico se supone que se utiliza fibra óptica para los tres enlaces.

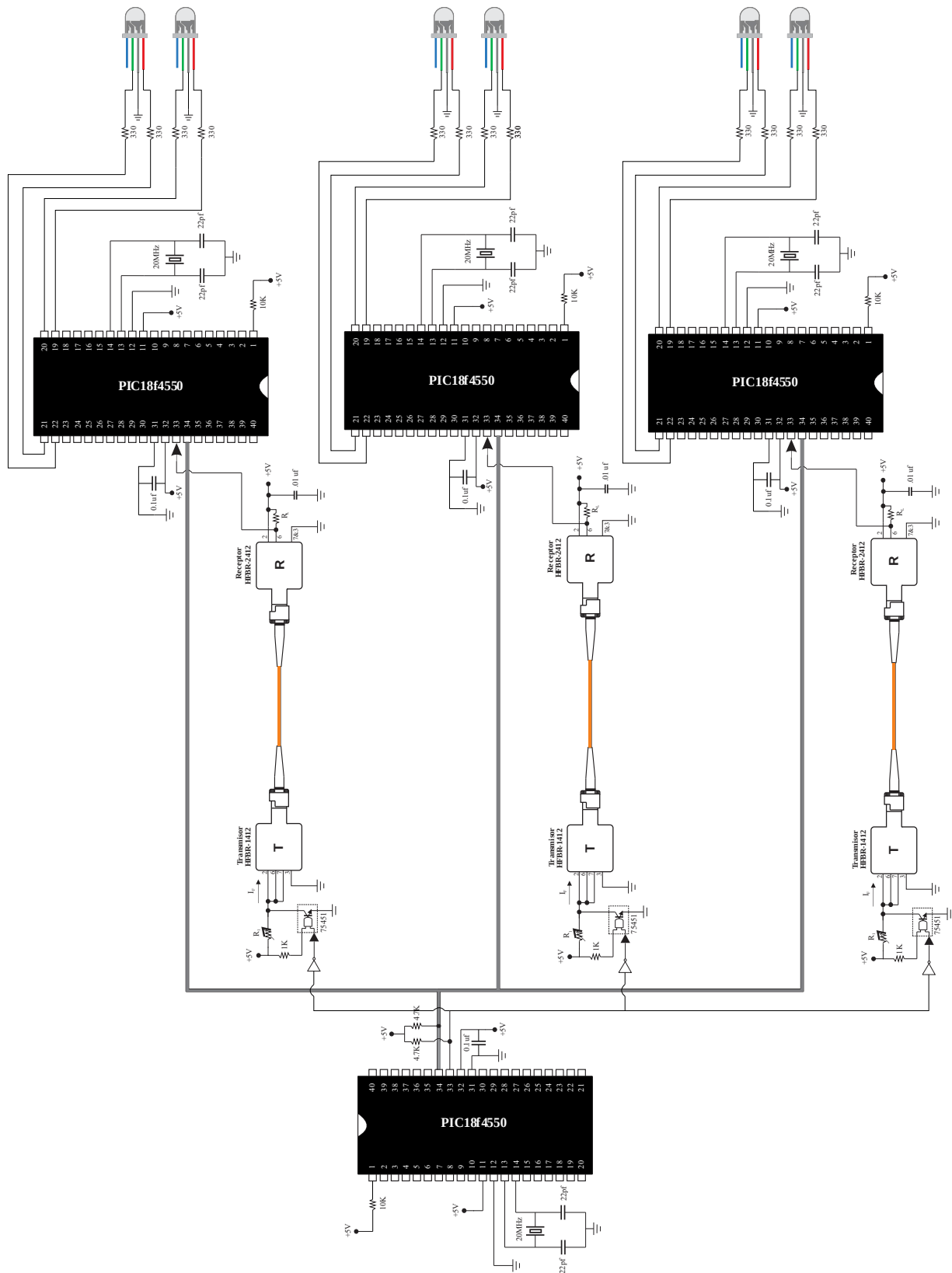


Figura 4.7 Diagrama de conexión de un sistema de sincronización de semáforos

También hay que tomar en cuenta que, de las dos líneas del protocolo I²C, sólo se utilizó fibra óptica para la línea de datos SDA. Para la línea de sincronización de reloj SCL, se usó cable de cobre.

4.5 Resultados de la implementación del sistema de semáforos

En las siguientes imágenes, se muestran los resultados obtenidos de la implementación del enlace de fibra óptica, utilizado para sincronizar un sistema de semáforos.

En la figura 4.8, se observa el microcontrolador maestro con los 3 dispositivos esclavos. Como se observa, en un enlace del microcontrolador maestro con un esclavo, se empleó fibra óptica. Para los otros dos esclavos se usó cable de cobre, por las razones anteriormente descritas.

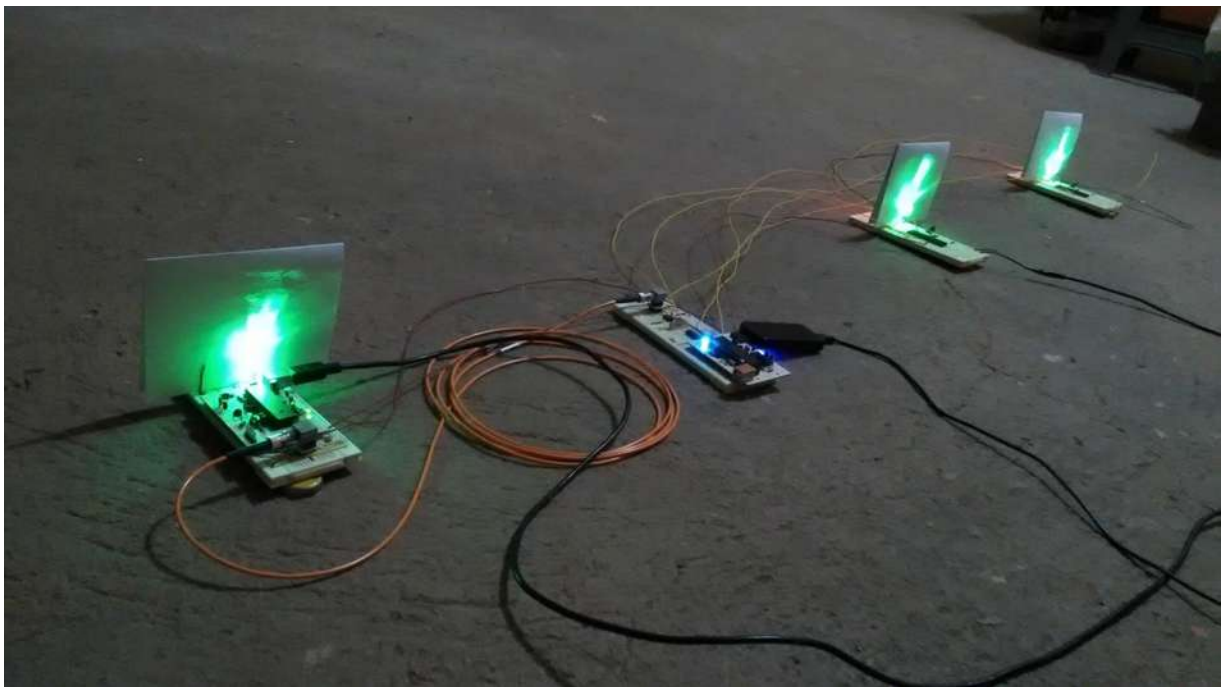


Figura 4.8 Implementación del sistema de semáforos

En la figura 4.9, se muestran las fases de los semáforos para cada cruce. Para el sistema de sincronización simultaneo, todos los semáforos muestran la misma indicación a lo largo de una avenida. A pesar de que hay una pequeña diferencia de tiempo en el momento de enviar los datos a cada cruce, en la implementación se observó que los cambios de estado lo realizan al mismo tiempo.

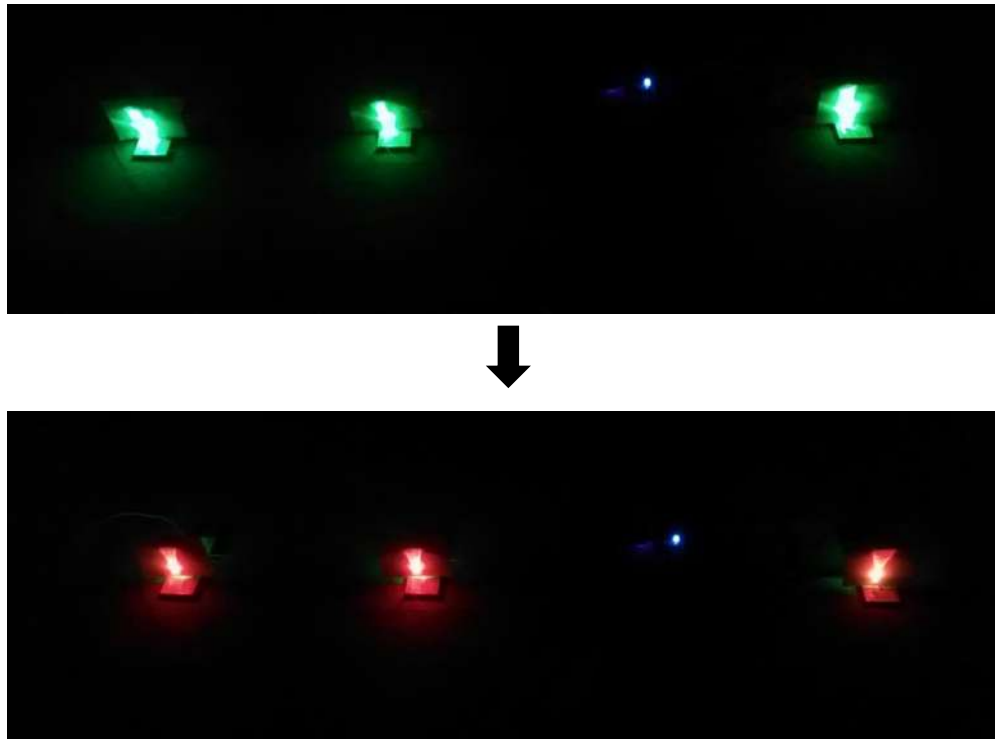


Figura 4.9 Fases de semáforos en cada intersección

Para la figura 4.10, se observa el cambio de fase de un semáforo, señalada por los colores verde, amarillo y rojo.

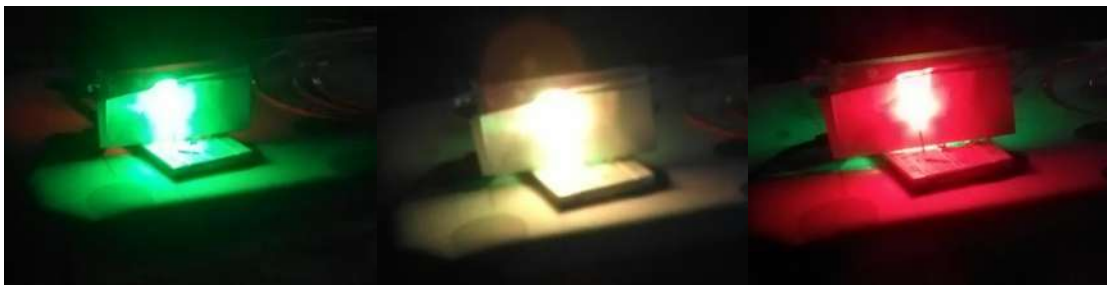


Figura 4.10 Sucesión de luces del semáforo implementado

En la figura 4.11 tenemos una vista lateral del sistema de semáforos, en donde se puedan observar las fases de la avenida principal y las calles perpendiculares. Para cada figura supondremos que del lado izquierdo representa la avenida principal, y para el lado derecho las tres calles perpendiculares.

En la primera figura, se observa que en la avenida principal todos los semáforos están en rojo, mientras que en las calles perpendiculares los semáforos están en verde. Para la segunda figura, se muestra el cambio de estado de rojo a verde de la avenida principal. Igualmente sucede para las calles perpendiculares, mostrando ahora la fase en rojo.

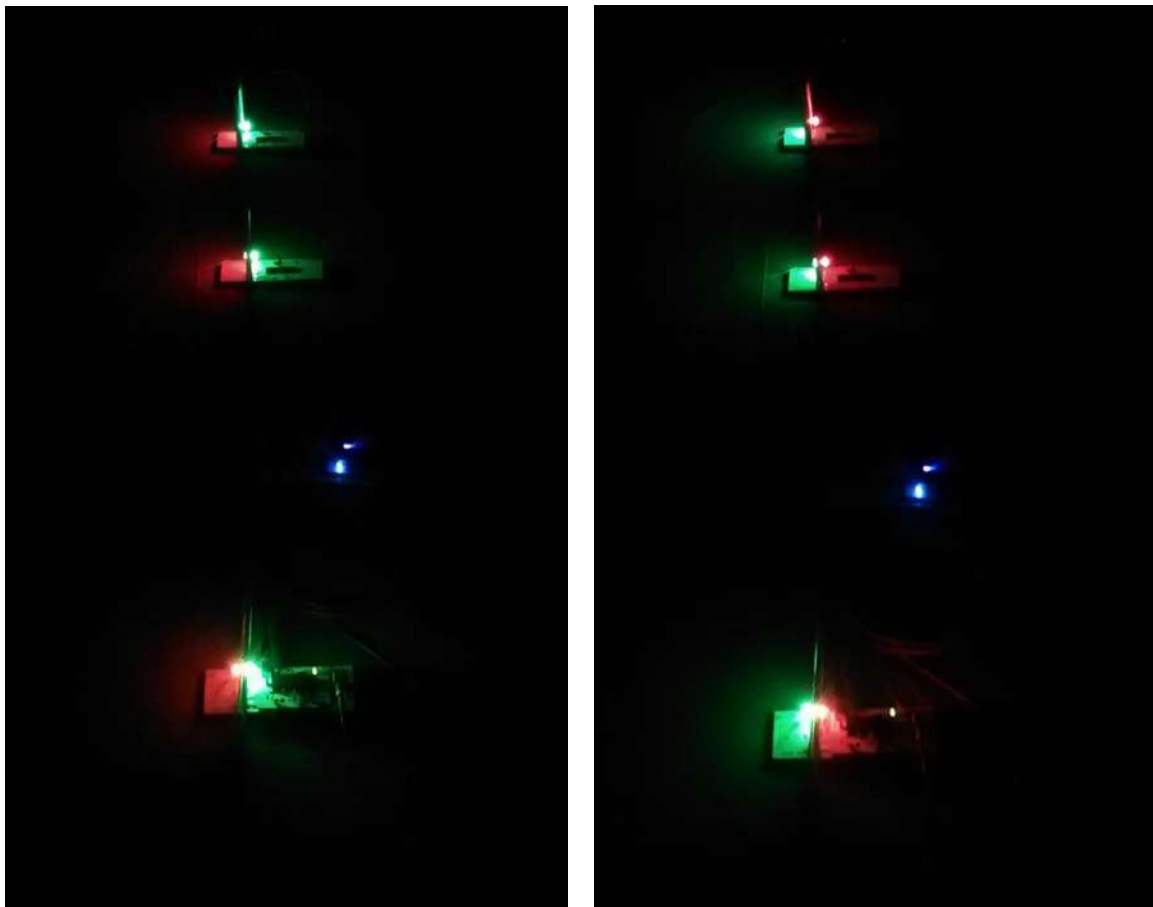


Figura 4.11 Vista lateral del sistema de semáforos

Conclusiones y Recomendaciones

Finalmente, una vez terminado el trabajo desarrollado, a continuación se presentan las conclusiones. De igual manera, se exponen algunas recomendaciones que ayuden a mejorar el enlace implementado.

5.1 Conclusiones

Primeramente el análisis que se realizó acerca de la fibra óptica, demostró la importancia que tiene este medio de transmisión, que ha cambiado en gran parte a las comunicaciones. Sus características hacen que presente muchas ventajas en comparación con otros medios de transmisión. Debido a ello, actualmente el uso que se le da es muy extenso, cada vez es más frecuente encontrarla en diferentes áreas.

Las ventajas de utilizar fibra óptica en los sistemas de comunicación son los siguientes: alta velocidad de transmisión, tienen un diámetro más pequeño, es más ligero, no se ve afectada por interferencia eléctrica o interferencia de radiofrecuencia, no genera por si misma interferencia, menor atenuación de la señal, son inmunes a condiciones adversas de humedad y temperatura, menor gasto de energía, alto grado de seguridad y al conducir solo haces de luz y no electricidad no hay riesgos de incendios.

El objetivo de esta tesis, se logró satisfactoriamente. Se implementó el enlace de fibra óptica utilizando dos microcontroladores pic18f4550. Para realizar la comunicación se utilizó el bus I²C, que se caracteriza por utilizar solo dos señales para establecer la comunicación. Los datos transmitidos se enviaron de forma correcta.

Posteriormente, se procedió a realizar una aplicación utilizando el enlace. Con ello se sincronizó un sistema de semáforos, formado por tres intersecciones. Los cambios de estado entre las intersecciones, a pesar de la baja velocidad del bus utilizado, fueron aceptables.

5.2 Recomendaciones

Algunas recomendaciones que se proponen para mejorar el enlace de fibra óptica, son las siguientes:

- El transmisor/ receptor proporciona un alto rendimiento que permite largas longitudes de enlace. Por lo tanto, sería interesante utilizar un cable de una longitud mayor al utilizado en este trabajo, para comprobar si la comunicación puede llevarse a cabo de manera eficiente.
- Exponer el enlace en ambientes donde exista alta radiación electromagnética, y analizar si existen pérdidas de información.
- Utilizar otro protocolo de comunicación más rápido y robusto al enlace desarrollado.
- Adicionalmente, puede realizarse la comunicación serial del dispositivo maestro con la computadora, en la que mediante un software (por ejemplo LabVIEW) se pueda tener el control de los datos a transmitir, o bien realizar un registro de los datos recibidos por parte de los esclavos.
- Se puede reemplazar el microcontrolador por tarjetas de desarrollo como Arduino, Raspberry Pi ó FPGA.

Bibliografía

- [1]. **Microchip.** Microchip. [Online] [Cited: noviembre 12, 2015.] Hoja de especificaciones del pic18F4550.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>.
- [2]. **Avalos, Gilberto González.** *Notas para estudiantes de la carrera de ingeniería en electrónica, Fibras Ópticas.* Morelia : s.n., 2010. págs. 52-63.
- [3]. **Nérrou, Jean Pierre.** *Introducción a las Telecomunicaciones por Fibras Ópticas.* 1ra ed. México, D.F. : Trillas, 1991. págs. 13-15, 25-26, 28-33, 35-46.
- [4]. Bienvenidos al mundo de la tecnología. [En línea] [Citado el: 13 de marzo de 2015.]
<https://myprofetecnologia.wordpress.com/about/>.
- [5]. **Think Big.** [En línea] [Citado el: 15 de marzo de 2015.] <http://blogthinkbig.com/fibra-optica-origen/>.
- [6]. **Senior, John M.** *Optical Fiber Communications Principles and Practice.* Third Edition. England : Pearson Prentice Hall, 2009. pp. 52-61, 65-74, 234-245.
- [7]. **Rodriguez Lozano, rodrigo.** ciencias.com. [En línea] [Citado el: 20 de Marzo de 2015.] http://cienciaes.com/v1/index.php?pagina_sel=entrevistas.
- [8]. **Wikipedia.** Wikipedia. [En línea] [Citado el: 10 de marzo de 2015.]
https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_%C3%B3ptica.
- [9]. **Calixto, Pamela.** Código espagueti. [En línea] 03 de Febrero de 2015. [Citado el: 20 de Marzo de 2015.] <http://codigoespagueti.com/noticias/tecnica-fibra-optica/>.
- [10]. **Leguisamo, Jose Luis.** Código espagueti. [En línea] 27 de Octubre de 2014. [Citado el: 20 de Marzo de 2015.] <http://codigoespagueti.com/noticias/fibra-optica-255-tb/>.
- [11]. **tu&co.** tu&co. [En línea] 08 de Agosto de 2014. [Citado el: 20 de Abril de 2015.]
<http://www.tuandco.com/aprendeymejora/elegir-iluminacion-de-fibra-optica>.
- [12]. **Yeh, Chai.** *Handbook of Fiber Optics, Theory and Applications.* San Diego, California : Academic Press Inc., 1990. págs. 333-342.

-
-
- [13]. **Microchip.** Microchip. [Online] [Cited: Septiembre 25, 2015.]
<http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family8bit/>.
- [14]. **Microchip.** [Online] Guía para el uso del software MPLAB IDE.
<https://dx.eng.uiowa.edu/eedesign/51519a.pdf>.
- [15]. **Microchip.** [Online] Guía para el uso del programador Pickit3.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51795B.pdf>.
- [16]. **AVAGO TECHNOLOGIES.** [Online] Hoja de datos del transmisor y receptor de la serie HFBR-0400. <http://www.avagotech.com/docs/AV02-0176EN>.
- [17]. **NXP Semiconductors.** *UM10204, I2C-bus specification and user manual.*
- [18]. **Microchip.** Microchip. [Online] Manual de librerías C18.
http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MPLAB_C18_Libraries_51297f.pdf.
- [19]. **Anónimo.** [En línea] [Citado el: 5 de noviembre de 2015.]
https://www.medellin.gov.co/movilidad/documents/seccion_senalizacion/cap7_semaforos.pdf.
- [20]. **Wikipedia.** [En línea] [Citado el: 9 de noviembre de 2015.]
<https://es.wikipedia.org/wiki/Sem%C3%A1foro>.

Apéndices

Registro SSPSTAT

R/W-0	R/W-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0
SMP	CKE	D/A	P	S	R/W	UA	BF
bit 7							bit 0

- Bit 7 SMP: control de Slew rate
Modo Maestro o Esclavo:
- 0 Velocidad estándar (100 kHz y 1 MHz)
 - 1 Alta velocidad (400 kHz)
- Bit 6 CKE: Selección SMBus
Modo Maestro o Esclavo:
- 0 Especificaciones I2C (Deshabilita entradas SMBus)
 - 1 Habilita entradas SMBus
- Bit 5 D/A: información del ultimo byte transmitido
Modo Esclavo:
- 0 Indica que el último byte recibido o transmitido fue dirección.
 - 1 Indica que el último byte recibido o transmitido fue dato.
- Bit 4 P: Bit de paro
- 0 No detecto ningún bit de paro
 - 1 Detecta que existe un bit de paro
- Bit 3 S: Bit de inicio
- 0 No detecta ningún bit de inicio
 - 1 Detecta que existe un bit de inicio
- Bit 2 R/W: Bit de información lectura/escritura
Modo esclavo
- 0 Escribe información
 - 1 Lee información
- Bit 1 UA: Bit de actualización de dirección (solo para 10 bits)
- 0 La dirección no se necesita actualizar
 - 1 Indica que el usuario necesita actualizar la dirección en el registro SSPAD
- Bit 0 BF: Bit de estado de buffer
Modo transmisor
- 0 La recepción no se completó SSPBUF está vacío
 - 1 La recepción se completó SSPBUF está lleno
- Modo receptor
- 0 El dato se transmitió completo
 - 1 La transmisión está en proceso

Registro SSPCON1

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
WCOL	SSPOV	SSPEN	CKP	SSPM3	SSPM2	SSPM1	SSPM0
bit 7							bit 0

Bit 7 WCOL: Bit de detección de colisión en modo transmisor

- 0 No hay colisión
- 1 Existe una colisión de datos (se limpia por software)

Bit 6 SSPOV: Bit indicador de overflow en modo receptor

- 0 No hay overflow
- 1 Hay overflow (debe ser limpiado por software)

Bit 5 SSPEN: Habilitación del puerto serial síncrono

- 0 No habilita
- 1 Habilita el puerto serial

Bit 4 CKP: Bit de control del SCL en modo esclavo

- 0 Mantiene el reloj en bajo
- 1 Reloj habilitado

Bit 3-0 SSPM1:SSPM0 Selecciona el modo de operación del puerto serial

- 1111 I²C esclavo, dirección de 10 bits, bits de start y stop habilitados por interrupción
- 1110 I²C esclavo, dirección de 7 bits, bits de start y stop habilitados por interrupción
- 1011 I²C maestro controlado por firmware (esclavo inactivo)
- 1000 I²C maestro con reloj de frecuencia= $F_{osc}/(4*(SSPAD+1))$
- 0111 I²C esclavo dirección de 10 bits
- 0110 I²C esclavo dirección de 7 bits

Registro SSPCON2

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
GCEN	ACKSTAT	ACKDT	ACKEN	RCEN	PEN	RSEN	SEN
bit 7							bit 0

- Bit 7 GCEN: Habilita llamada general modo esclavo solamente
- 0 Deshabilito
 - 1 Habilita interrupciones cuando una llamada de dirección general ocurre
- Bit 6 ACKSTAT: Bit de estado del acknowledge (solamente maestro)
- 0 Recibido ACK del esclavo
 - 1 No se ha recibido ACK del esclavo (NACK)
- Bit 5 ACKDT: bit de dato del acknowledge (solamente receptor de maestro)
- 0 ACK
 - 1 No ACK (NACK)
- Bit 4 ACKEN: Genera pulsos de reconocimiento de secuencia ACK (Solamente receptor maestro)
- 0 Desactivada
 - 1 Inicia secuencia de reconocimiento del ACK en SDA y SCL
- Bit 3 RCEN: Bit de habilitación de recepción (solamente maestro)
- 0 Deshabilitada
 - 1 Activa modo recepción para I²C
- Bit 2 PEN: Genera bit de habilitación de una secuencia de paro (solamente maestro)
- 0 Deshabilitada
 - 1 Inicia situación de STOP en SDA y SCL
- Bit 1 RSEN: Bit de habilitación repetición de inicio (solamente maestro)
- 0 Deshabilitada
 - 1 Inicia repetidas situaciones de start
- Bit 0 SEN: Bit de habilitación de una secuencia de inicio
- Modo maestro
- 0 Deshabilitada
 - 1 Inicia situación de start en SDA y SCL
- Modo esclavo
- 0 Deshabilitada
 - 1 Inicia señal de reloj para transmisión y receptor

Código para el dispositivo maestro

```
#include <p18f4550.h>
#include <delays.h>
#include <sw_i2c.h>

extern void _startup(void);

#pragma code _RESET_INTERRUPT_VECTOR = 0x000800
void _reset(void)
{
    _asm goto
        _startup
    _endasm
}
#pragma code

void I2C_inicio_master(void);
void I2C_transmite_master(unsigned char direccion, unsigned char dato);
void retardo(unsigned char tiempo);

unsigned char dato=0;
unsigned char num=0;
unsigned char var=0;
unsigned char tiempo=0;

void main()
{
    PORTD=0;
    TRISD=0;

    I2C_inicio_master();

    while(1)
    {
        retardo(40);
        dato=0x42;
        I2C_transmite_master(0x0A,dato);
    }
}

void I2C_inicio_master(void)
{
    PORTB==0;
    ADCON1=0x0F;
    TRISB=0b00000000;
    SSPSTATbits.SMP=1;
    SSPCON1=0b00101000;
    SSPADD=50;
}
```

```
void I2C_transmite_master(unsigned char direccion, unsigned char dato)
{
    SWStartI2C();
    SWPutcI2C(direccion);
    SWAckI2C();
    SWPutcI2C(dato);
    SWAckI2C();
    SWStopI2C();
}

void retardo(unsigned char tiempo)
{
    while(var<=tiempo)
    {
        Delay10KTCYx(200);
        var++;
    }
    var=0;
}
```

Código para el dispositivo esclavo

```
#include <p18f4550.h>
#include <delays.h>

void I2C_ini_slave(unsigned char direccion);

void main()
{
    PORTA=0;
    ADCON1=0x0F;
    CMCON=0x07;
    TRISA=0;

    PORTD=0;
    TRISD=0;

    I2C_ini_slave(0x0A);

    while(1)
    {
        if(SSPSTATbits.S)
        {
            while(!SSPSTATbits.BF);
            if(!SSPSTATbits.R_W & !SSPSTATbits.D_A)
            {
                while(!SSPSTATbits.BF);
                PORTD=SSPBUF;
            }
        }
    }
}

void I2C_ini_slave(unsigned char direccion)
{
    PORTB=0;
    ADCON1=0x0F;
    TRISB=0b0000011;
    SSPADD=direccion;
    SSPSTATbits.SMP=1;
    SSPCON1=0b00100110;
}
```

Sincronización de un sistema de semáforos por I²C

```
#include <p18f4550.h>
#include <delays.h>
#include <sw_i2c.h>

extern void _startup(void);

#pragma code _RESET_INTERRUPT_VECTOR = 0x000800
void _reset(void)
{
    _asm goto
        _startup
    _endasm
}
#pragma code

void I2C_inicio_master(void);
void I2C_transmite_master(unsigned char direccion, unsigned char dato);
void retardo(unsigned char tiempo);
void verde(void);
void intermitente(void);
void cambio2(void);

unsigned char dato=0;
unsigned char var=0;
unsigned char tiempo=0;

void main()
{
    PORTD=0;
    TRISD=0;

    I2C_inicio_master();

    //La dirección del esclavo 1 es: 0x10;
    //La dirección del esclavo 2 es: 0xA0;
    //La dirección del esclavo 3 es: 0x0A;

    while(1)
    {
        retardo(40);
        dato=0x11;
        I2C_transmite_master(0x10,dato);
        I2C_transmite_master(0xA0,dato);
        I2C_transmite_master(0x0A,dato);

        retardo(9);
        dato=0x19;
        I2C_transmite_master(0x10,dato);
        I2C_transmite_master(0xA0,dato);
        I2C_transmite_master(0x0A,dato);
```

```
        retardo(40);
        dato=0x0A;
        I2C_transmite_master(0x10,dato);
        I2C_transmite_master(0xA0,dato);

        I2C_transmite_master(0x0A,dato);

        retardo(9);
        dato=0x0B;
        I2C_transmite_master(0x10,dato);
        I2C_transmite_master(0xA0,dato);
        I2C_transmite_master(0x0A ,dato);
    }
}

void I2C_inicio_master(void)
{
    PORTB==0;
    ADCON1=0x0F;
    TRISB=0b00000000;
    SSPSTATbits.SMP=1;
    SSPCON1=0b00101000;
    SSPADD=50;
}

void I2C_transmite_master(unsigned char direccion, unsigned char dato)
{
    SWStartI2C();
    SWPutcI2C(direccion);
    SWAckI2C();
    SWPutcI2C(dato);
    SWAckI2C();
    SWStopI2C();
}

void retardo(unsigned char tiempo)
{
    while(var<=tiempo)
    {
        Delay10KTCYx(200);
        var++;
    }
    var=0;
}
```