

**EVALUAR UN ACOUPLE COLIMADOR FIBRA OPTICA PARA VALORAR SU
COMPORTAMIENTO COMO MEDIDOR DE INTENSIDAD LUMINOSA**

**LUIS FELIPE VILLA VALLEJO
JUAN CARLOS CIFUENTES DELGADO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2008**

**EVALUAR UN ACOUPLE COLIMADOR FIBRA OPTICA PARA VALORAR SU
COMPORTAMIENTO COMO MEDIDOR DE INTENSIDAD LUMINOSA**

**LUIS FELIPE VILLA VALLEJO
JUAN CARLOS CIFUENTES DELGADO**

**Director
Ing. JAIME RUIZ PAZOS**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2008**

“Las ideas y conclusiones aportadas en el proyecto de grado son responsabilidad exclusiva de sus autores”.

Artículo 1. Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de Aceptación:

Firma del Jurado

Firma del Jurado

San Juan de Pasto, Diciembre de 2008

AGRADECIMIENTOS

Sinceros agradecimientos a:

Ing. Jaime Ruiz, por sus valiosas recomendaciones e interés en llevar a buen termino este proyecto.

M. Sc. Omar Paredes Chamorro, por su colaboración durante el planeamiento y desarrollo de la primera fase del proyecto.

Ing. Rolando Barahona, por su ayuda y sugerencias en la consecución y selección de los dispositivos electrónicos más apropiados para la investigación.

Ing. Guido Zambrano, por su incondicional ayuda para la implementación de una práctica que monitorea el comportamiento de un sistema químico.

A todos los profesores del programa de Ingeniería electrónica por los conocimientos brindados a lo largo de la carrera.

Y a todos los compañeros y amigos que de una u otra forma participaron en la realización de este trabajo final de grado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO CONCEPTUAL	21
1.1 NATURALEZA DE LA LUZ	21
1.1.1 Propagación de la luz	21
1.1.2 Reflexión y refracción en ondas planas	23
1.1.3 El espectro electromagnético	24
1.2 FIBRA ÓPTICA	25
1.2.1 Principio de funcionamiento de un conductor de fibra óptica	25
1.2.2 Tipos de fibra óptica	27
1.2.3 Ventajas y desventajas de la fibra óptica	28
1.2.4 Atenuación en fibra óptica	28
1.2.5 Fibra óptica plástica	29
1.3 LENTES COLIMADORAS FOCALIZADORAS	30
1.4 FUENTES ÓPTICAS	33
1.4.1 Interacción electrón fotón en uniones semiconductoras	33
1.4.2 Comparación de las fuentes ópticas	33
1.5 FOTODETECTORES	35
1.5.1 Tipos de fotodetectores en fibra óptica	35
1.6 FOTORRESISTENCIAS	38

1.7 MICROCONTROLADORES DE GAMA ALTA	39
1.8 BUS SERIAL UNIVERSAL USB	40
1.8.1 Velocidad, conectores y consumo de potencia	42
1.8.2 Principales características de operación del bus USB	43
1.8.3 Dispositivos USB típicos	45
1.9 MODELO DE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICO ARX	45
1.9.1 Concepto y modelo de un sistema	45
1.9.2 La identificación del sistema	46
1.9.3 Estructura paramétrica ARX	47
1.9.4 La validación del modelo	49
2. DISEÑO FÍSICO Y HARDWARE	50
2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVOS	50
2.1.1 El transmisor óptico	52
2.1.2 El receptor óptico	53
2.1.3 El sensor LDR	54
2.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	54
2.2.1 El microcontrolador PIC18F4550	54
2.2.2. El circuito disparador de la fuente óptica	65
2.2.3 Circuito del sensor LDR	67
2.2.4 Circuito del receptor óptico	68
3. SOFTWARE Y RESULTADOS	70
3.1 DESARROLLO DE APLICACIONES PARA MICROCONTROLADORES	70

3.1.1 Aplicación para el PIC18F4550	71
3.1.2 Aplicación para el PIC16F84A	74
3.2 FASE 1. DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO	75
3.2.1 Aplicación en Matlab para la fase 1	76
3.2.2 Resultados fase 1	77
3.3 FASE 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS SENSORIALES	79
3.3.1 Funcionamiento de la tarjeta electrónica externa durante la fase 2	79
3.3.2 Aplicaciones en Matlab para la fase 2	81
3.3.3 Resultados fase 2	86
3.4 FASE 3. PRÁCTICAS CON EL TRANSMISOR Y RECEPTOR ÓPTICO	93
3.4.1 Aplicación en Matlab para la fase 3	93
3.4.2 Práctica 1. Detección de la variación luminosa ambiental	94
3.4.3 Práctica 2. Contador de revoluciones	97
3.4.4 Práctica 3. Obtención de una curva de decaimiento del azul de metileno en reacción química, fundamentada en el principio de espectroscopia de absorción	98
4. CONCLUSIONES	102
5. RECOMENDACIONES	103
BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXOS	105

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Principales características de una fibra monomodo, una multimodo de índice gradual y una plástica	28
Tabla 1.2 Valores de atenuación para los tipos de fibra multimodo de índice abrupto, multimodo de índice gradual y monomodo	29
Tabla 1.3 Resumen de los principales módulos del PIC18F4550	40
Tabla 2.1 Características de la fibra óptica plástica a utilizarse en el proyecto	51
Tabla 2.2 Principales especificaciones de la fuente óptica	53
Tabla 2.3 Principales especificaciones del fotodetector a temperatura de 25 ^o C	54
Tabla 2.4 T _{AD} y frecuencias de operación del conversor A/D	62
Tabla 3.1 Resultados del contador de revoluciones	97

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Campo eléctrico y magnético de una onda plana transversal	21
Figura 1.2 Principales elementos del campo eléctrico	22
Figura 1.3 Fenómeno de reflexión y refracción de ondas planas	23
Figura 1.4 Espectro electromagnético	25
Figura 1.5 Principio de reflexión total interna en un conductor de fibra óptica	26
Figura 1.6 Trayectoria de un rayo en una lente delgada	30
Figura 1.7 Fenómenos de focalización y colimación en una lente delgada	32
Figura 1.8 Diferencias entre una lente convencional y una lente Grin	33
Figura 1.9 Diagrama de los procesos de emisión espontánea y estimulada en fuentes ópticas	34
Figura 1.10 Ancho espectral de radiación de un LED y un LD	34
Figura 1.11 Comportamiento de la potencia óptica de salida contra corriente de excitación en LEDs y LDs	35
Figura 1.12 Generación de corriente a partir de una intensidad luminosa incidente en fotodiodos	36
Figura 1.13 Fotodetectores de polarización inversa	37
Figura 1.14 Estructura y curva característica de un sensor LDR	38
Figura 1.15 Estructura física del bus USB	41
Figura 1.16 Detección de un dispositivo USB	43
Figura 1.17 Principales señales en un sistema dinámico	46

Figura 1.18 Diagrama general de bloques de la familia de estructuras paramétricas	48
Figura 1.19 Diagrama de bloques del modelo paramétrico ARX	48
Figura 2.1 Espectro de atenuación de una fibra óptica plástica comercial	50
Figura 2.2 Diagrama general de las principales partes del proyecto	51
Figura 2.3 El transmisor óptico	52
Figura 2.4 El receptor óptico	53
Figura 2.5 Diagrama del módulo oscilador del PIC18F4550	56
Figura 2.6 Opciones de conexión del periférico USB del PIC18F4550	59
Figura 2.7 Modelo de entrada analógica del PIC18F4550	62
Figura 2.8 Conexión del PIC18F4550	65
Figura 2.9 Diagrama general de la tarjeta electrónica externa	66
Figura 2.10 LM324 como amplificador con fuente de alimentación de 5 voltios	68
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la aplicación desarrollada para el PIC18F4550	74
Figura 3.2 Diagrama de flujo de la aplicación para el PIC16F84A	75
Figura 3.3 Diagrama de flujo del algoritmo del PIC18F4550 para la fase 1	76
Figura 3.4 Diagrama de flujo de la aplicación en Matlab para la fase 1	78
Figura 3.5 Sistemas sensoriales con sus respectivas señales de entrada y salida	80
Figura 3.6 Diagrama de tiempo del funcionamiento de los durante la fase de caracterización	80
Figura 3.7 Diagrama de flujo del algoritmo del PIC18F4550 para la fase 2	81
Figura 3.8 Diagrama de flujo de la captura de datos en el proceso de caracterización	83

Figura 3.9 Función de transferencia total de los sistemas sensoriales	84
Figura 3.10 Diagrama de flujo que estima la función de transferencia en el proceso de caracterización	85
Figura 3.11 Archivo de validación construido en Simulink para los sistemas sensoriales	86
Figura 3.12 Señales con ruido y filtradas del sistema LDR	87
Figura 3.13 Respuesta medida, respuesta estimada y porcentaje de aproximación obtenidos con la estructura ARX para el sistema LDR	89
Figura 3.14 Funciones de transferencia en tiempo discreto del sistema LDR	89
Figura 3.15 Señales con ruido y filtradas del sistema receptor óptico	90
Figura 3.16 Respuesta medida, respuesta estimada y porcentaje de aproximación obtenidos con la estructura ARX para el sistema receptor óptico	91
Figura 3.17 Funciones de transferencia en tiempo discreto del sistema receptor óptico	91
Figura 3.18 Diagrama de flujo del algoritmo del PIC18F4550 durante la fase 3	94
Figura 3.19 Diagrama de flujo de la aplicación en Matlab para la fase 3	95
Figura 3.20 Posición de trabajo del receptor óptico en la práctica 1	96
Figura 3.21 Curva de detección de la luminosidad ambiental con el receptor óptico	96
Figura 3.22 Montaje del contador de revoluciones	97
Figura 3.23 Señal obtenida del contador de revoluciones cuando el voltaje suministrado al motor es 5 voltios	98
Figura 3.24 Sistema de análisis espectroscópico	99
Figura 3.25 Montaje de obtención de la curva del decaimiento del azul de metileno	100

Figura 3.26 Curva del decaimiento del azul de metileno en reacción química

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Driver de instalación proporcionado por Microchip para microcontroladores PIC18FXX5X y sistema operativo Windows XP	106
ANEXO B. Proceso de instalación de la tarjeta de adquisición de datos	108

GLOSARIO

ATENUACIÓN: Se denomina atenuación de una señal, a la pérdida de potencia sufrida por la misma, al transitar por un medio de transmisión.

COLIMACIÓN: Fenómeno donde todo cono de luz emitido desde el punto focal de una lente, produce un haz luminoso cuyos rayos son paralelos.

COMUNICACIÓN SERIAL: Es un protocolo de transmisión de datos entre dispositivos, donde la información contenida en bytes se envía y recibe bit a bit. Típicamente, la comunicación serial se utiliza para transmitir datos en formato ASCII.

DRIVER: O controlador de dispositivo. Es un software informático que permite al sistema operativo interactuar con un periférico, haciendo una abstracción de su hardware y proporcionando una interfaz para su uso.

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO: Descripción de la distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas existentes en la naturaleza.

ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN: Fenómeno atribuible a moléculas o sustancias químicas que tienen la propiedad de absorber energía radiante de una determinada longitud de onda.

FIBRA ÓPTICA: Es un filamento delgado, generalmente de vidrio, aunque también puede ser de materiales plásticos. Un conductor de fibra óptica es capaz de dirigir la luz a lo largo de su longitud con base en el principio de reflexión total interna.

FOCALIZACIÓN: Fenómeno en el que los rayos de luz que inciden paralelos al eje óptico de una lente convergen en el punto focal.

FOTODETECTOR: Es un dispositivo que transforma una radiación luminosa incidente en señal eléctrica, generalmente una corriente. El conjunto de elementos que forman la unión del fotodetector y la electrónica asociada a él, se denominan receptor óptico.

FOTORRESISTENCIA: Dispositivo cuya resistencia óhmica varía dependiendo de la iluminación recibida sobre su superficie.

HOST: O anfitrión. Es un ordenador que funciona como el punto de inicio y final de las transferencias de datos.

HUB: Dispositivo que permite ampliar los puntos de conexión a una red.

ÍNDICE DE REFRACCIÓN: Se denomina índice de refracción al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en un determinado medio. Se simboliza con la letra n y se trata de un valor adimensional.

LÁSER: Es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente con niveles importantes de ganancia óptica.

LENTE: Es un sistema óptico limitado por dos superficies refringentes, generalmente de vidrio, acrílico o plástico. Comúnmente a ambos lados de la lente el medio es el mismo, y la ley de refracción es la base del principio de funcionamiento de estos dispositivos.

LUZ: Onda electromagnética del tipo transversal plana, en la que el campo eléctrico y el campo magnético oscilan en fase y perpendicularmente en la dirección de propagación.

MICROCONTROLADOR: Circuito integrado programable que cuenta con muchas de las características que posee un computador, y que se utiliza para gobernar una aplicación determinada. Sus bloques principales son: CPU, memoria de datos y de programa, módulos de entrada y salida, oscilador de reloj y módulos controladores de periféricos.

MODELOS PARAMÉTRICOS: Técnicas experimentales que permiten caracterizar un sistema matemáticamente, a partir de datos obtenidos en condiciones reales de funcionamiento.

REFLEXIÓN: Fenómeno que ocurre cuando un rayo o una onda incidente, rebota en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio de incidencia con un cambio de dirección.

REFRACCIÓN: Es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen índices de refracción distintos.

USB: O bus serie universal. Es un estándar que puede soportar hasta 127 dispositivos conectados simultáneamente a un ordenador, a través de un puerto serie que posee una jerarquía ramificada de funcionamiento.

RESUMEN

Para valorar si un dispositivo lente fibra óptica puede servir como instrumento que detecta cambios de intensidad luminosa, se implementa una interfaz electrónica a través de computador y tarjeta de adquisición. La tarjeta utiliza un microcontrolador de gama alta que se encarga primordialmente de la transferencia serial de datos y del proceso de conversión análogo digital.

Los datos obtenidos sirven para caracterizar por una parte el módulo lente fibra óptica, y por otra, un sensor fotorresistivo que sirve como referente de comparación. La caracterización consiste esencialmente en estimar una función de transferencia para los dos módulos sensoriales mediante la estructura paramétrica ARX de identificación de sistemas, aquí también se describen las principales diferencias entre los dos sensores, y se validan los modelos estimados mediante técnicas de simulación y el análisis de sus características matemáticas en tiempo discreto. Finalmente se implementan algunas prácticas con el dispositivo lente fibra óptica.

A nivel computacional se utiliza MATLAB versión 7.0 como software de alta integración numérica que se encarga de la captura, procesamiento, caracterización y visualización de los datos suministrados por la tarjeta electrónica externa. Las aplicaciones ejecutadas por el microcontrolador se desarrollan bajo el entorno de MPLAB IDE versión 7.6 con el compilador CCS C COMPILER versión 4.049 que posee una estructura de programación basada en lenguaje C.

ABSTRACT

To value if a device lens optic fiber can serve like instrument that detects changes of luminous intensity, an electronic interface implemented through computer and card of acquisition. The card uses a microcontroller of high range that charge primarily of the serial transfer of data and of the analog digital process conversion.

The obtained data are good to characterize, on one hand the module lens optic fiber and for other a sensor photoresistive that serves as relating of comparison. The characterization consists essentially on estimating a transfer function for the two systems through the parametric structure of identification of systems ARX, here also the main differences are analyzed among the two sensors and the models obtained are validated by means of simulation techniques. Subsequently some practices are implemented by means of the device lens optic fiber.

At level of computation MATLAB version 7.0 is used as software of high numeric execution that takes charge of the capture, processing, characterization and visualization of the data given by the electronic external card. The applications executed by the microcontroller are developed inside the environment of MPLAB IDE version 7.6 with the compiler CCS C COMPILER version 4.049 that it possesses a programming structure based on language C.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico actual basado en fibra óptica ha logrado crear diversas posibilidades de tipo investigativo, no únicamente en el campo de las comunicaciones, sino también en áreas de extensa divulgación de las cuales se destacan primordialmente la óptica y la medición de variables.

El proyecto de grado: “*Evaluar un acople colimador fibra óptica para valorar su comportamiento como medidor de intensidad luminosa*”, es una primera aproximación en la investigación de medición de variables mediante ésta tecnología, especialmente en lo que respecta al Programa de Ingeniería Electrónica de La Universidad de Nariño. Su principal fin es describir los factores de mayor relevancia, que hacen que dicho acople pueda detectar cambios de intensidad luminosa cuando se conecta con un dispositivo fotodetector.

Es bueno destacar que el sistema propuesto pretende hacer uso de las características que exhibe la fibra óptica, de las cuales las más significativas en este proyecto son: inmunidad a interferencias electromagnéticas, velocidad de respuesta y atenuación. Otro detalle substancial, es que al ser la fibra un medio netamente óptico, es un componente que se aísla de los elementos con conexión eléctrica, ésta característica es importante, ya que existen ambientes donde las conexiones de tipo eléctrico no son adecuadas.

El método de detección de intensidad luminosa a través de lentes y fibra óptica, eventualmente podrá aplicarse en proyectos de tipo investigativo o de ingeniería donde se suelen necesitar características de funcionamiento como las antes mencionadas. Tal configuración se convierte entonces en una alternativa más para medir intensidad luminosa en una región donde la escogencia de dispositivos para este fin es limitada.

El proyecto en si, obtiene una caracterización del módulo lente fibra óptica, utilizando para ello los denominados *Métodos de Identificación de Sistemas*. Se obtiene también la caracterización de un sensor fotorresistivo que sirve como parámetro de comparación. Un enlace: *computador, tarjeta electrónica externa*, adquiere datos de los dos sistemas sensoriales que posteriormente son tratados y analizados utilizando *Matlab* como herramienta computacional.

La parte final del proyecto consiste en utilizar el módulo lente fibra óptica, en tres situaciones prácticas, que permitirán establecer algunos parámetros de funcionamiento del dispositivo como detector de variaciones de intensidad luminosa.

Este documento es una síntesis del trabajo desarrollado a lo largo del proyecto. En una primera parte se exponen los referentes conceptuales relacionados con el mismo. Seguidamente se describen el diseño y construcción de los dispositivos sensoriales y la arquitectura hardware de la tarjeta de adquisición. En un capítulo final se refieren el software y algoritmos implementados, a la vez que se detallan gráfica y analíticamente los resultados obtenidos.

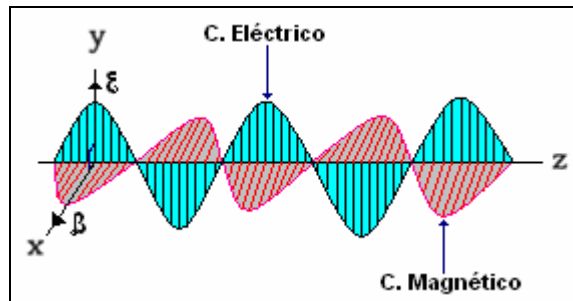
1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 NATURALEZA DE LA LUZ

Las ondas electromagnéticas al igual que las mecánicas efectúan un proceso de transferencia de energía, que en las primeras no necesariamente requiere de un “medio conductor” para propagarse, sino que pueden también hacerlo en el vacío o en un medio dieléctrico a gran velocidad.

1.1.1 Propagación de la luz¹. La onda electromagnética que representa el comportamiento de la luz es una onda plana de tipo transversal. En una onda transversal el campo eléctrico y el campo magnético oscilan perpendicularmente en la dirección de propagación. Como se observa en la figura 1.1, ambos campos oscilan en fase, y es por eso que basta ilustrar tan solo uno de ellos para describir dicha onda.

Figura 1.1 Campo eléctrico y magnético de una onda plana transversal



Fuente. ALONSO, Marcelo. FINN, Edward. Física. Volumen II: Campos y Ondas. Addison – Wesley Iberoamericana.

La expresión para la onda del campo eléctrico propagándose en el vacío es:

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda}\right)\right) \quad (1.1)$$

Donde:

- E_0 amplitud máxima del campo eléctrico.
- ω velocidad angular en radianes/segundo (rad/s).
- t tiempo en segundos (s).
- k vector de onda ($k = 2\pi / \lambda$).

¹ALONSO, Marcelo. FINN, Edward. Física. Volumen II: Campos y Ondas. Addison – Wesley Iberoamericana. Pág. 744 - 748.

- λ longitud de onda en el medio en metros (m).
- z distancia sobre el eje z en metros (m).
- T período de la onda.

En la ecuación 1.1 se puede verificar, que:

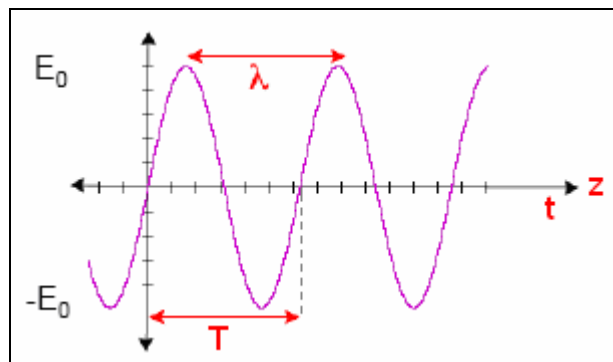
$$\omega = 2\pi f \quad (1.2)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.3)$$

Donde: f frecuencia de onda en Hertzios (Hz).

El valor entre paréntesis ($\omega t - kz$) se denomina *función de fase de onda* y describe la variación de la onda en el tiempo y el espacio, su medida es en radianes. Gráficamente una onda electromagnética luminosa se ilustra como en las figuras 1.1 y 1.2.

Figura 1.2 Principales elementos del campo eléctrico



La velocidad de propagación de las ondas luminosas depende del medio. La longitud de onda de una radiación, se relaciona con la frecuencia de oscilación de los campos en un determinado medio por la expresión:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1.4)$$

Donde: c velocidad de propagación de la luz en el vacío (Aprox. 3×10^8 m/s)

El cociente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío y la velocidad en un medio cualquiera define el índice de refracción del medio (n_m):

$$n_m = \frac{c}{v_m} \quad (1.5)$$

El índice de refracción es siempre mayor que 1 ya que c es la mayor velocidad que puede existir.

1.1.2 Reflexión y refracción en ondas planas². Cuando un haz de luz incide sobre una superficie de separación de dos medios, una parte de la onda es reflejada hacia el medio de incidencia y otra parte atraviesa la superficie refractándose en el otro medio. La figura 1.3, indica la disposición de los rayos mencionados, los que a su vez cumplen con los siguientes principios:

a) Las direcciones de incidencia, reflexión y refracción están en un mismo plano, que es normal a la superficie de separación y por tanto contiene la normal N a la superficie.

b) El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión:

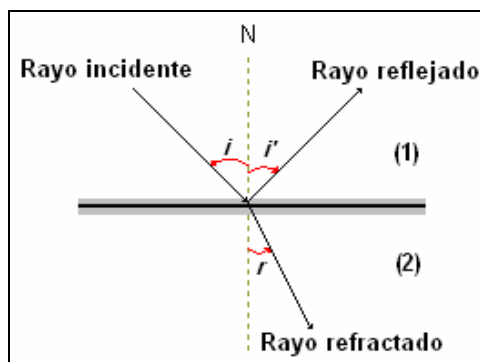
$$i = i' \quad (1.6)$$

c) El cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es constante. Esta relación se conoce comúnmente como: *Ley de Snell*:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n_{21} \quad (1.7)$$

La constante n_{21} se llama índice de refracción del medio (2) respecto al medio (1). Su valor numérico depende de la naturaleza de la onda y de las propiedades de los medios.

Figura 1.3 Fenómeno de reflexión y refracción de ondas planas



Fuente. ALONSO, Marcelo. FINN, Edward. Física. Volumen II: Campos y Ondas. Addison – Wesley Iberoamericana.

²Ibid. Pág. 806 - 807.

La teoría ondulatoria de la luz permite dar al índice de refracción un significado físico, pudiéndose demostrar que:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} \quad (1.8)$$

Así, el índice de refracción es igual a la velocidad de la luz en el primer medio dividido por la velocidad de la luz en el segundo medio.

Manipulando algebraicamente las ecuaciones (1.5) y (1.8), se puede escribir:

$$n_1 \text{sen } i = n_2 \text{sen } r \quad (1.9)$$

Que es la *Ley de Snell en forma simétrica* y es una expresión que generaliza lo que ocurre con la luz cuando pasa de un medio de índice n_1 con ángulo de incidencia i , a otro medio de índice n_2 con ángulo de refracción r .

También se puede deducir, que:

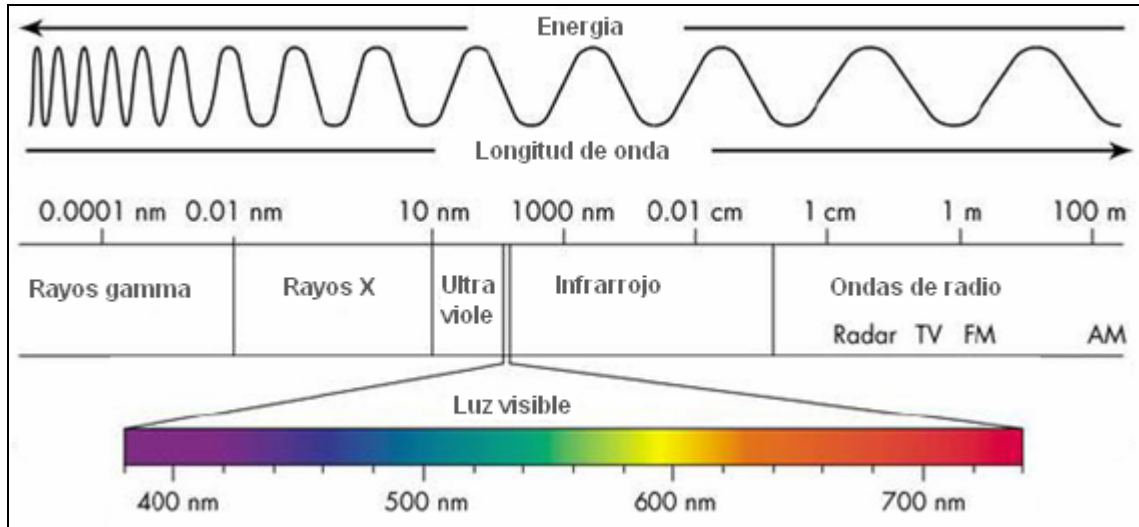
$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (1.10)$$

1.1.3 El espectro electromagnético. Como se aprecia en la figura 1.4, las ondas electromagnéticas se clasifican por rangos de frecuencia o de longitudes de onda; sin embargo, dichos rangos no tienen límites precisos, debido principalmente a que diferentes fuentes producen ondas en intervalos de frecuencia que se superponen parcialmente.

El espectro tiene múltiples aplicaciones en la industria, medicina, astronomía, etc, pero quizá el campo de mayor impacto es el relacionado con el área de las telecomunicaciones. Las comunicaciones por fibra óptica se ubican en el denominado *infrarrojo cercano*, en un rango de longitud de onda de 800 a 1700 nanómetros (nm).

La luz es producida por átomos y moléculas como resultado de interacciones entre sus componentes, principalmente de sus electrones. Dentro del espectro electromagnético, la luz visible ocupa el rango que va desde 380 nm (violeta) a 780 nm (rojo). La óptica es la rama de la física que trata los fenómenos luminosos y actualmente incluye además del espectro visible, el infrarrojo y el ultravioleta, debido a sus similitudes de comportamiento.

Figura 1.4 Espectro electromagnético



Fuente. <http://www.antonine-ducation.co.uk/>

1.2 FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un conducto formado por una cubierta y un núcleo, donde el índice de refracción de este último es mayor que el de la cubierta. El núcleo puede ser rígido o flexible, de plástico o de vidrio (SiO_2), y la estructura como tal es capaz de conducir un haz de luz inyectado por uno de sus extremos a través de un fenómeno de reflexiones sucesivas.

1.2.1 Principio de funcionamiento de un conductor de fibra óptica. El principio que hace posible el confinamiento de un haz de luz en un conductor de fibra óptica se denomina *Reflexión total interna* y se esquematiza en la figura 1.5.

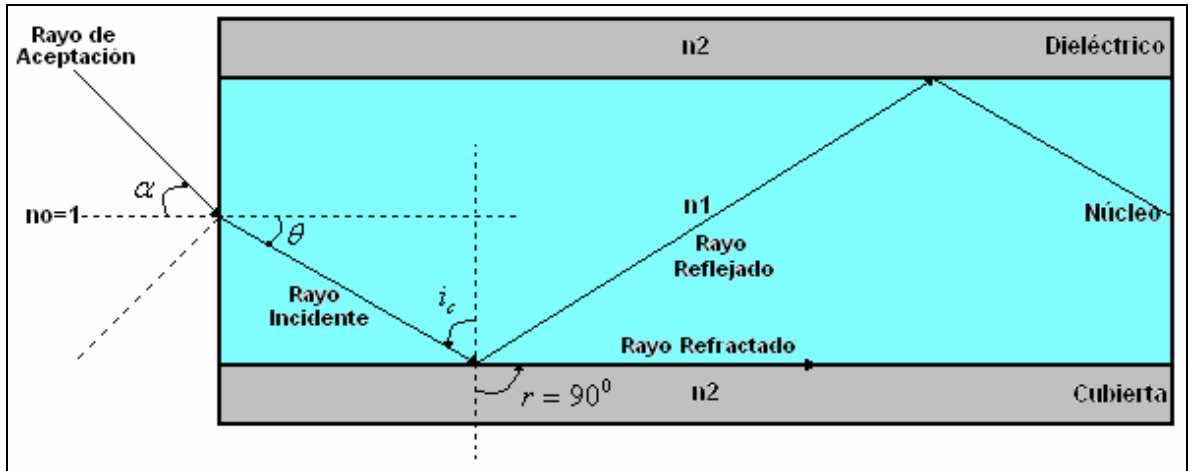
De la ecuación (1.10):

$$\text{sen } i = n_{21} \text{sen } r ; \quad \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (1.11)$$

Cuando $n_1 > n_2$ se tiene que $n_{21} < 1$, en estas condiciones se puede dar lugar a una situación especial, donde r puede alcanzar 90 grados con respecto a la normal, igual como se muestra en la figura 1.5. La ecuación (1.11) se transforma en:

$$\text{sen } i_c = n_{21} \quad (1.12)$$

Figura 1.5 Principio de reflexión total interna en un conductor de fibra óptica.



El ángulo dado por la ecuación (1.12) se conoce como *ángulo crítico*³ y lo denotaremos por i_c :

$$i_c = \text{sen}^{-1}(n_{21}) \quad (1.13)$$

Para un ángulo de incidencia mayor que el ángulo crítico se tiene que $\text{sen}i > n_{21}$, por lo que se deduce que $\text{sen}r > 1$, lo cual no es posible; por consiguiente, en este caso no hay rayo refractado y la reflexión que se produce es total. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando la luz pasa del vidrio al aire.

En general se considera que para guiar un haz de luz en una fibra óptica, el ángulo del rayo de incidencia debe ser mayor o igual que el ángulo crítico.

Apertura numérica El proceso por el cual un rayo luminoso del exterior se acopla al núcleo de la fibra requiere nuevamente de la aplicación de la ley de Snell entre los medios con índices de refracción n_0 y n_1 (figura 1.5), se asume como 1 el valor del índice de refracción para el medio externo:

$$1 \text{sen} \alpha = n_1 \text{sen} \theta$$

Se debe garantizar el valor del ángulo crítico exigido:

$$\text{sen} \alpha = n_1 \text{sen}(90 - i_c)$$

Por tanto:

$$\text{sen} \alpha = n_1 \cos i_c$$

³POWERS, John. An introduction to fiber optical systems. McGraw-Hill. International Editions. Pág. 12.

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \alpha &= n_1 \sqrt{1 - \operatorname{sen}^2 i_c} \\ \operatorname{sen} \alpha &= n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \\ NA &= \operatorname{sen} \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \quad (1.14)$$

$\operatorname{sen} \alpha$ se denomina apertura numérica NA , y define el mayor ángulo que puede tener el cono de luz que entra en la fibra y que garantiza el fenómeno de reflexión total interna. Se puede apreciar que depende únicamente de los índices de refracción del núcleo y la cubierta de la fibra. El ángulo α se conoce como *ángulo de aceptación*⁴.

1.2.2 Tipos de fibra óptica. El valor normalizado V de la ecuación (1.15), es el parámetro que permite establecer el régimen modal en el que opera una fibra⁵:

$$V = rKoNA \quad (1.15)$$

Donde:

- r radio del núcleo de la fibra.
- $Ko = 2\pi/\lambda_0$
- λ_0 longitud de onda de operación
- NA apertura numérica.

Para valores de $V > 2.405$, la fibra se considera como *fibra multimodo*, debido a que se propagan varios modos (señales luminosas con características diferentes). Si $V \gg 1$, el número de modos N se calcula aproximadamente por: $N = V^2/2$.

En una fibra típica multimodo N puede tener valores entre 1000 y 3000 modos que se propagan simultáneamente. Si $V \leq 2.405$, la fibra es *monomodo* ya que únicamente propaga un modo fundamental.

El perfil de índices de la fibra puede diseñarse teniendo en cuenta sus prestaciones. Una fibra donde el índice del núcleo es de tipo parabólico (máximo valor en el centro y los extremos coincidentes con el valor del índice de la cubierta) se considera como *fibra de índice gradual*, continúa siendo una fibra multimodo, pero ahora, el número de modos transmitidos está dado por: $N = V^2/4$.

En la tabla 1.1, se muestra una comparación de tres diferentes clases de fibra.

⁴Ibid. Pág. 18 - 19.

⁵Ibid. Pág. 14 - 16.

Tabla 1.1 Principales características de una fibra monomodo, una multimodo de índice gradual y una plástica.

CARACTERÍSTICA	FIBRAS MONOMODO	FIBRAS MULTIMODO	
		INDICE GRADUAL	PLASTICA
Diámetro núcleo	8 μm < 0 < 10 μm	50 μm < 0 < 100 μm	350 μm < 0 < 1000 μm
Diámetro cubierta	125 μm	25 μm < 0 < 150 μm	350 μm < 0 < 1000 μm
Apertura numérica	Muy pequeña	0.2 a 0.27	0.5
Alcance	Largo	Largo - Mediano	Corto
Atenuación	Muy baja	Baja	Alta

1.2.3 Ventajas y desventajas de la fibra óptica

Ventajas:

- La fibra óptica requiere un menor número de estaciones repetidoras, ya que la deformación de la señal es mucho más tardía en la distancia, si se hace una comparación respecto al cobre. Con una fibra óptica del tipo monomodo se pueden instalar tramos de hasta 70 kilómetros.
- Gran capacidad de transmisión debido al mayor ancho de banda disponible en frecuencias ópticas.
- Compatibilidad con tecnología digital.
- Excelente protección contra ruido e interferencias de tipo electromagnético.
- La fibra óptica no es conductora de electricidad, se puede usar cerca de líquidos y gases volátiles.
- Eliminación de las conexiones de puesta a tierra, que son necesarias en el caso de alambres de cobre que quedan en contacto con ambientes metálicos.

Desventajas:

- Alta fragilidad de las fibras.
- Las reparaciones en caso de ruptura de los cables requieren de equipo sofisticado e incrementan el nivel de pérdidas en la fibra.
- La fibra óptica convencional no puede transmitir potencias elevadas.
- Las etapas de conversión opto-eléctrica incrementan el costo de transmisores y receptores.

1.2.4 Atenuación en fibra óptica. Una de las características de mayor interés en un conductor de fibra óptica es la atenuación o pérdidas, éstas se producen ya sea por causas intrínsecas o extrínsecas. Las intrínsecas se deben primordialmente a los parámetros de fabricación de la fibra, como por ejemplo, burbujas de aire o impurezas químicas. Las extrínsecas obedecen a factores externos, se presentan

especialmente en las uniones optoelectricas y las zonas de empalmes mecánicos o térmicos.

Las pérdidas en fibra óptica se expresan mediante el índice de atenuación A , dado en dB/km (Decibeles/kilómetro). Se obtiene a partir de conocer la relación de potencia óptica que se detecta después que la luz atraviesa una longitud L de fibra⁶:

$$A = \frac{10}{L} \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) [dB / km] \quad (1.16)$$

Donde: P_{out} y P_{in} las potencias de salida y entrada en un conductor de fibra óptica.
 L la distancia recorrida por la luz en la fibra.

El decibel es una unidad de medida adimensional y relativa, relaciona la potencia de entrada y de salida de un sistema. En la tabla 1.2, se registran los valores típicos de pérdidas para las fibras de sílice, en relación con la longitud de onda.

Tabla 1.2 Valores de atenuación para los tipos de fibra multimodo de índice abrupto, multimodo de índice gradual y monomodo.

Longitud de onda	Fibras Multimodo		Fibra Monomodo
	Índice Abrupto	Índice Gradual	
850 nm	8 a 20 dB/km		
1300 nm		2.5 a 4 dB/km	0.3 a 0.5 dB/km
1550 nm		0.6 a 1.5 dB/km	0.15 a 0.3 dB/km

1.2.5 Fibra óptica plástica⁷. La mayoría de los tipos de fibra óptica hasta ahora mencionados se derivan del sílice como elemento principal de fabricación. La aspiración de reducir costos y de simplificar el proceso de construcción, ha llevado a la obtención de fibras con base en plásticos transparentes. Desde el punto de vista de los materiales empleados se distinguen dos tipos de conductores de fibra óptica plástica:

- Fibra óptica enteramente plástica, tanto el núcleo como la cubierta, generalmente denominada: *POF* (Plastic Optic Fiber).
- Fibra óptica con cubierta de sílice y núcleo de plástico: *HCS* (Hard Clad Silice).

⁶DUCHOWICZ, Ricardo. NORIEGA, Sergio. Intercomunicador por fibra óptica. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Argentina 2005. Pág. 17 – 18.

⁷Ibid. Pág 47 - 49

POF suele tener un diámetro de núcleo entre 350 y 1000 micrómetros (μm), generalmente, 900 μm . HCS posee diámetros entre 150 y 600 μm , generalmente, 200 μm . La fibra óptica plástica funciona como una multimodo. El rango de trabajo espectral se localiza en la región visible y parte del infrarrojo, comúnmente entre 400 a 950 nanómetros (nm). Su importancia radica en que se emplea para conexión de instalaciones interiores u acometidas finales, más comúnmente conocidas como *última milla*.

El valor típico de atenuación en una POF oscila alrededor de los 0.25 dB/m, valor que resulta hasta una 500 veces mayor en comparación con las fibras de sílice, esto determina que la longitud del enlace sea menor, y por tanto, las aplicaciones de esta fibra están dirigidas a conexiones cercanas.

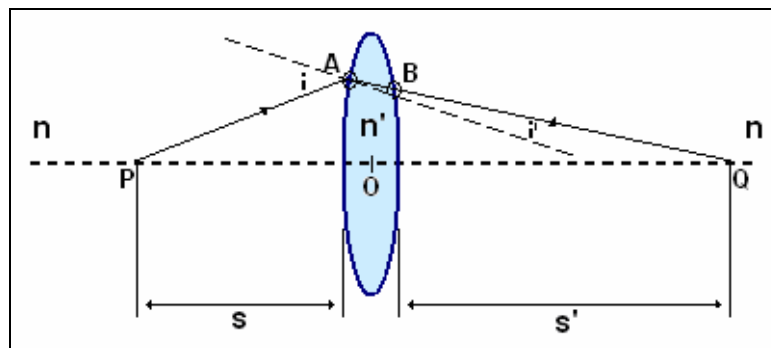
1.3 LENTES COLIMADORAS FOCALIZADORAS

Una lente es un sistema óptico limitado por dos superficies refringentes, generalmente de vidrio, acrílico o plástico. Comúnmente a ambos lados de la lente el medio es el mismo, y esta vez, la ley de refracción es la base del principio de funcionamiento de estos dispositivos.

Asumiendo como n el índice de refracción para el medio externo y como n' el índice de refracción del material de la lente, y además, si consideramos una lente del tipo delgada, cuyo espesor es muy pequeño comparado con los radios, entonces, la trayectoria de un rayo de luz que atraviesa la lente experimenta dos refracciones sucesivas en los puntos A y B, igual como se esquematiza en la figura 1.6.

Tradicionalmente el medio externo a la lente es el aire y por ende el valor de su índice de refracción es: $n = 1$.

Figura 1.6 Trayectoria de un rayo en una lente delgada.



Fuente. ALONSO, Marcelo. FINN, Edward. Física. Volumen II: Campos y Ondas. Addison – Wesley Iberoamericana.

En la figura 1.6, la fórmula que describe la trayectoria de un rayo que parte desde P y converge en Q es⁸:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n'-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.17)$$

Donde R_1 y R_2 son los radios de curvatura de cada uno de los segmentos circulares implicados en la construcción de la lente.

(1.17) se conoce como la *Fórmula de Descartes para una lente delgada*. Su obtención se basa en la *Aproximación de Gauss*, que admite para el sistema en cuestión, que todos los ángulos de incidencia y refracción son muy pequeños, de tal manera que se cumple:

$$i = \text{sen } i = \text{tg } i \quad (1.18)$$

Por ejemplo, la ley de Snell, para la primera refracción en el punto A de la figura 1.6 se puede escribir como:

$$ni = n'i' \quad (1.19)$$

Los rayos que satisfacen esta condición son casi paralelos al eje óptico del sistema y se denominan *rayos paraxiales*. La ecuación (1.17) es independiente de cualquier ángulo y válida para todos los rayos emitidos desde P y que convergen en Q.

Si los rayos inciden sobre la lente en forma paralela al eje óptico, igual como se muestra en la figura 1.7, es porque el punto P se encuentra muy distante y entonces la distancia s se asume en el infinito, esto hace que Q se desplace a la posición Q' modificando el valor de la distancia s' , el nuevo valor se conoce como *distancia focal* y se denota con f , mientras que el punto Q' se denomina *punto focal o foco imagen*. Con estas consideraciones (1.17) se convierte en:

$$\frac{1}{f} = (n'-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.20)$$

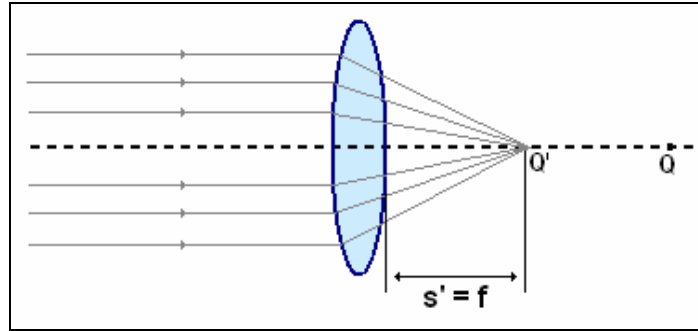
Y por tanto:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad (1.21)$$

(1.20) se suele llamar *ecuación del constructor de lentes* porque permite calcular la distancia focal en función de las características geométricas y el índice de refracción del material de la lente.

⁸ALONSO, Marcelo. FINN, Edward. Física. Volumen II: Campos y Ondas. Addison – Wesley Iberoamericana. Pág. 858 - 859.

Figura 1.7 Fenómenos de focalización y colimación en una lente delgada.



La situación ilustrada en la figura 1.7, es de capital importancia porque define 2 parámetros vitales acerca del funcionamiento de éstos dispositivos: Un haz de luz que incide paralelo al eje óptico sobre la lente se concentra en el punto focal (Q') produciendo el fenómeno de *focalización*; el fenómeno de *colimación*, es el proceso inverso, donde todo cono de luz emitido desde el punto focal producirá un haz luminoso cuyos rayos son paralelos.

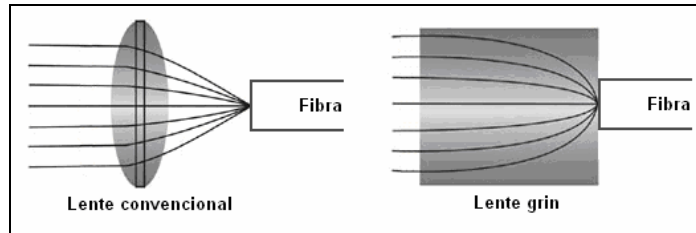
Cuando el haz paralelo de luz es concentrado en el punto focal, el sistema óptico es una *lente convergente* y entre ellas se distinguen las lentes *biconvexas*, *plano-convexas* y *menisco-convergentes*; de otro lado, si el haz paralelo incidente no es concentrado, sino que sufre una dispersión, entonces el sistema óptico es una *lente divergente* y entre ellas se tienen las lentes *bicóncavas*, *plano-cóncavas* y *menisco-divergentes*. Muchos dispositivos de uso actual utilizan combinaciones de los tipos de lentes mencionados con el fin de optimizar su rendimiento.

Las uniones de la fibra óptica con fuentes de luz y fotodetectores se han ido perfeccionando gracias al desarrollo de lentes más sofisticadas denominadas *Lentes Grin* (Graded Index lens), ellas poseen forma cilíndrica y una estructura de índice gradual, similar a las fibras del mismo tipo. La figura 1.8, nos hace una comparación entre una lente convencional y una lente Grin, evidentemente, el proceso de colimación en una lente grín es mejor y en los empalmes con la fibra las pérdidas son menores.

Finalmente, las lentes también poseen la apertura numérica NA como parámetro de funcionamiento, cuyo ángulo θ define la máxima abertura de la luz incidente que entra útil al sistema:

$$NA = n \sin \theta \quad (1.22)$$

Figura 1.8 Diferencias entre una lente convencional y una lente Grin.



Fuente. <http://www.xutingbj.com/en/products/glinfo.htm>

1.4 FUENTES ÓPTICAS

En fibra óptica se trabajan dos fuentes de luz principalmente: Los diodos emisores de luz (LED) y los diodos láser (LD). La emisión de luz en los LED y LD se debe a la *Interacción electrón fotón en uniones semiconductoras*. Si E_c es la energía de un electrón cuando se encuentra en la banda de conducción y E_v la energía cuando se encuentra en la banda de valencia; entonces, el electrón puede absorber o liberar energía si hace una transición entre éstas bandas.

1.4.1 Interacción electrón fotón en uniones semiconductoras⁹. Al pasar un electrón de la banda de conducción a la banda de valencia, éste puede liberar energía en forma de fotones, igual a la diferencia de energía de las bandas de conducción y de valencia:

$$E = E_c - E_v \quad (1.23)$$

En la figura 1.9, se indican las dos formas en que este proceso ocurre. En la *emisión espontánea* no existe ningún fenómeno externo que induzca al electrón pasar de la banda de conducción a la banda de valencia liberando un fotón. En la *emisión estimulada* un fotón incidente es el que provoca la transición del electrón, que a su vez libera otro fotón. La fase y la frecuencia del fotón incidente y del fotón liberado son las mismas.

1.4.2 Comparación de las fuentes ópticas¹⁰. Tanto los LED como los LD, son diodos semiconductores que operan en polarización directa y emiten luz cuando los huecos y electrones se recombinan en la zona activa.

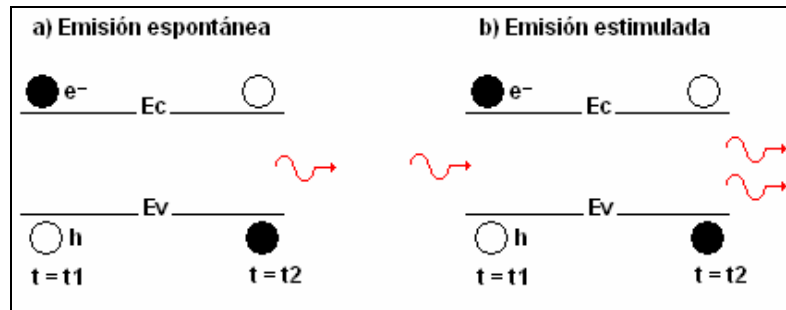
Los LED generan luz por emisión espontánea, donde el haz producido tiene un campo de radiación relativamente amplio en el que los fotones se esparcen en

⁹JARDÓN, Hildeberto. LINARES, Roberto. Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas. Alfaomega. 1995. Pág. 52 – 53.

¹⁰ibid. Pág. 65 - 67

todas direcciones. El tipo de luz con éstas características se conoce como *emisión no coherente*.

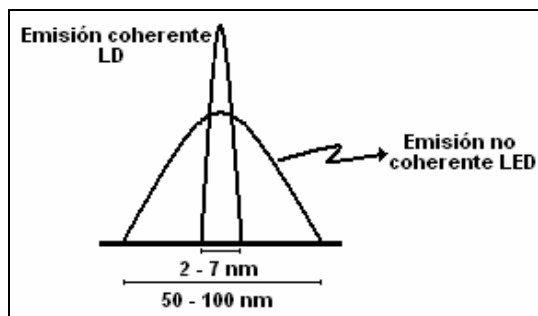
Figura 1.9 Diagrama de los procesos de emisión espontánea y estimulada en fuentes ópticas



Los diodos láser LD contienen dos espejos semirreflejantes ubicados en cada extremo de la región activa. La cavidad formada por los espejos se denomina *Resonador de Fabry-Perot*, y su función es reflejar una cierta cantidad de fotones requeridos en el fenómeno de emisión estimulada. El haz producido por un LD posee un campo de radiación pequeño, con niveles importantes de ganancia óptica debido al proceso de retroalimentación fotónica. La luz producida por un LD se conoce como *emisión coherente*.

La figura 1.10, muestra el diagrama del ancho espectral de radiación en LEDs y LDs.

Figura 1.10 Ancho espectral de radiación de un LED y un LD



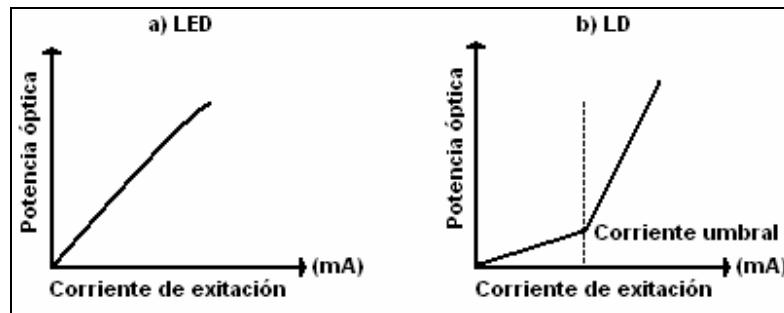
Fuente. JARDÓN, Hildeberto. LINARES, Roberto. Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas. Alfaomega. 1995.

La figura 1.11, muestra la curva característica de cada dispositivo en cuanto a potencia óptica de salida y corriente de excitación. La intensidad luminosa producida por los LED es proporcional al nivel de corriente de polarización del diodo; por tanto, si el nivel de corriente de polarización varía en conformidad con una señal útil, la potencia emitida por el LED será proporcional a la amplitud de la señal. Los LD tienen un valor de corriente umbral, en donde a niveles menores a

este valor, el LD emite luz no coherente como el LED, y a niveles de corriente por encima del umbral, la luz emitida es coherente.

Al contrario de los LD, los LED son dispositivos muy robustos y no requieren circuitería compleja de protección, esto redundando en simplicidad y bajo costo de los transmisores. El LD con respecto al LED es mucho más rápido, su potencia de salida es mayor y su haz es mucho más puntual y concentrado.

Figura 1.11 Comportamiento de la potencia óptica de salida contra corriente de excitación en LEDs y LDs.



Fuente. JARDÓN, Hildeberto. LINARES, Roberto. Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas. Alfaomega. 1995.

1.5 FOTODETECTORES

Un fotodetector es un sistema donde la luz recibida se convierte en una señal eléctrica. Dicha señal por lo general es una corriente que debe ser acondicionada para poder ser llevada a otras etapas de un circuito electrónico.

Los detectores usados en sistemas de fibra óptica están basados también en materiales semiconductores, donde la absorción de fotones va a dar lugar a un aumento de la conductividad del medio a través del *efecto fotoeléctrico* (absorción de fotones y generación de pares electrón-hueco). En particular estos detectores están basados en uniones p-n especiales que presentan ventajas como: pequeña área de detección, bajo ruido y ancho de banda elevado.

1.5.1 Tipos de fotodetectores en fibra óptica. Existen básicamente 3 tipos de fotodetectores asociados con los sistemas de fibra óptica:

La unión p-n como fotodetector¹¹. El campo eléctrico presente en la unión, resultante de la polarización directa, va a generar pares electrón-hueco cuya

¹¹<http://www.ate.uniovi.es/campo/instrum/teoria/presentaciones/foto/fotodiodos.PDF>

cantidad depende de la intensidad de luz que recibe el dispositivo, el resultado es una generación de corriente eléctrica de la forma:

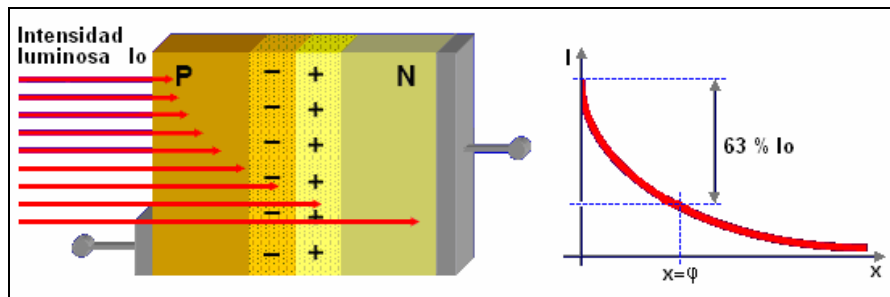
$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1.24)$$

Donde:

I_0	Intensidad luminosa incidente
I	Corriente generada
α	Coefficiente de absorción

(1.24) se puede representar gráficamente como en la figura 1.12.

Figura 1.12 Generación de corriente a partir de una intensidad luminosa incidente en fotodiodos.



Fuente. <http://www.ate.uniovi.es/campo/instrum/teoria/presentaciones/foto/fotodiodos.PDF>.

El fotodiodo PIN¹² Estos dispositivos se construyen con una capa de material semiconductor ligeramente contaminado, denominada región intrínseca (i) (Figura 1.13 a)), la cual se coloca entre dos capas de material semiconductor, una tipo N y otra tipo P altamente conductoras. Un fotón que llegue a la zona intrínseca con igual o mayor energía que la del material semiconductor, puede perder su energía y excitar a un electrón que se encuentra en la banda de valencia, para que pase a la banda de conducción. Este proceso genera pares electrón-hueco que se llaman *fotoportadores*. Al contrario del diodo convencional, el fotodiodo PIN se polariza inversamente para acelerar las cargas presentes en la zona intrínseca, y dirigir las a los electrodos donde dan lugar a una *fotocorriente*.

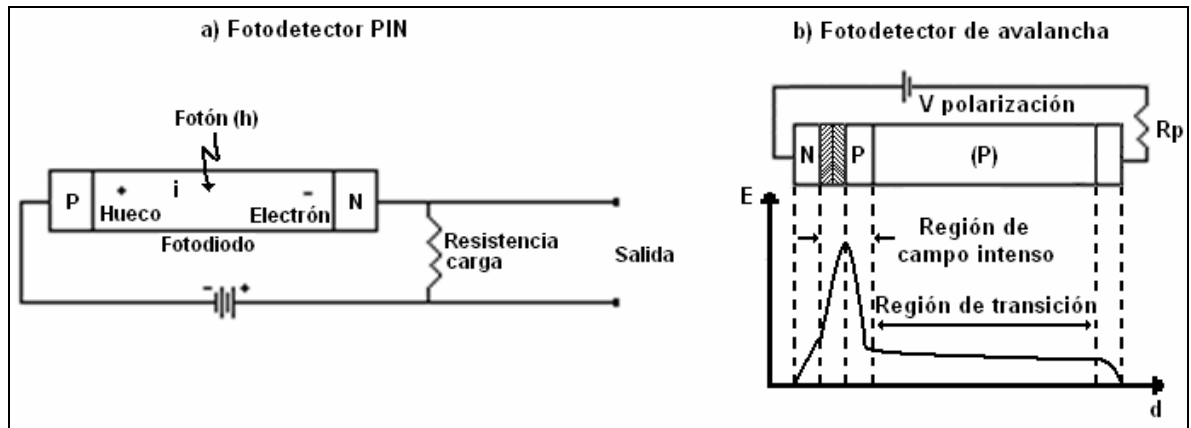
La relación de la fotocorriente con respecto a la potencia óptica se define como: *Responsividad*. Este parámetro está relacionado con el tipo de material del fotodetector y es función del espesor de la zona intrínseca para un nivel determinado de voltaje de polarización. La responsividad está dada por:

$$R = \frac{\Delta I}{\Delta P} [A/W] \quad (1.25)$$

¹²JARDÓN, Hildeberto. LINARES, Roberto. Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas. Alfaomega. 1995. Pág. 104 – 105.

Donde: ΔP Incremento de potencia óptica
 ΔI Incremento de fotocorriente

Figura 1.13 Fotodetectores de polarización inversa



Fuente JARDÓN, Hildeberto. LINARES, Roberto. Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas. Alfaomega. 1995.

Otro parámetro de importancia en los fotodetectores es la *Eficiencia cuántica*, que se define como el cociente entre el número de pares electrón-hueco generados y el número de fotones incidentes por segundo. La eficiencia cuántica está relacionada con la responsividad y su expresión es:

$$\eta = R \frac{hc}{q\lambda} \quad (1.26)$$

Donde: η Eficiencia cuántica, siempre (<1)
 h Constante de Plank
 c Velocidad de la luz en el vacío
 q Carga del electrón
 λ Longitud de onda

El fotodiodo de avalancha¹³. Conocidos también como ADP (Figura 1.13 b)), son diodos de polarización inversa, pero ahora las tensiones de alimentación son muy elevadas, esto hace que se forme un campo eléctrico muy fuerte, que no solo acelera los átomos del material sino también los mismos portadores generados; Así, se incrementan ostensiblemente el número de colisiones y por ende el acumulado total de pares electrón-hueco es mucho mayor que en los demás tipos de fotodetectores. Este proceso se conoce como *ionización por impacto* y su resultado final es una fotocorriente de mayor intensidad. Para conseguir los

¹³ibid. Pág. 110 – 112.

campos requeridos hay que polarizar el diodo inversamente con voltajes entre 50 y 400 Voltios.

1.6 FOTORRESISTENCIAS

Una fotorresistencia o LDR (Light Dependent Resistor), es un dispositivo cuya resistencia óhmica varía dependiendo de la iluminación recibida sobre su superficie. En su fabricación se utilizan materiales que poseen muy pocos electrones libres cuando se encuentran en condiciones de oscuridad, pero el número de electrones libres aumenta de una forma considerable cuando el sensor es iluminado; en consecuencia, la conductividad crece y por tanto la resistencia óhmica disminuye.

La relación entre la resistencia R y la iluminación L (Densidad superficial de energía recibida expresada en Luxes), es un modelo no lineal que se describe por la siguiente ecuación¹⁴:

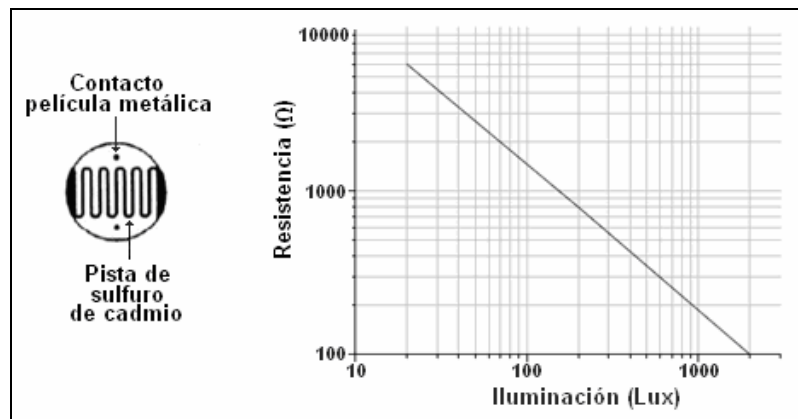
$$R = AL^{-\alpha} \quad (1.27)$$

Donde A y α son constantes que dependen del material de fabricación.

La figura 1.14, representa un sensor LDR típico, donde la respuesta exponencial de R respecto a L se representa en escala logarítmica.

Las aplicaciones de los LDR van desde los detectores de presencia hasta el control automático de brillo y contraste en receptores de televisión o el control de diafragmas de cámaras automáticas.

Figura 1.14 Estructura y curva característica de un sensor LDR



¹⁴PALLÁS, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Alfaomega. 3a Edición. Pág. 89.

1.7 MICROCONTROLADORES DE GAMA ALTA

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que cuenta con muchas de las características que posee un computador y que se utiliza para gobernar una aplicación determinada (*“Computador dedicado”*). Sus bloques esenciales son: CPU, memoria de datos y de programa, módulos de entrada y salida, oscilador de reloj y módulos controladores de periféricos.

Los microcontroladores pueden clasificarse según su arquitectura, como dispositivos Von Neumann o Harvard¹⁵. La arquitectura Von Neumann dispone de una sola memoria principal en donde se almacenan datos e instrucciones en forma indistinta. El bus de direcciones se utiliza para acceder a una posición de memoria, mientras que el bus de datos es usado para trasladar información entre la CPU y alguna dirección de memoria y viceversa.

La Arquitectura Harvard en cambio tiene dos memorias independientes, una para instrucciones y otra para datos. Ambas disponen de sus respectivos buses de acceso y es posible realizar operaciones de lectura o escritura simultáneamente en ambas memorias, ésta es precisamente una de las ventajas de la arquitectura Harvard. Otra ventaja radica en que la operación del microcontrolador puede ser más fácilmente controlada cuando se presentan errores en el contador de programa.

En cuanto a las técnicas de construcción, prácticamente la mayoría de los microcontroladores actuales se fabrican con tecnología CMOS. Esta tecnología supera a las anteriores por su bajo consumo y alta inmunidad al ruido.

La empresa Estadounidense Microchip ofrece una amplia variedad de microcontroladores más popularmente conocidos como PICs, que de manera general se clasifican en PICs de gama baja, media y alta, siendo estos últimos los que cuentan con un mayor número de módulos funcionales. Un microcontrolador de gama alta posee una mayor capacidad de memoria y un mayor número de instrucciones de bajo nivel en comparación con los PICs de las otras denominaciones.

Un ejemplo de un microcontrolador de gama alta es el PIC18F4550. En la tabla 1.3, se resumen sus más importantes módulos funcionales.

¹⁵PALACIOS, Enrique y col. Microcontrolador PIC16F84 Desarrollo de proyectos. Alfaomega. Pág. 48 – 49.

Tabla 1.3 Resumen de los principales módulos del PIC18F4550

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Frecuencia de operación	Oscilador externo de hasta 48MHz Oscilador interno de hasta 8MHz
Memoria de programa	32 Kilobytes
Memoria de datos	SRAM (2048 bytes) EEPROM (256 bytes)
Fuentes de interrupción	20 interrupciones que se pueden configurar en alta o baja prioridad
Puertos de entrada - salida	Puertos: A, B, C, D, E
Temporizadores	4 de 8 y 16 bits
Comparadores/PWM	2
Puertos para comunicaciones	Puerto serial: USART Puerto USB Puertos MSSP, SPP
Conversor análogo - digital	10 bits de resolución 13 canales
Número de instrucciones	75 ampliadas a 83

Fuente: Microchip Technology Inc. PIC18F2455/2550/4455/4550 DataSheet.

1.8 BUS SERIAL UNIVERSAL USB

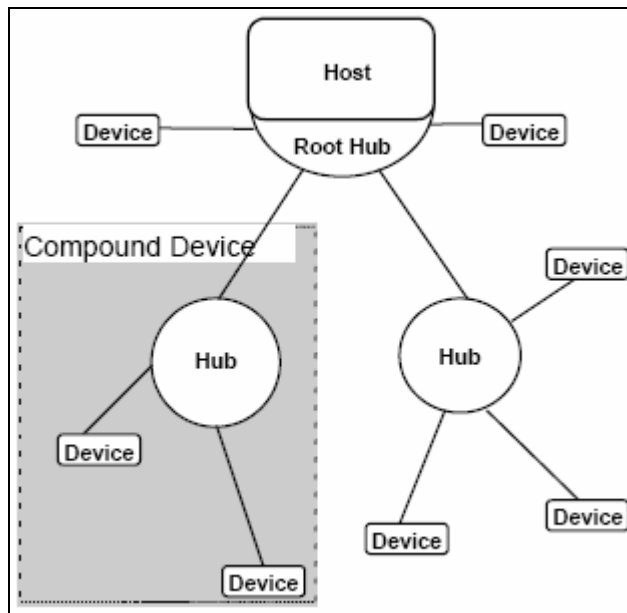
El bus serie universal (*Universal Serial Bus - USB*) es un estándar que puede soportar hasta 127 dispositivos conectados simultáneamente a un ordenador a través de un puerto serie que posee una jerarquía ramificada de funcionamiento.

La estructura ramificada se muestra en la figura 1.15. Se puede observar que los dispositivos se conectan a un *Host controlador* por medio de una cadena de *Hubs*. Al igual que en redes, los Hubs son módulos que dependen de un controlador central, y permiten incrementar los puntos de conexión a la red. La estructura en árbol admite hasta cinco niveles de bifurcación dependientes del Host principal. Los Hubs y los dispositivos a éstos conectados se cuentan de forma independiente dentro del total de 127 posibles conexiones. En la figura también se observa que existe un Hub principal conocido como *Hub raíz* que se conecta de forma directa al Host controlador.

Un Hub es un periférico que se conecta al computador a través de sus terminales de conexión USB. Este a su vez, puede incorporar nuevas terminales USB para conectarse, bien a otros dispositivos, o bien a otro Hub. Las principales funciones

del Hub son las de informar al Host controlador si un dispositivo es conectado o desconectado de sus terminales. Se encarga también de acoplar las velocidades de transferencia entre los dispositivos finales y el Host controlador.

Figura 1.15 Estructura física del bus USB



Fuente. Universal Serial Bus Specification. Revision 2.0. PDF - 2000

El Host controlador es el centro que administra toda la configuración USB. Sus principales funciones son¹⁶:

- Detectar la conexión y desconexión de dispositivos y configurarlos.
- Fija el protocolo por el cual los dispositivos acceden al bus. Por medio de un sondeo, el Host determina que dispositivo necesita establecer un enlace, tras lo cual autoriza el intercambio de información.
- Gobierna las transferencias de datos de información y de control que tienen lugar en el bus.
- Es la fuente de alimentación de los dispositivos.

La transferencia de datos en USB se realiza a través de canales lógicos que comunican el Host y un bloque de memoria de datos o un registro del chip controlador del dispositivo final. Los canales lógicos se conocen como *Pipes*, mientras que el registro o el bloque de memoria de datos se conocen como *Endpoints*.

¹⁶Universal Serial Bus Specification. Revision 2.0. PDF – 2000. Pág. 24.

Un Endpoint y el Host finalmente establecen una conexión simple para el flujo de datos de entrada o salida. La dirección siempre se considera desde el punto de vista del Host. Así un Endpoint de salida transmitirá datos desde el Host controlador al dispositivo. Todos los dispositivos deben implementar un Endpoint 0 como punto final de control. Este es utilizado para identificar y configurar el periférico y tiene capacidad de transferencia de datos en ambos sentidos.

Los Endpoints y sus respectivos Pipes se enumeran mediante una dirección única, asignada por el sistema durante el tiempo de conexión. La dirección para cada Endpoint consta de dos partes, un número entre 0 y 15 y un sentido: in, out. De esta forma un dispositivo final puede contar hasta con 32 Endpoints, 16 de entrada y 16 de salida.

1.8.1 Velocidad, conectores y consumo de potencia.

Velocidad. Según las especificaciones del Bus serial universal USB 2.0, dicho puerto puede trabajar con tres velocidades, en baja velocidad (*Low speed*), en velocidad completa (*Full speed*) y en alta velocidad (*High speed*), las velocidades de transferencia de datos son de 1.5, 12 y 480 Megabits por segundo, respectivamente. El tipo de Alta velocidad fue introducido en la versión USB 2.0, los otros tipos ya existían desde la versión USB 1.1.

Señalización y conectores. Un conector USB posee un total de 4 líneas, dos para transmitir datos y dos para transmitir potencia. Las líneas para datos se disponen en forma de un par trenzado que minimiza el ruido electromagnético. El diseño eléctrico de un cable USB permite alcanzar un máximo de 5 metros sin necesidad de un repetidor intermediario. A cada una de las líneas se le ha asignado un color de identificación que está relacionado con el tipo de señal que transmite. Los cables rojo y negro son alimentación y tierra, respectivamente. Los cables blanco (D-) y verde (D+) son las líneas de transmisión de datos.

Existen dos tipos de conectores: estándar y mini. Los estándar se dividen en A y B. El tipo A es de forma aplanada y es el que se encuentra del lado del Host controlador, el tipo B es cuadrado y se encuentra del lado del dispositivo. Los conectores mini siguen la misma estructura que los estándar pero se utilizan en dispositivos pequeños como celulares o Palms.

Potencia. El bus USB a través de los cables rojo y negro suministra un voltaje de continua de 5 voltios (V), destinados para dispositivos de bajo consumo que obtienen de allí la corriente necesaria para su funcionamiento. El voltaje no puede exceder los 5.25 V, ni estar por debajo de 4.4 V, normalmente el voltaje se mantiene alrededor de 5 V y la máxima corriente suministrada es de 500 miliamperios por cada puerto.

Si un Hub y sus dispositivos anexos se conectan al bus USB, la corriente total no puede superar el valor máximo exigido. Es por eso que la especificación USB solo admite un nivel de Hubs alimentados directamente del puerto, de manera que no se puede conectar dos Hubs entre si, sí ninguno de ellos tiene alimentación propia. Los dispositivos USB avanzados informan al Host controlador la potencia que van a requerir.

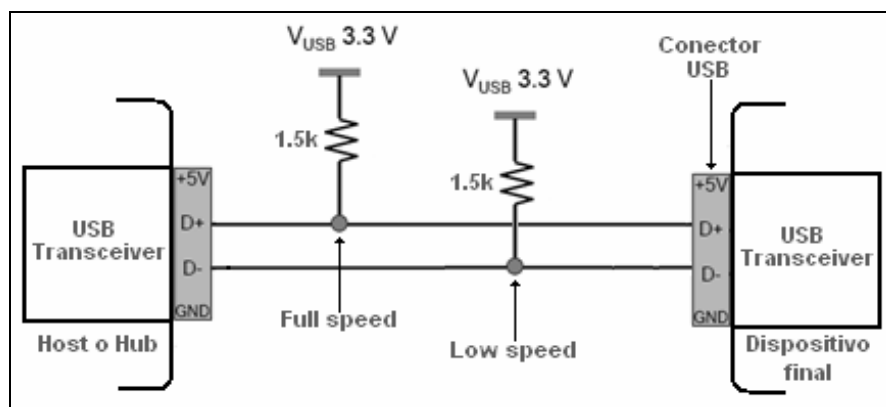
Si los dispositivos necesitan una corriente mayor al tope máximo deben utilizar su propia fuente de alimentación. Aquellos dispositivos que consuman más corriente de la negociada con el host, pueden dejar de funcionar sin aviso previo, y en algunos casos dejar inservible todo el bus.

1.8.2 Principales características de operación del bus USB.

Configuración de un dispositivo USB¹⁷. Un dispositivo conectado al bus USB se detecta por un nivel de voltaje V_{USB} de 3.3V presente en una de las líneas de datos D- o D+. El voltaje V_{USB} se conecta a cualquiera de estas líneas mediante de una resistencia pull-up de 1,5 K Ω . Generalmente, la resistencia y la fuente de alimentación V_{USB} ya hacen parte de la arquitectura interna del dispositivo.

Como se aprecia en la figura 1.16, si el voltaje V_{USB} recae sobre la línea D+, el Host entenderá que tal dispositivo trabajará en velocidad completa (Full speed); si por el contrario, el voltaje recae sobre la línea D-, el dispositivo se configurará en velocidad baja (Low speed).

Figura 1.16 Detección de un dispositivo USB



Seguidamente el Host realiza un proceso de enumeración, el cual consiste en asignar una dirección única de 7 bits al dispositivo para su identificación.

¹⁷Ibid. Pág. 121 – 123.

Por otra parte, los dispositivos conectados envían información al Host sobre la clase a la que pertenecen, el tipo de transferencia que utilizarán, sus necesidades de potencia, ancho de banda, etc. Los dispositivos envían toda esa información al sistema a través de unas estructuras de datos denominadas **Descriptores**.

Los principales tipos de descriptores son:

Descriptor de dispositivo. La información suministrada al Host tiene que ver principalmente con: la versión USB del dispositivo, la clase USB, el número identificador de vendedor y el número identificador de producto. Estos datos se encuentran estrechamente relacionados con el Driver de instalación del producto.

Descriptor de configuración. Las características que informa este descriptor son: si el dispositivo se alimenta desde el bus USB (Bus-Power) o si dispone de fuente de alimentación propia (Self-power), la corriente que consume del bus USB en esta configuración, y si el dispositivo es capaz de despertar el sistema de un estado de reposo.

Descriptor de interfase. Informa acerca de la unión de Endpoints como grupos funcionales que ejecutan una tarea específica. Por ejemplo, una impresora, un escáner o un fax, son considerados cada uno como una interfase.

Descriptor de punto final. El descriptor de cada Endpoint indica: el tipo de transferencia usada, la dirección de los datos desde el punto de vista del Host, (IN) si es de entrada, (OUT) si es de salida, el tamaño máximo del paquete de datos soportado por el Endpoint y la dirección del Endpoint entre 0 y 15. Un Endpoint 0 debe existir por defecto en el dispositivo para tareas de control.

Una *Clase USB* especifica un grupo de dispositivos de similares características. Típicamente una Clase USB describe la forma en que un dispositivo se comunica con el sistema, tanto a nivel de datos como a nivel de control.

Las distintas Especificaciones de Clase USB, permite a los fabricantes desarrollar dispositivos que pueden controlarse mediante Drivers genéricos. Estos Drivers controlan los dispositivos en función de la información suministrada por sus descriptores. La finalidad de los Drivers genéricos es poder ejercer un control, sin necesidad de que cada fabricante tenga que desarrollar sus propios Drivers, para aquellos dispositivos que poseen idénticas particularidades de funcionamiento.

La clase USB se encuentra en campos de datos vinculados a los descriptores de dispositivo e interfase. Estos campos son utilizados por el sistema para asociar el periférico con un Driver genérico especificado para esa clase. En el descriptor de dispositivo existe un campo denominado "*bDeviceClass*" que toma un valor entre 01h y FEh dependiendo de la clase a la que pertenezca. Si el periférico no pertenece a una clase ya definida o si se le quiere asignar un driver específico no

genérico, el campo tendrá un valor de FFh (clase específica de un vendedor). En este caso se deberá suministrar los identificadores “*idVendor* e *idProduct*” que definen respectivamente el número identificador de vendedor y el número identificador de producto, anteriormente mencionados.

Los identificadores *idVendor* e *idProduct* los determina el fabricante y se deben incluir en un fichero INF que el sistema operativo utilizará en el momento de instalación del producto. Cuando el sistema operativo instala un nuevo dispositivo USB, compara los datos del respectivo fichero INF con la información obtenida de los descriptores del dispositivo.

1.8.3 Dispositivos USB típicos. Entre los dispositivos USB típicos se encuentran:

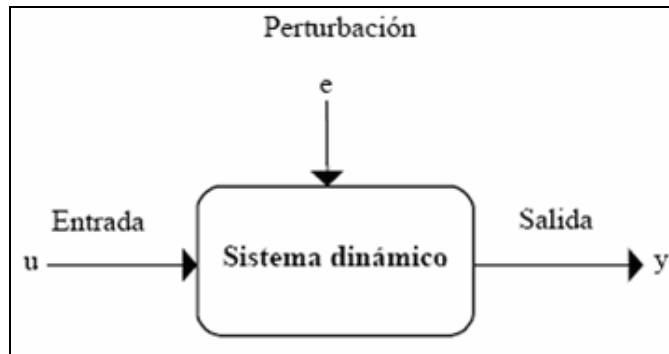
- **HID (*Human Interface Device*).** Son dispositivos de baja velocidad y algunos de ellos no requieren Driver. En esta categoría se encuentran: Mouse, Keyboard, Joystick, etc.
- **CDC (*Communication Device Class*).** Trabajan en velocidad completa, requieren de Driver y lo que hacen es emular una transmisión serial asíncrona (UART) a través del puerto USB. Los puertos configurados de esta forma se conocen como COMs Virtuales. Algunos Modems o ciertos Módulos para transmisión inalámbrica se encuentran en esta categoría.
- **MSD (*Mass Storage Device*).** Requieren de Driver y trabajan en alta velocidad. Ejemplos típicos son los dispositivos de almacenamiento masivo como discos duros o memorias USB.

1.9 MODELO DE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICO ARX

1.9.1 Concepto y modelo de un sistema. Un sistema es un entorno funcional en el que interactúan diferentes clases de variables. La o las variables que generan un determinado tipo de respuesta se denominan señales de entrada, mientras que la o las señales que hacen parte de la respuesta obtenida se conocen como señales de salida. Existe otro tipo de señales que no son entradas como tal, pero que influyen en la respuesta del sistema, estas son las señales de perturbación. Un diagrama ilustrativo de la definición de sistema se muestra en la figura 1.17

Caracterizar un sistema es obtener un *modelo matemático* que permita establecer su respuesta en unas determinadas condiciones y ante una/s determinada/s entrada/s.

Figura 1.17 Principales señales en un sistema dinámico.



Esencialmente son dos las técnicas principales que permiten modelar un sistema:

El método analítico, es una técnica que utiliza leyes matemáticas y físicas para estudiar el comportamiento de un sistema desde una perspectiva netamente teórica. El método emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar variables, relaciones entre variables, parámetros u operaciones.

La Identificación del sistema, es una técnica experimental que genera un modelo a partir de datos reales obtenidos del sistema en estudio. Un modelo que resulta de la medición de variables de entrada y salida es un tipo de modelo *Caja Negra*, porque no necesariamente los parámetros obtenidos son la representación de las leyes físicas implicadas en el funcionamiento del sistema¹⁸.

Otra característica importante es que regularmente existen parámetros desconocidos que no se pueden esbozar teóricamente y que solo se determinan experimentando directamente sobre el sistema real, de ahí la necesidad de acudir a los métodos de identificación de sistemas.

1.9.2 La identificación del sistema. Son dos los métodos generales de mayor importancia:

Métodos no paramétricos. Cuando los sistemas se caracterizan mediante gráficos o tablas de datos, que son el resultado de las respuestas al impulso, al escalón o la respuesta en frecuencia. A menudo, otros tipos de análisis, como los de correlación, Fourier y espectral, también son considerados.

Modelos paramétricos. Cuando el sistema se caracteriza a través de relaciones u ecuaciones matemáticas, que se derivan de una estimación hecha a través de una estructura algorítmica, que genera el modelo teniendo como base datos

¹⁸AGUADO, Alberto. MARTINEZ, Miguel. Identificación y Control Adaptativo. Prentice Hall. Pág. 1-5.

experimentales. La principal aplicación de los métodos paramétricos es la obtención de una función de transferencia que describe el sistema.

1.9.3 Estructura paramétrica ARX. Una estructura paramétrica describe un sistema mediante una relación matemática y un número finito de parámetros. Estas estructuras permiten observar el comportamiento de cualquier sistema lineal en tiempo discreto, debido a que los datos que son la base del proceso de identificación se obtienen por muestreo. La expresión que representa la familia de estructuras paramétricas es¹⁹:

$$A(q^{-1})y(t) = G(q^{-1}, \theta)u(t) + H(q^{-1}, \theta)e(t) \quad (1.28)$$

$$A(q^{-1})y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t)$$

Con A , B , C , D y F polinomios de la forma:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (1.29)$$

$$B(q^{-1}) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + a_{nc}q^{-nc}$$

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} + \dots + d_{nd}q^{-nd}$$

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_{nf}q^{-nf}$$

Donde:

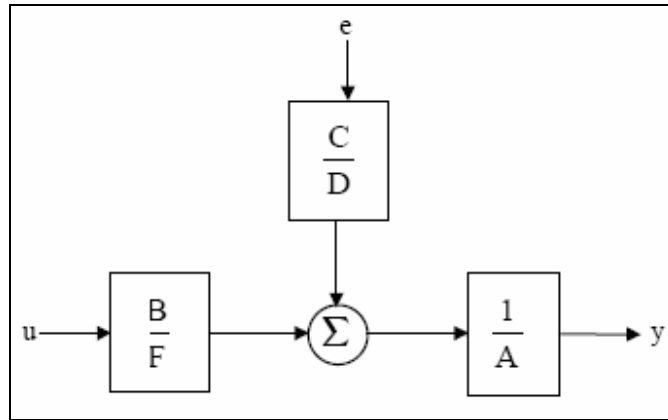
q^{-1}	Operador de retardo.
θ	Vector de parámetros que contiene los coeficientes a_i , b_i , c_i , d_i y f_i .
$u(t)$, $e(t)$	Entrada y ruido de entrada respectivamente.
$y(t)$	Salida del sistema.

Evidentemente (na , nb , nc , nd , nf) determinan el grado de cada uno de los polinomios, pero existe también el factor nk , que es un agente de retardo entre la entrada y la salida. El esquema general en diagrama de bloques se muestra en la figura 1.18.

La estructura autoregresiva con entrada exógena (ARX), es un caso particular donde: $C(q^{-1}) = D(q^{-1}) = F(q^{-1}) = 1$. Otros casos particulares son ARMAX, BJ, OE.

¹⁹Matlab 7.0 Help. System Identification Toolbox - arx. Polynomial Representation of Transfer Functions.

Figura 1.18 Diagrama general de bloques de la familia de estructuras paramétricas.



Fuente. <http://www.univalle.edu.co/~automatica/Cursos/MoldelaPreg/Material/Identificacion.ppt>

Asignando los valores de (na, nb, nk) óptimos para estimar el modelo, la expresión resultante para la estructura ARX es²⁰:

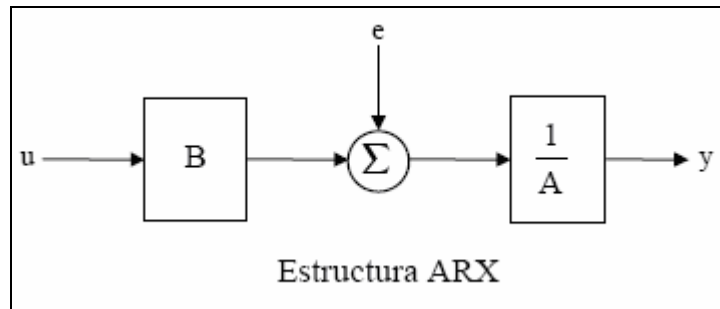
$$\begin{aligned} A(q^{-1})y(t) &= q^{-nk} B(q^{-1})u(t) + e(t) \\ A(q^{-1})y(t) &= B(q^{-1})u(t - nk) + e(t) \end{aligned} \quad (1.30)$$

O explícitamente:

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_{na} y(t-na) + b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t) \quad (1.31)$$

En síntesis, el modelo paramétrico ARX puede obtener la salida de un sistema en función de las entradas y salidas en instantes anteriores. La figura 1.19, muestra el equivalente diagrama de bloques.

Figura 1.19 Diagrama de bloques del modelo paramétrico ARX



Fuente. <http://www.univalle.edu.co/~automatica/Cursos/MoldelaPreg/Material/Identificacion.ppt>

²⁰Matlab 7.0 Help. System. Polynomial Representation of Transfer Functions.

La elección de un modelo en particular depende de las características del sistema en estudio; por ejemplo, un parámetro que siempre se debe tener en cuenta es el punto en el que el ruido se adiciona al sistema y las características del mismo. Sin embargo, muchas veces lo más conveniente es ensayar con las distintas estructuras hasta encontrar los parámetros (Coeficientes a_i , b_i , c_i , d_i y f_i) que mejor hacen corresponder el modelo matemático obtenido con los datos de entrada y salida muestreados.

Una vez elegida la estructura y el orden de cada uno de los polinomios citados; es decir, los valores de na , nb , nc , nd , nf y el retardo entre la entrada y la salida nk , hay que determinar el vector $\theta(a_i, b_i, c_i, d_i \text{ y } f_i)$ para estimar la expresión matemática que representa el comportamiento del sistema real.

Error de predicción. El error de predicción ε es la diferencia entre la salida real del sistema y la salida estimada por la estructura en un determinado instante de tiempo:

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - y_e(t, \theta) \quad (1.32)$$

Donde y_e es la salida estimada.

1.9.4 La validación del modelo. Una vez obtenida la expresión matemática que describe el comportamiento del sistema real, es necesario verificar su validez por medio de diferentes mecanismos, de los cuales los más importantes son: confrontación del modelo con nuevos datos experimentales, confrontación del modelo con técnicas de simulación, análisis de estabilidad, entre otros.

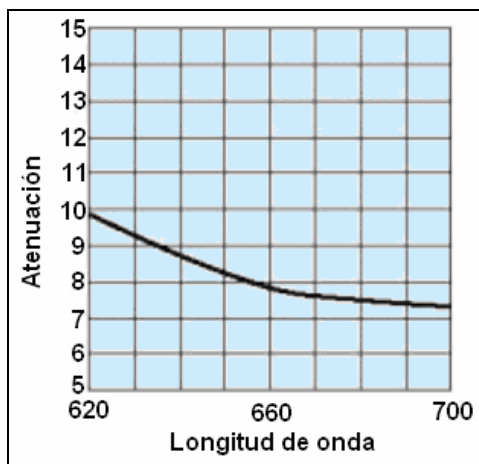
2. DISEÑO FÍSICO Y HARDWARE

2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVOS

Después de estudiar los diferentes tipos de fibra existentes y de analizar la factibilidad de implementar un acople con una lente, se decidió trabajar con fibra óptica plástica *POF*, porque su *diámetro de núcleo* puede alcanzar hasta un milímetro lo que facilita la labor de construcción de dispositivos. Sin embargo, la razón más importante, es que mientras las fibras de sílice monomodo y multimodo tienen puntos de operación en la banda infrarroja (1300 nm o 1550 nm, principalmente), la fibra óptica plástica está diseñada para operar con longitudes de onda que se encuentran en el rango del espectro visible y parte del infrarrojo.

La figura 2.1, muestra el espectro de atenuación de una fibra óptica plástica comercial. Comúnmente cubre un rango espectral de entre 400 a 950 nm, por lo que la fuente óptica puede ser un diodo emisor de luz (LED) y el detector óptico, un fotodetector de silicio. En la figura se puede apreciar también, que el punto de operación se encuentra en el valor de longitud de onda donde las pérdidas en la fibra son menores, en este caso a un valor de 660 nm.

Figura 2.1 Espectro de atenuación de una fibra óptica plástica comercial



Fuente. DUCHOWICZ, Ricardo. NORIEGA, Sergio. Intercomunicador por fibra óptica. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Argentina 2005

Las características de la fibra óptica seleccionada se resumen en la tabla 2.1

Durante el inicio de la ejecución del proyecto se observó que era muy conveniente diseñar y construir, tanto, el dispositivo lente fibra óptica, como el sistema de

referencia que contiene un sensor fotorresistivo LDR. De esta forma se trabaja simultáneamente en dos de los objetivos formulados en el proyecto, con una ventaja fundamental, que es la de finalmente contar con un receptor y un transmisor basados en fibra óptica.

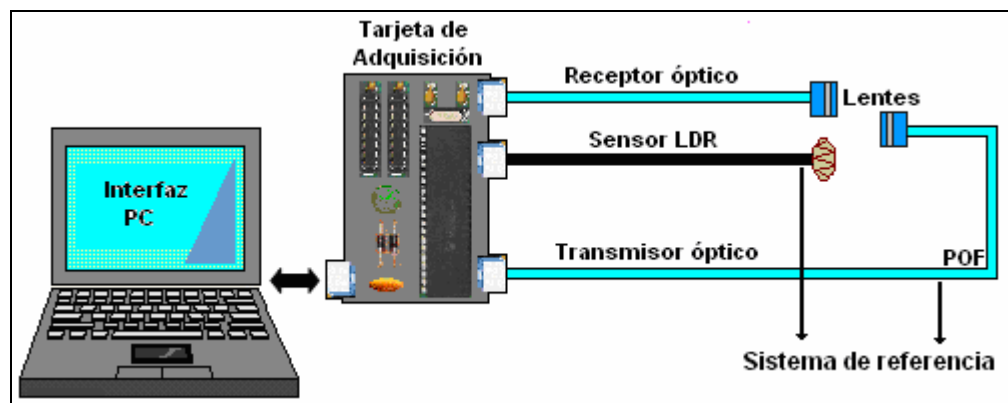
Tabla 2.1 Características de la fibra óptica plástica a utilizarse en el proyecto.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Tipo de fibra	Fibra óptica plástica desnuda
Material Núcleo	Polimetil Metacrilato
Material Revestimiento	Polímero Fluorado
Perfil Índice	Índice abrupto
Diámetro	1.0 mm
Atenuación (650 nm)	≤ 0.20 dB / m
Apertura Numérica	0.50
Radio Curvatura	> 20 mm
Rango Temperaturas	-40 °C - $+70$ °C

Fuente. <http://www.optral.es/ficheros/catalogo/pdf/ETW04004.pdf>

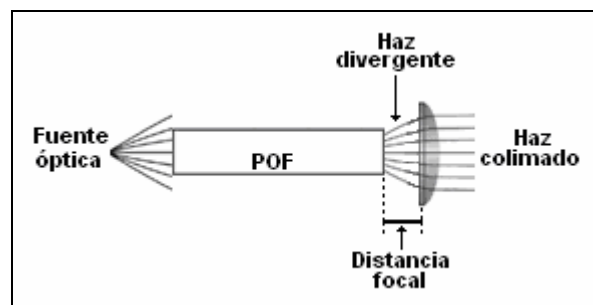
La figura 2.2, muestra el diagrama general del proyecto. Se puede apreciar que el sistema de referencia consta de un sensor LDR y un transmisor óptico. El receptor óptico se constituye en el elemento objeto de estudio de este proyecto. El transmisor óptico es la fuente de luz que se utilizará para evaluar la respuesta de los dos dispositivos sensoriales. Los tres elementos se conectan a la tarjeta de adquisición de datos como se muestra en la misma figura, y cada uno tiene una longitud de 2,75 metros.

Figura 2.2 Diagrama general de las principales partes del proyecto.



2.1.1 El transmisor óptico. Como se observa en la figura 2.3, consta de una fuente óptica, el tramo de fibra y una lente en el extremo donde la luz sale al medio externo. Como el cono de luz que sale de la fibra es un haz divergente, la lente *plano-convexa* utilizada cumple la función de colimar el rayo, dando lugar a un haz paralelo que se mantiene uniforme a lo largo de una distancia relativamente importante. La lente posee 7 mm de diámetro y una distancia focal de 9 mm, y garantiza aprovechar una mayor cantidad de luz que de lo contrario se perdería debido a la divergencia. Se encontró que aproximadamente hasta una distancia de 2 cm el haz de rayos paralelos se mantiene uniforme.

Figura 2.3 El transmisor óptico.



En la tabla 2.2, se enuncian las características de la fuente óptica utilizada

Tanto en el transmisor como en el receptor se emplearon conectores SMA para acoplar los elementos requeridos en los extremos de la fibra. Este conector posee un canaleta central en el que la fibra de un milímetro de diámetro calza con facilidad y permite la adición de epóxico que sella la fibra al conector. El sellado y limado de los extremos se realizó con los elementos y técnicas propias de construcción de empalmes de fibra óptica.

La construcción de los dispositivos en los que se alojan las lentes tienen las siguientes características:

- Estos se construyeron milímetro a milímetro mediante torno industrial, garantizando principalmente que los valores de sus distancias focales respecto a la fibra, se conserven.
- Se decidió utilizar un material metálico, en éste caso bronce, para garantizar una mayor resistencia y protección contra impactos; sin embargo, en mecánica industrial también se puede trabajar con materiales plásticos como el teflón.
- Los dispositivos constan de dos secciones, una de ellas es una cavidad que contiene la lente, la otra posee un roscado interno que permite la unión con los conectores SMA.

- Con las herramientas que poseen los talleres de mecánica industrial se puede trabajar tornillado, rosca y una diversa índole de empalmes mecánicos con buenos niveles de precisión. También es posible definir la presentación final del producto mediante técnicas de acabados.

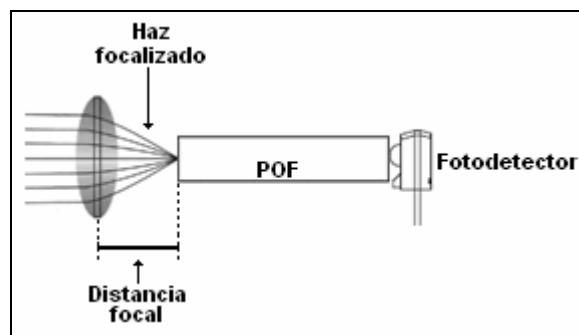
Tabla 2.2 Principales especificaciones de la fuente óptica.

FUENTE ÓPTICA	
Tipo	Diodo láser. Class IIIA
Potencia óptica máxima	5 mW
Longitud de onda	650 nm \pm 10
Potencia eléctrica máxima	72 mW a 4.0 V

Fuente. Rotulo del dispositivo


2.1.2 El receptor óptico. Es el módulo sensorial del cual se pretende evaluar su comportamiento como medidor de intensidad luminosa. Consta de una lente *biconvexa*, el tramo de fibra y un dispositivo fotodetector. Como se indica en la figura 2.4, la lente se encarga de focalizar los rayos luminosos provenientes de su entorno y/o del transmisor óptico. Lo anterior pretende canalizar los rayos externos a través de la fibra, y se pudo corroborar que en presencia de la lente, es mayor la cantidad de luz que llega al fotodetector. La lente posee un diámetro de 8 mm y una distancia focal de 1,5 mm.

Figura 2.4 El receptor óptico.



En la tabla 2.3, se describen las más importantes características del fotodetector seleccionado.

Tabla 2.3 Principales especificaciones del fotodetector a temperatura de 25⁰ C

FOTODETECTOR	
Tipo	Fototransistor de silicio Referencia PT480
Símbolo	
V _{CE}	5 V
I _C Máxima	20 mA
Irradiancia	(0.1 - 15) mW/cm ²
Rango espectral	(450 - 1100) nm
Punto de mayor sensibilidad	800 nm

Fuente. Sharp Technology. Narrow Acceptance Phototransistor. PT480/PT480F DataSheet.

2.1.3 El sensor LDR. Es un sensor que se consigue en cualquier almacén distribuidor de insumos electrónicos, no posee hoja de especificaciones y se acopla a la tarjeta de adquisición como se ilustra en la figura 2.2. La fotorresistencia tiene un diámetro de 0.5 cm, y experimentalmente se obtuvo una resistencia aproximada de 47 Megaohmios en oscuridad total y un valor de 83 ohmios en exposición directa a un bombillo de 110 voltios.

2.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Consta de las siguientes partes: un microcontrolador de gama alta PIC18F4550 como principal elemento de mando, el circuito disparador de la fuente óptica, y los circuitos receptores de señal del sensor LDR y del fototransistor.

2.2.1 El microcontrolador PIC18F4550. Es el eje central que gobierna en funcionamiento de la tarjeta de adquisición. Se encarga principalmente de realizar la conversión análogo digital de las señales provenientes de los dispositivos sensoriales y de establecer una comunicación con un computador que permite la transferencia bidireccional de datos. En la tabla 1.3 se nombraron sus más importantes módulos funcionales, de los cuales, cuatro se utilizan en este proyecto, ellos son: configuración del oscilador, periférico de comunicación USB, conversor análogo digital y temporizador TMR0.

El hecho de hacer uso del periférico USB como medio de comunicación, presenta la ventaja de poder alimentar la tarjeta de adquisición desde el bus USB del

computador, con un voltaje de 5 voltios y un suministro de corriente de hasta 500 miliamperios.

Configuración del oscilador. La selección de la fuente de reloj está muy relacionada con la utilización o no del periférico USB. El PIC18F4550 cuenta con tres diferentes fuentes de oscilación: el oscilador primario, el oscilador secundario y el módulo oscilador interno. Ellos se muestran resaltados en amarillo en la figura 2.5.

El oscilador primario. A este módulo se conectan resonadores de cristal o cerámicos. Posee una arquitectura complementaria que permite obtener diferentes frecuencias de oscilación dependiendo del valor del cristal que se conecta en los pines OSC1 y OSC2. Las frecuencias generadas se pueden destinar tanto para el módulo USB, como para la CPU y demás periféricos del microcontrolador. La señal de reloj para el periférico USB siempre se deriva de éste oscilador.

Como se ha mencionado el Bus serial universal USB 2.0 puede trabajar en tres velocidades, en baja velocidad (*Low speed*), en velocidad completa (*Full speed*) y en alta velocidad (*High speed*). El PIC18F4550 puede manejar velocidad baja y velocidad completa, para esto se requiere que el periférico USB, esté a una frecuencia de 6 MHz y 48 MHz, respectivamente.

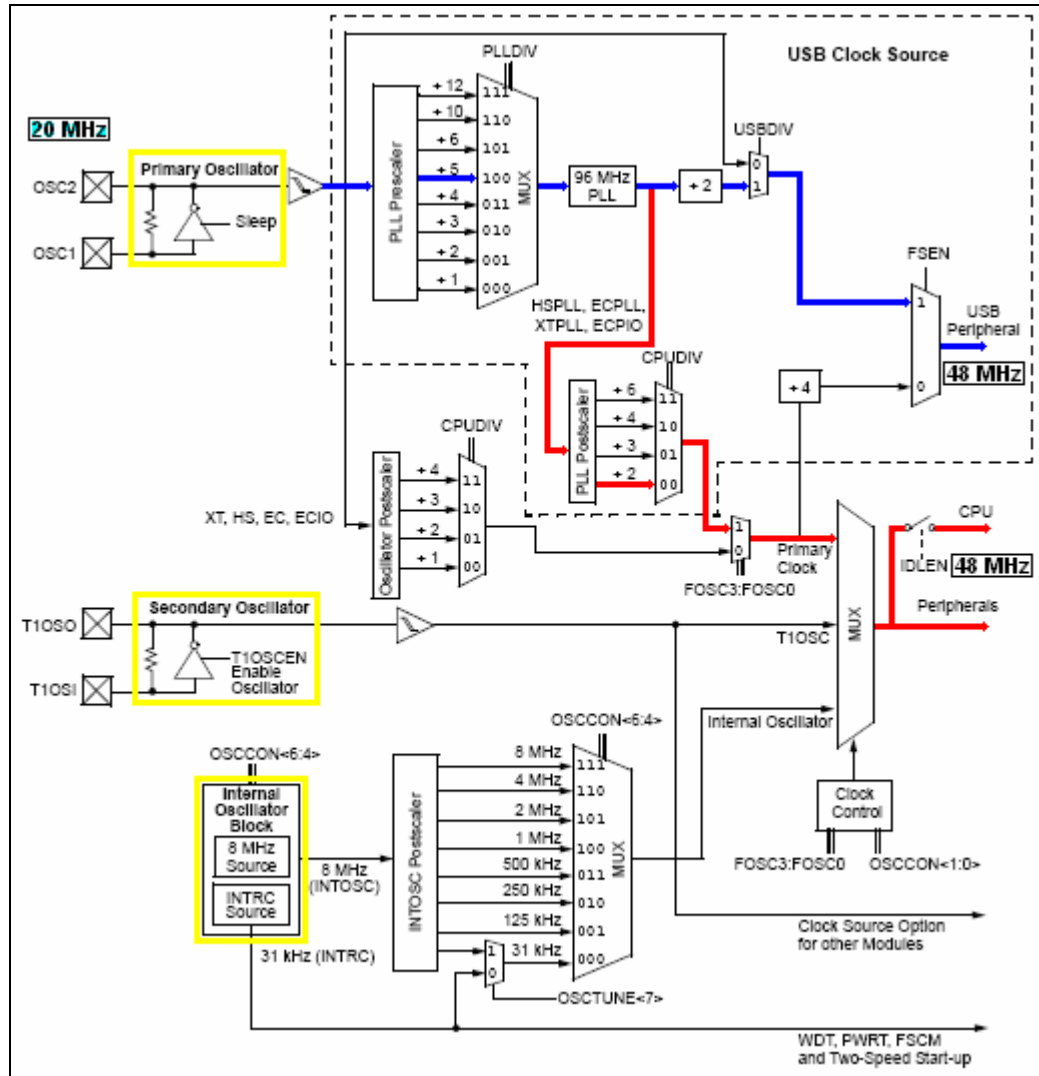
El oscilador secundario. Representado por las fuentes de reloj externas que se conectan a la entrada del módulo temporizador TMR1.

El módulo oscilador interno. El PIC18F4550 incorpora una fuente de oscilación interna que alcanza una frecuencia máxima de 8 MHz. Si el periférico USB no es utilizado, el oscilador interno puede eliminar la necesidad de los circuitos o fuentes externas de oscilación.

El microcontrolador se dispuso para funcionar a una frecuencia de 48 MHz en todos sus componentes. Esto implica que el periférico USB se configura en velocidad completa y por tanto la fuente de reloj es un cristal externo conectado al oscilador primario. El valor del cristal seleccionado es de 20 MHz y los capacitores anexos de 22 picofaradios.

La configuración general de operación del microcontrolador y de cada uno de los módulos, depende de una serie de registros especiales propios de su arquitectura y destinados para tal fin. Cuatro son los registros especiales que administran las fuentes de reloj del PIC18F4550, ellos son: OSCCON, OSCTUNE, CONFIG1L y CONFIG1H. El registro OSCTUNE controla una parte del módulo oscilador interno, por lo que no será tenido en cuenta.

Figura 2.5 Diagrama del módulo oscilador del PIC18F4550



Fuente: Microchip Technology Inc. PIC18F2455/2550/4455/4550 DataSheet.

El registro OSSCON²¹. Su arreglo de bits es:

$$\text{OSCCON} = [\text{IDLEN} \text{ IRCF2} \text{ IRCF1} \text{ IRCF0} \text{ OSTS} \text{ IOFS} \text{ SCS1} \text{ SCS0}]$$

Los bits más importantes de este registro son SCS1:SCS0, son los menos significativos y con ellos se selecciona la fuente de oscilación del microcontrolador. Para elegir el oscilador primario debe asignárseles un valor binario de '00'. Los bits restantes controlan o informan sobre el estado de otros procesos, pero no son trascendentes en esta aplicación. Así por ejemplo, el bit IDLEN determina si el

²¹Microchip Technology Inc. PIC18F2455/2550/4455/4550 DataSheet. Pág. 32.

microcontrolador entra en *Modo Idle o Modo Sleep* cuando la Instrucción SLEEP es ejecutada. En el modo Sleep todas las fuentes de reloj son deshabilitadas. La instrucción SLEEP es incompatible cuando el periférico USB está activo.

En adelante los bits de registros especiales que no se encuentren resaltados en negrita en su respectivo arreglo, es porque no son importantes en nuestra aplicación.

La arquitectura asociada al oscilador primario permite obtener una diversa gama de valores de frecuencia dependiendo del valor del cristal externo. Para ello utiliza una estructura denominada “*PLL Frequency Multiplier*”, que se encarga de obtener en primera instancia una frecuencia de 96 MHz. La frecuencia de 96 MHz es la que posteriormente se divide a otros valores, dependiendo de la configuración binaria asignada a los registros CONFIG1L y CONFIG1H.

El registro CONFIG1H²². Permite seleccionar entre 12 modos diferentes de oscilación, los que finalmente resultan del oscilador primario, secundario e interno. Teniendo en cuenta que se necesita obtener una frecuencia de 48 MHz a partir de un cristal de 20 MHz se seleccionó el modo de oscilación HSPLL. HS por ser un cristal superior a 4 MHz, PLL para poder obtener los 96 MHz. Las rayas presentes en el siguiente arreglo significan que esos bits no están físicamente implementados, pero pueden ser leídos como un ‘0’ binario.

CONFIG1H = [IESO FCMEN - - **FOSC3 FOSC2 FOSC1 FOSC0**]

Cuando a los bits FOSC3:FOSC0 se les asigna el valor binario ‘1110’ se estará seleccionando el modo de oscilación HSPLL.

El registro CONFIG1L²³. Su estructura de bits es:

CONFIG1L = [- - **USBDIV CPUDIV1 CPUDIV0 PLLDIV2 PLLDIV1 PLLDIV0**]

USBDIV en ‘1’ divide por 2 la frecuencia de 96 MHz para obtener los 48 MHz del periférico USB. Para ello el bit FSEN del registro de control UCFG también debe estar en ‘1’, lo que garantiza el funcionamiento del módulo USB en velocidad completa. Estos detalles se pueden observar si se sigue la trayectoria de la línea demarcada en azul de la figura 2.5. CPUDIV1:CPUDIV0 en ‘00’ obtiene los 48 MHz destinados para la CPU y demás periféricos del microcontrolador (Línea demarcada en rojo y modo de oscilación HSPLL de la figura 2.5). PLLDIV2:PLLDIV0 en ‘100’ obtiene los 96 MHz a partir de un cristal de 20 MHz.

²²ibid. Pág. 288.

²³ibid. Pág. 287.

Periférico de comunicación USB. El periférico de comunicación USB posee un total de 22 registros especiales de estado y de control. Dieciséis de ellos son registros de habilitación y control de igual número de Endpoints disponibles en el módulo²⁴.

El microcontrolador se desempeñará como un dispositivo CDC “*Communication Device Class*”. Este estilo de comunicación requiere configurar varios parámetros de funcionamiento del periférico, pero el intercambio de información, no utiliza toda la plataforma del protocolo de transmisión USB. La comunicación CDC implementa los denominados *COMs Virtuales*, los cuales emulan una transmisión serial asíncrona a través del bus USB. Es por ello, que aunque el periférico se configure en velocidad completa, la velocidad de transmisión efectiva se define por las normas del protocolo RS232, en el que las tasas de transferencia de datos se miden en *Baudios*. En estas condiciones, el módulo USB del PIC18F4550 se configura como se describe a continuación.

La conexión USB del dispositivo se puede hacer a través de componentes internos o externos al microcontrolador. Esos componentes fundamentalmente son: el transceiver de transmisión de datos, la fuente de alimentación V_{USB} de 3.3 voltios y las resistencias anexas de conexión. La disposición de estos elementos se puede observar en la figura 2.6.

Al utilizar los componentes internos se usufructúan aún más las funcionalidades del microcontrolador, y a la vez se consigue un ahorro importante de elementos Hardware externos.

Los registros CONFIG2L y UCFG permiten seleccionar los elementos a utilizarse.

El registro CONFIG2L²⁵. Su estructura de bits es:

CONFIG2L = [- - **VREGEN** BORV1 BORV0 BOREN1 BOREN0 PWRTEN']

Cuando VREGEN = ‘1’ se habilita el regulador interno que proporciona el V_{USB} de 3.3 Voltios. El voltaje V_{USB} conectado a través de una resistencia a la línea D- o D+ del bus, determina si el periférico trabajara en velocidad baja o en velocidad completa. También hay que tener en cuenta que las resistencias pull-up internas se podrán utilizar siempre y cuando el regulador interno esté activo.

El registro UCFG (USB configuration register)²⁶. Es uno de los 22 registros ya mencionados, y como su nombre lo indica, es quizá el registro más importante de configuración del periférico USB. Su arreglo de bits es el siguiente:

²⁴Ibid. Pág. 164.

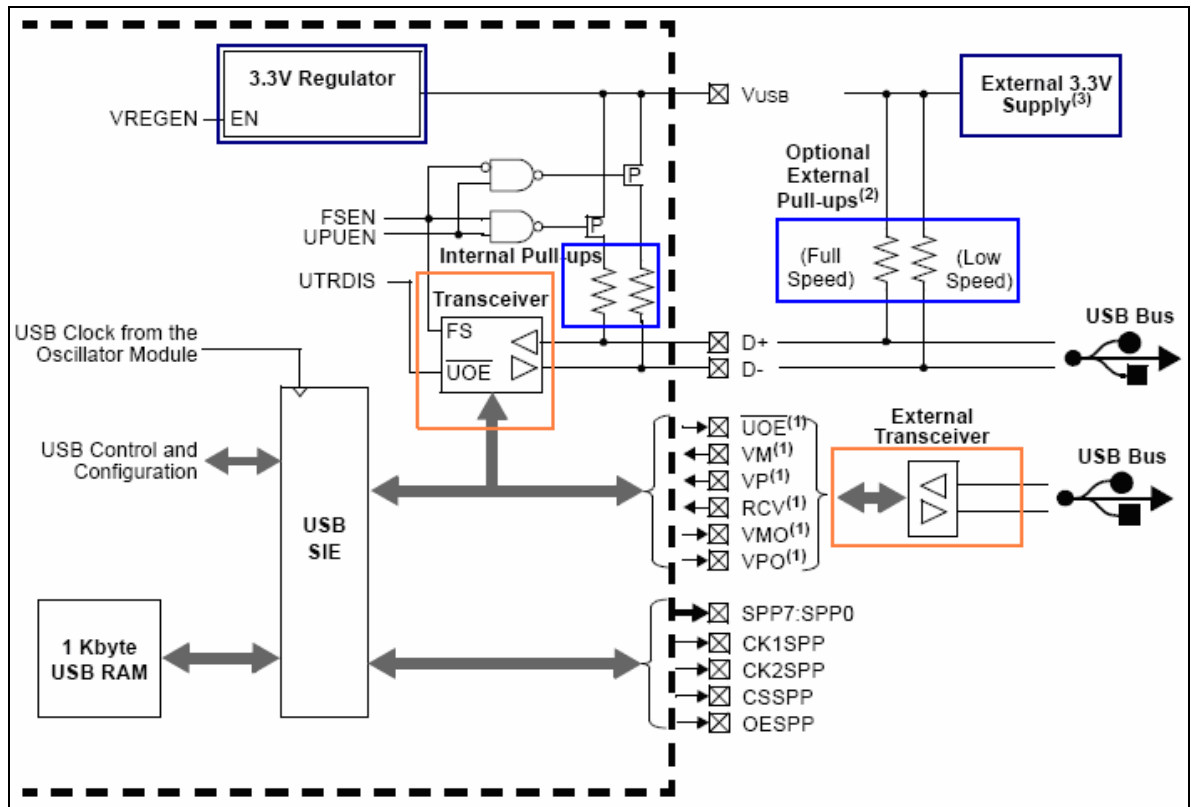
²⁵Ibid. Pág. 289.

²⁶Ibid. Pág. 166.

UCFG = [UTEYE UOEMON - UPUEN UTRDIS FSEN PPB1 PPB0]

FSEN en '1' configura el periférico USB en velocidad completa lo que requiere una frecuencia de oscilación de 48 MHz. UTRDIS en '0' selecciona el transceiver interno del microcontrolador. UPUEN en '1' habilita una de las resistencias pull-up internas; como FSEN = '1', la resistencia pull-up activada es la que se conecta a la línea D+.

Figura 2.6 Opciones de conexión del periférico USB del PIC18F4550



Fuente. Microchip Technology Inc. PIC18F2455/2550/4455/4550 DataSheet.

La elección de la velocidad, el transceiver y las resistencias pull-up se deben configurar en el momento de activación del periférico USB. No es recomendable hacer estos ajustes mientras el módulo esté en funcionamiento.

Otro registro importante es el registro de control UCON. Este contiene los bits generales de control del periférico y los bits necesarios para administrar el comportamiento del módulo durante las transferencias.

El registro UCON (USB Control register)²⁷. Su estructura de bits es:

UCON = [- PPBRST SEO **PKTDIS USBEN** RESUME **SUSPND** -]

SUSPND en '1' permite suspender el periférico USB, bajo esta condición la fuente de reloj y todos los circuitos de soporte del periférico se inhabilitan y entran en modo de ahorro de energía. En este proyecto el módulo USB nunca se llevará al estado suspendido, por tanto: SUSPND = '0'. Una vez que se ha configurado la velocidad, el transceiver y la fuente de alimentación V_{USB} es necesario que: USBEN = '1' para que la totalidad del periférico quede habilitado. El bit PKTDIS es una bandera que indica que la unidad USB-SIE (figura 2.6) ha permitido la transmisión o recepción de datos.

Cada uno de los 16 posibles Endpoints con los que cuenta el periférico USB tiene un registro de configuración independiente. Estos registros se denominan UEPn, todos tienen los mismos bits de control y la letra 'n' representa el correspondiente número de Endpoint. La aplicación ha implementarse requiere habilitar 2 puntos finales: el UEP0 que siempre se utiliza como elemento de control y el UEP1 que se encarga de las transferencias de datos.

Registros de habilitación UEPn²⁸. Su arreglo de bits es:

UEPn = [- - - EPHSHK **EPCONDIS EPOUTEN EPINEN** EPSTALL]

EPINEN = '1' habilita el Endpoint 'n' como entrada. EPOUTEN= '1' habilita el Endpoint 'n' como salida. EPCONDIS en '1' permite las transacciones de entrada y salida de datos, siempre y cuando los bits EPINEN y EPOUTEN estén activos. Para el caso del UEP0, EPCONDIS debe siempre estar en '0' para garantizar las transferencias de control.

Convertor análogo digital. El módulo convertor análogo digital (A/D) del PIC18F4550 tiene una resolución de 10 bits y cuenta con hasta 13 canales que eventualmente permitirán monitorear igual número de señales analógicas. El módulo posee cinco registros especiales de configuración: ADRESH, ADRESL, ADCON0, ADCON1 y ADCON2. Los dos primeros se encargan de almacenar el resultado de la conversión A/D.

El registro ADCON0²⁹. Tiene el siguiente arreglo de bits:

ADCON0 = [- - **CHS3 CHS2 CHS1 CHS0** GO/DONE' **ADON**]

²⁷ibid. Pág. 164.

²⁸ibid. Pág. 169.

²⁹ibid. Pág. 259.

ADON en '1' activa el conversor A/D. Si el conversor A/D está habilitado, el bit GO/DONE' en '1' inicia el proceso de conversión, en '0' informa que dicha conversión ha finalizado. Los bits CHS3:CHS0 seleccionan uno de los 13 canales que se hayan configurado como entradas analógicas.

El registro ADCON1³⁰. Su estructura de bits es:

ADCON1 = [- - **VCFG1 VCFG0 PCFG3 PCFG2 PCFG1 PCFG0**]

Los bits PCFG3:PCFG0 establecen cuales de los 13 canales se configuran como entradas analógicas y cuales como canales digitales. En este proyecto se habilitan las primeras 5 entradas analógicas (AN0 a AN4) que se encuentran disponibles en el puerto A, por tanto: PCFG3:PCFG0 = '1010'. En las entradas AN2 y AN3 se conectan respectivamente los voltajes de referencia Vref- y Vref+ que utilizará el conversor. Si VCFG1:VCFG0 = '00' el voltaje de referencia para el conversor A/D será la propia alimentación del microcontrolador, lo que libera los canales AN2 y AN3 como entradas analógicas utilizables.

Vref- y Vref+ establecen los límites mínimo y máximo de la tensión analógica que se puede convertir: $V_{ref} = (V_{ref+}) - (V_{ref-})$. El mínimo valor que puede tener Vref es 2 voltios.

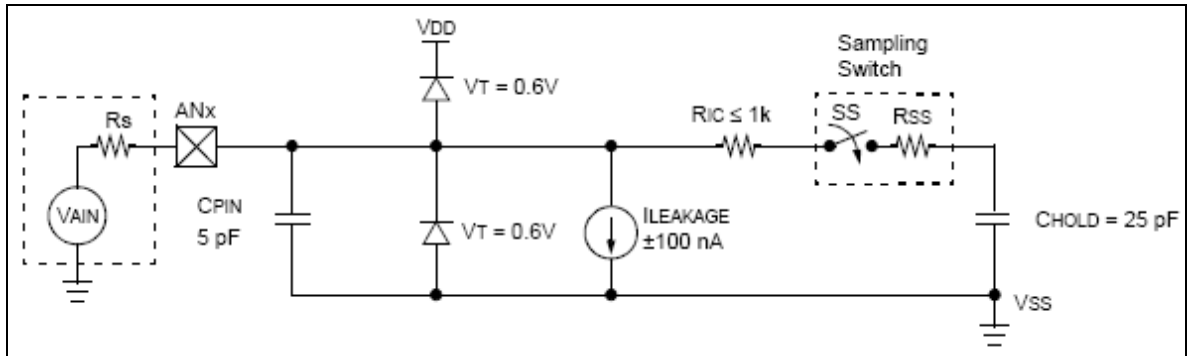
Una conversión A/D requiere un *tiempo de muestreo* que se divide en dos partes: el *periodo de conversión* y el *periodo de adquisición*. El *periodo de conversión* arranca cuando el bit GO/DONE' del registro ADCON0 se pone en '1', en ese instante el condensador C_{HOLD} del modelo de entrada analógica de la figura 2.7 se desconecta. Si el bit GO/DONE' cambia a '0' es porque la conversión ha finalizado, el condensador se vuelve a conectar e inicia a cargar nuevamente.

El tiempo de carga del capacitor corresponde al *periodo de adquisición* de señal analógica y su valor es de 2.45 microsegundos. Esto significa que entre una conversión y otra, hay que esperar como mínimo ese intervalo de tiempo. El periodo de adquisición se puede programar para valores más grandes que 2.45 microsegundos a través del registro ADCON2.

El circuito de la figura 2.7, es en definitiva una combinación de resistencias y el condensador C_{HOLD}. Esto hace, que tanto la impedancia del circuito, como la impedancia de la señal de voltaje que se conecte al canal, afecten directamente el tiempo de carga del condensador C_{HOLD}. Por esta razón, para no alterar las condiciones de funcionamiento del conversor, las especificaciones del microcontrolador recomiendan que la máxima impedancia de la señal analógica conectada al canal no supere los 2,5kΩ.

³⁰ibid. Pág. 260.

Figura 2.7 Modelo de entrada analógica del PIC18F4550.



Fuente. Microchip Technology Inc. PIC18F2455/2550/4455/4550 DataSheet.

Otra característica importante del módulo convertor es que su fuente de reloj es seleccionable por medio del registro ADCON2. Las distintas posibilidades de elección se resumen en la tabla 2.4

Existen siete formas de configurar el oscilador del convertor A/D. Como se aprecia en la tabla 2.4, seis de ellas se derivan directamente de la frecuencia de oscilación del microcontrolador (2, 4, 8, 16, 32 o 64 TOSC), la séptima opción es el oscilador RC interno propio del convertor A/D que funciona a una frecuencia de 1MHz.

Tabla 2.4 T_{AD} y frecuencias de operación del convertor A/D.

FUENTE DEL RELOJ A/D (T_{AD})		FRECUENCIA MÁXIMA DISPOSITIVO
OPCIÓN	ADCON2 ADCS2:ADCS0	PIC18FXXXX
2 TOSC	000	2.86MHz
4 TOSC	100	5.71 MHz
8 TOSC	001	11.43 MHz
16 TOSC	101	22.86 MHz
32 TOSC	010	45.71 MHz
64 TOSC	110	48.0 MHz
RC	x11	1.00 MHz

Fuente. Microchip Technology Inc. PIC18F2455/2550/4455/4550 DataSheet.

El parámetro T_{AD} define el tiempo de conversión por bit y se calcula con base en los datos proporcionados en la tabla 2.4. Para el caso 64 TOSC a 48.0 MHz el valor del T_{AD} es de 1.3 microsegundos.

El registro ADCON2³¹. Configura el oscilador para el convertor A/D, controla el tiempo de adquisición y el formato del resultado de la conversión. Su arreglo de bits es:

ADCON2 = [ADFM - - ACQT2 ACQT1 ACQT0 ADCS2 ADCS1 ADCS0]

ADCS2:ADCS0 en '110' asignan al convertor la forma de oscilación 64 TOSC. El periodo de adquisición se puede programar con los bits ACQT2:ACQT0 que proporcionan una gama de intervalos de (2 a 20) T_{AD} . Si ACQT2:ACQT0 = '000' no se selecciona ninguno de los intervalos, y en el programa desarrollado por el usuario se debe asegurar que ha pasado el tiempo requerido de carga del capacitor C_{HOLD} , antes de dar paso a una nueva conversión. Si ADFM = '1' los 10 bits del resultado de la conversión se guardan en los registros ADRESH:ADRESL en formato justificado a la derecha, esto quiere decir que los dos bits más significativos se almacenan en el registro ADRESH.

Temporizador TMR0. El módulo TMR0 del PIC18F4550 puede funcionar bien como temporizador o bien como contador. Aquí se utilizará el modo temporizador como herramienta que permite definir una frecuencia de muestreo; para tal fin, es necesario manejar los siguientes registros especiales: TMR0H, TMR0L, T0CON e INTCON.

Los registros TMR0H y TMR0L permiten utilizar el módulo ya sea en 8 o 16 bits, y dependiendo de los valores binarios que se les asigne, más grandes o más pequeños serán el rango de conteo o el intervalo de temporización asignados.

El "*Prescaler*" del módulo TMR0 es una unidad que divide la frecuencia de oscilación del microcontrolador, permitiendo ampliar los rangos de conteo o temporización del módulo.

La secuencia de funcionamiento del módulo es la siguiente:

- Asignar los valores binarios a los registros TMR0H:TMR0L
- Asignar o no el Prescaler
- Los registros TMR0H:TMR0L comienzan a incrementarse a partir del valor binario asignado teniendo en cuenta el valor del Prescaler. Cuando estos registros se desbordan; es decir, cuando pasan de FFh a 00h en modo de 8 bits, o de FFFFh a 0000h en modo de 16 bits, es porque ya se ha alcanzado el valor de temporización o conteo establecido.

El registro T0CON³². Controla todos los aspectos de operación del módulo incluyendo la selección del "*Prescaler*". Su arreglo de bits es:

³¹Ibid. Pág. 261.

³²Ibid. 125.

T0CON = [TMR0ON T08BIT T0CS T0SE PSA T0PS2 T0PS1 T0PS0]

Si T0PS2:T0PS0 = '111' el módulo utiliza un Prescaler de la forma 1:256. PSA en '0' habilita el uso del Prescaler. T0CS en '0' configura el TMR0 en modo temporizador. Si T08BIT = '0' el TMR0 es de 16 bits. TMR0ON en '1' habilita la utilización del módulo.

El registro INTCON³³. Se encarga primordialmente del control de interrupciones; aunque en este proyecto no se utiliza ningún tipo de interrupción, este registro es importante ya que cuando el bit TMR0IF = '1', es porque se ha producido el desbordamiento del TMR0. Para que el TMR0 pueda ser utilizado nuevamente, la bandera TMR0IF se debe borrar por software tras cada desborde.

En la figura 2.8, se muestra el conexionado definitivo del PIC18F4550, se puede apreciar que el conector USB proveniente del computador proporciona la alimentación para el PIC y en general para toda la tarjeta de adquisición. Se aprecia también que el hardware anexo al puerto USB es mínimo debido a la utilización de los componentes internos del microcontrolador, el voltaje V_{USB} es visible en el pin 18 a través del capacitor de 47 μ F.

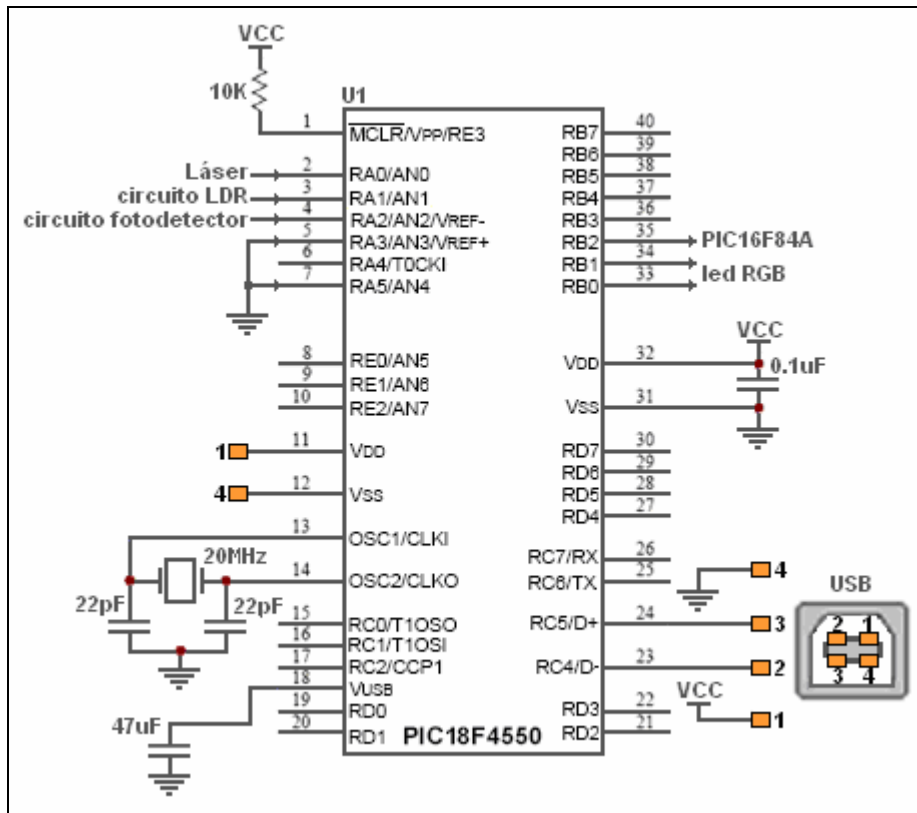
La figura 2.8, muestra también el oscilador externo de 20MHz y las 5 entradas analógicas habilitadas en el puerto A. La entrada AN0 captura la señal del voltaje proporcionado a la fuente óptica, los canales AN1 y AN2 se conectan a la salida de los circuitos receptores de señal del sensor LDR y el receptor óptico, respectivamente, AN3 y AN4 no se utilizan y se conectan a tierra.

Tres salidas digitales son necesarias y se obtienen del puerto B. RB0 y RB1 se destinan para manejar un led RGB. El color verde del led, indica que la tarjeta se ha conectado al puerto USB y está lista para iniciar la transferencia de datos, el led conmuta a color azul cada vez que el microcontrolador envía datos al computador. El pin RB3 controla el accionar del PIC16F84A, el que hace parte del circuito disparador láser.

La configuración de los puertos y sus respectivos pines, ya sea como entradas o salidas digitales, se hace a través de los registros TRISA, TRISB, etc. Si por ejemplo, TRISB = '11110000', entonces los 4 bits más significativos del puerto B se comportan como entradas digitales y los 4 bits menos significativos son salidas del mismo tipo. Cuando un pin va a desempeñar una función diferente, puede que sea necesario configurar otros registros, igual como se vio para el caso del conversor análogo digital.

³³ibid. Pág. 99.

Figura 2.8 Conexión del PIC18F4550

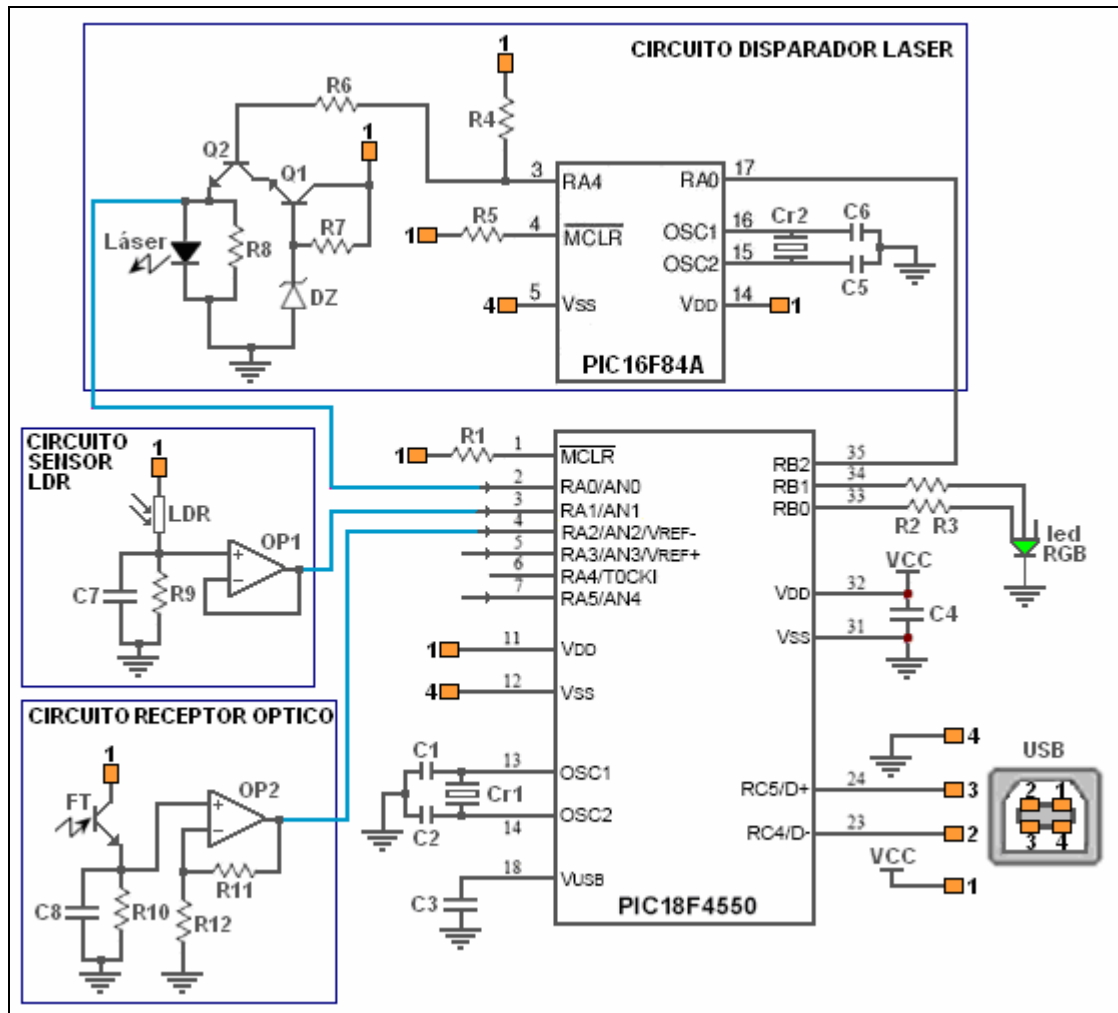


2.2.2. El circuito disparador de la fuente óptica. La figura 2.9, muestra el circuito total de la tarjeta electrónica externa. En el recuadro superior se esquematiza el circuito disparador láser, que consta esencialmente del microcontrolador de gama baja PIC16F84A y un circuito regulador de voltaje tipo serie.

El microcontrolador PIC16F84A. Soporta un oscilador de hasta 20 Mhz conectado a los pines OSC1 y OSC2, posee memoria de programa de 1024 bytes, 64 bytes de memoria de datos RAM y 64 bytes de memoria de datos EEPROM. El microcontrolador cuenta con los puertos A y B los cuales tienen 5 y 8 pines, respectivamente, éstos se pueden configurar como entradas o salidas digitales. Sus principales módulos funcionales están relacionados con el control de interrupciones, el control de los puertos A y B y el control del módulo TMR0 de 8 bits. El PIC16F84A posee un total de 15 registros especiales los cuales determinan su modo de operación³⁴.

³⁴Microchip Technology Inc. PIC16F84A DataSheet. Pág. 1.

Figura 2.9 Diagrama general de la tarjeta electrónica externa



La forma como el PIC16F84A hace parte del circuito disparador se observa en la figura 2.9, y se utiliza de la siguiente manera:

- Circuito oscilador con cristal: Cr2 = 4 Mhz y capacitores: C5, C6 = 22 pF.
- Reset del chip conectado a VCC a través de la resistencia R5 de 10 KΩ.
- El pin RA0 se configura como entrada y el pin RA4 como salida por medio del registro TRISA. RA4 se conecta a VCC a través de la resistencia R4 de 1 KΩ, ya que es una salida tipo colector abierto. La conmutación del pin RA4 es lo que finalmente determina el estado encendido o apagado del láser.

Circuito regulador de voltaje tipo serie. Los circuitos reguladores cumplen la función de proporcionar un voltaje DC constante a una determinada carga, aunque el voltaje de entrada varíe.

La disposición del diodo zener DZ, el transistor Q1 y la resistencia R7 de la figura 2.9, se conoce como *circuito regulador en serie simple* y su forma de operación es³⁵:

- El transistor Q1 es el elemento de control en serie y el diodo zener DZ proporciona el voltaje de referencia.
- El voltaje de salida se encuentra en el emisor de Q1, y es el punto en donde se conecta la carga.
- Si disminuye el voltaje de salida, aumenta el voltaje base emisor haciendo que el transistor Q1 conduzca más, elevando así el voltaje de salida y manteniendo la salida constante.
- Si se incrementa el voltaje de salida, disminuye el voltaje base emisor, haciendo que Q1 conduzca menos, reduciendo, por tanto, el voltaje de salida y manteniendo la salida constante.

Es fácil deducir, que lo que se pretende con este circuito, es proporcionar un nivel de voltaje constante, para garantizar que la intensidad luminosa producida por el láser sea lo más estable posible.

El diodo zener es un 1N749A, su voltaje de operación V_z se encuentra a 4.3 voltios, dentro de un intervalo que puede variar entre (4.09 - 4.52) V, su potencia de disipación es de 500 mW³⁶. El transistor Q1 es un PN2222A, posee una potencia de disipación de 625 mW y soporta tensiones de hasta 40 V entre colector y emisor³⁷. El voltaje zener de 4.3 V se obtiene con la resistencia R7 de 100 Ω .

El transistor Q2 del circuito disparador también es de referencia PN2222A y como se observa en la figura 2.9, trabaja en corte o saturación dependiendo del estado del pin RA4 del PIC16F84A. Cuando el pin RA4 se encuentra en estado alto, Q2 acopla la carga al circuito regulador serie, encendiendo el diodo láser; si RA4 se encuentra en estado bajo, el transistor desacopla la carga del circuito regulador, y el láser se apaga.

2.2.3 Circuito del sensor LDR. En la figura 2.9, se observa que es un circuito divisor de voltaje entre el sensor fotorresistivo y la resistencia R9 de 1.7 K Ω . El capacitor C7 es de 0.33 μ F y se encarga de drenar a tierra buena parte del ruido producido por la variación analógica del sensor LDR. El paralelo entre C7 y R9 se conecta al amplificador operacional OP1 el que actúa como un seguidor de voltaje, la salida del operacional se conecta la canal AN1 del microcontrolador principal. OP1 es un amplificador operacional de referencia LM324, y su misión es asilar la

³⁵BOYLESTAD, Robert. NASHESKY, Louis. Electrónica: Teoría de circuitos. Prentice Hall. 6ª. Ed. Pág. 814.

³⁶Fairchild Semiconductor. Zeners. 1N4370A - 1N4372A / 1N746A - 1N759A. DataSheet. Pág. 1

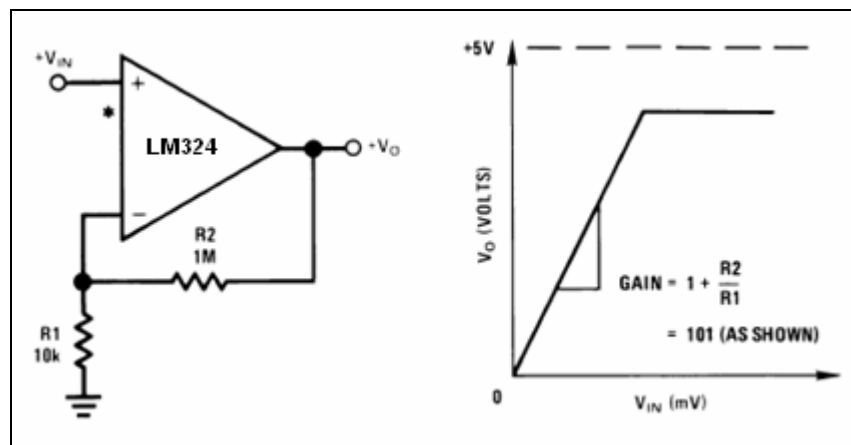
³⁷Fairchild Semiconductor. PN2222A / MMBT2222A / PZT2222A. DataSheet. Pág. 1

etapa RC previa, con el fin de no alterar el modelo de entrada analógica del conversor análogo digital ya estudiado.

El Operacional LM324. Es importante porque como todo amplificador operacional es un adaptador de impedancia y la ganancia de amplificación se logra fácilmente con el uso de resistencias. Otra característica significativa, es que no necesariamente requiere de fuente de alimentación dual, y puede funcionar en circuitos con alimentación única de 5 voltios.

La figura 2.10, muestra el comportamiento como amplificador del chip LM324 con alimentación de 5 V. Se observa la relación que permite calcular la ganancia, la cual puede llegar a tener un valor máximo de 101. También, bajo estas condiciones, el operacional se satura, haciendo que la salida varíe linealmente, únicamente hasta un voltaje menor que el voltaje de alimentación.

Figura 2.10 LM324 como amplificador con fuente de alimentación de 5 voltios



Fuente. National Semiconductor. LM124/LM224/LM324/LM2902 DataSheet.

De los 4 operacionales disponibles en el encapsulado LM324 se utilizan dos, los restantes se conectan como seguidores de voltaje con la entrada no inversora a tierra, esto minimiza el consumo de corriente del dispositivo.

2.2.4 Circuito del receptor óptico. Como se muestra en la figura 2.9, el fototransistor PT480 se conecta en serie con la resistencia R10 de 2.4 KΩ. El capacitor C8 en paralelo con R10 es de 0.33 μF y su misión es igual a la descrita para el caso del sensor LDR. Debido a que la corriente generada por el fototransistor es pequeña, el segundo operacional del chip LM324, se utiliza ahora como amplificador del voltaje resultante en la resistencia R10. La amplificación se logra por medio del circuito de la figura 2.10. El valor de la ganancia y por ende el de las resistencias R11 y R12 de la figura 2.9, es un parámetro modificable en la

tarjeta de adquisición, y depende de la fase del proyecto que se vaya a ejecutar. El canal AN2 del PIC18F4550 recibe la señal analógica de éste circuito.

3. SOFTWARE Y RESULTADOS

El trabajo desarrollado se divide en tres partes principales, a las que hemos denominado fases, éstas son:

- Fase 1. Determinación de una frecuencia de muestreo.
- Fase 2. Caracterización de los dispositivos sensoriales.
- Fase 3. Prácticas con el transmisor y receptor óptico.

Las herramientas centrales de programación son:

- CCS C COMPILER versión 4.049 y MPLAB IDE versión 7.60, para las aplicaciones de microcontroladores.
- MATLAB versión 7.0, para las aplicaciones de computador.

En este apartado se describe en primera instancia el trabajo realizado con los microcontroladores. Seguidamente, para cada una de las fases, se detalla los algoritmos implementados y los resultados obtenidos, en cada caso se enuncian los principales factores de operación que determinan el desempeño del sistema.

Todas las aplicaciones se trabajaron buscando que el sistema sea lo más eficaz posible en la ejecución de las distintas fases del proyecto.

3.1 DESARROLLO DE APLICACIONES PARA MICROCONTROLADORES

Las aplicaciones ejecutadas por los microcontroladores se implementan a través del compilador CCS C COMPILER versión 4.049, que posee una estructura de programación basada en lenguaje C.

CCS C COMPILER puede trabajar con instrucciones en bajo o alto nivel. Las instrucciones de alto nivel dependen de una serie de funciones y librerías, que se encargan de configurar cada uno de los módulos con los que cuenta un microcontrolador. *En definitiva son estas instrucciones, las que asignan los respectivos valores binarios a los registros especiales de los que se habló en el capítulo anterior, y así establecen el modo de operación del PIC.*

El compilador traduce el código C de la aplicación desarrollada por el usuario a lenguaje de máquina para los microcontroladores PIC. Tras “compilar” una determinada aplicación, se obtiene el fichero hexadecimal (.hex), que finalmente se descarga al microcontrolador.

Un logro de este trabajo es haber conseguido utilizar el compilador CCS bajo el entorno de MPLAB IDE. MPLAB es un editor de programación destinado para los productos de la empresa *Microchip*; entre ellos, los microcontroladores PIC.

Importantes herramientas del entorno de MPLAB son: visualización de registros especiales, reloj de ejecución de programa, indicador de memoria utilizada, depurador, entre otros.

Al integrar los dos tipos de softwares se obtiene un instrumento de trabajo más versátil, que por un lado, permite trabajar en lenguaje de alto nivel a través del compilador CCS, y por otro, utilizar las herramientas del ambiente de MPLAB para el seguimiento, depuración y simulación de aplicaciones.

3.1.1 Aplicación para el PIC18F4550. El PIC18F4550 es el principal elemento de control de la tarjeta de adquisición de datos. Las librerías suministradas por el compilador CCS permiten utilizar el microcontrolador como un dispositivo CDC (*Communication Device Class*). Los dispositivos pertenecientes a esta categoría requieren Driver de instalación, y funcionan emulando una transmisión serial asíncrona a través del bus USB.

Una vez grabado el microcontrolador con el archivo (.hex) e implementado el conexionado de los elementos complementarios al PIC; durante la primera conexión del PIC con el computador se debe instalar el dispositivo, para ello se utiliza el Driver *mchpcdc.inf*, proporcionado por la empresa Microchip para los microcontroladores PIC18FXX5X y sistema operativo Windows XP.

El Driver es del tipo no genérico por lo que necesariamente contiene los identificadores *idVendor* e *idProduct* que definen respectivamente el número identificador de vendedor (VID) y el número identificador de producto (PID) establecidos por la misma empresa.

Los números VID/PID son números de 16 bits, el valor de VID es 04D8h e identifica al fabricante del hardware a conectar, en este caso a la empresa Microchip, PID tiene un valor de 000Ah e identifica al dispositivo, en este caso al PIC18F4550. El anexo A, muestra el contenido del Driver *mchpcdc.inf* en el que se ha resaltado los números VID/PID de identificación del dispositivo.

La librería *usb_desc_cdc.h* del compilador CCS contiene los descriptores para dispositivos USB, tal información es enviada al Host durante el proceso de instalación. La información contenida en la librería permite que el sistema operativo identifique el microcontrolador y además lo registre como un dispositivo CDC que utiliza un puerto COM Virtual.

Como se mencionó en el apartado 1.8.2, cuando el sistema operativo instala un nuevo dispositivo USB, compara los datos contenidos en el Driver con la

información que esta siendo suministrada por los descriptores del dispositivo. Es por eso que en la librería `usb_desc_cdc.h` se necesita modificar la información que tiene que ver con los números VID/PID y cambiarlos por los números propuestos por Microchip. La modificación de la librería en la sección: “Inicio descriptores dispositivo”, queda de la siguiente forma:

```
//-----
//start device descriptors
//-----
const char USB_DEVICE_DESC[USB_DESC_DEVICE_LEN] ={
//starts of with device configuration. only one possible
USB_DESC_DEVICE_LEN, //the length of this report ==0
0x01, //the constant DEVICE (DEVICE 0x01) ==1
0x10,0x01, //usb version in bcd ==2,3
0x02, //class code. 0x02=Communication Device Class ==4
0x00, //subclass code ==5
0x00, //protocol code ==6
USB_MAX_EP0_PACKET_LENGTH, //max packet size for endpoint 0. (SLOW SPEED
SPECIFIES 8) ==7

0xD8,0x04, //vendor id (0x04D8 is Microchip)
0x0A,0x00, //product id (0x000A is PIC18F4550)

0x00,0x01, //device release number ==12,13
0x01, //index of string description of manufacturer. therefore we point to string_1 array (see
below) ==14
0x02, //index of string descriptor of the product ==15
0x00, //index of string descriptor of serial number ==16
USB_NUM_CONFIGURATIONS //number of possible configurations ==17
};
//-----
```

Otra cambio importante en la misma librería, es el relacionado con los denominados descriptores de cadena, éstos son secuencias de caracteres modificables por el usuario y que permiten definir un nombre para el nuevo dispositivo USB.

Básicamente, un nuevo nombre se asigna cambiando los caracteres de la tabla: `USB_DESC_STRING_TYPE`. Son tres las cadenas que hacen parte de esta tabla: la cadena 0 es una cadena especial no modificable, la cadena 1 define un nombre para el usuario, la cadena 2 define un nombre para el dispositivo, en este caso: “COLIMADOR FIBRA OPTICA”. La modificación de la librería en la sección: “Inicio descriptores cadena”, queda de la siguiente forma:

```
//-----
//start string descriptors
//-----
char USB_STRING_DESC_OFFSET[]={0,4,12};

char const USB_STRING_DESC[]={
```



```

//string 0
    4, //length of string index
    USB_DESC_STRING_TYPE, //descriptor type 0x03 (STRING)
    0x09,0x04, //Microsoft Defined for US-English
//string 1
    8, //length of string index
    USB_DESC_STRING_TYPE, //descriptor type 0x03 (STRING)
    'P',0,
    'I',0,
    'C',0,
//string 2
    46, //length of string index
    USB_DESC_STRING_TYPE, //descriptor type 0x03 (STRING)
    'C',0,
    'O',0,
    'L',0,
    'I',0,
    'M',0,
    'A',0,
    'D',0,
    'O',0,
    'R',0,
    ',',0,
    'F',0,
    'I',0,
    'B',0,
    'R',0,
    'A',0,
    ',',0,
    'O',0,
    'P',0,
    'T',0,
    'I',0,
    'C',0,
    'A',0
};
//-----

```

El nombre asignado es observable durante la instalación de la tarjeta y en la descripción hardware del administrador de dispositivos. En el anexo B, se ilustra el proceso de instalación del nuevo dispositivo USB.

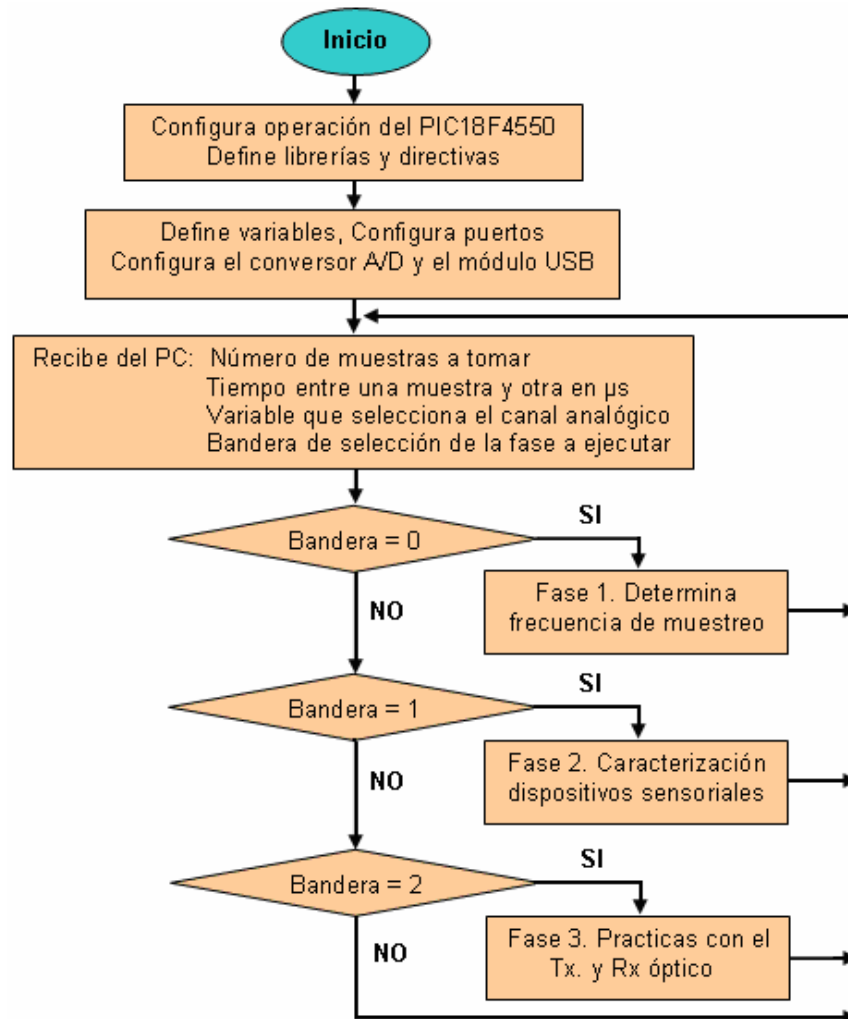
La aplicación implementada en el PIC18F4550 es fundamentalmente un ciclo repetitivo, en el que en primera instancia, el PIC espera una orden de inicio de proceso desde el computador. La orden es una serie de datos que contiene información de 4 parámetros de funcionamiento.

La secuencia de parámetros recibidos es: el número de muestras a tomar, el tiempo de espera entre una muestra y otra en microsegundos, el canal analógico a seleccionar y una variable de decisión que le dice al PIC la siguiente etapa algorítmica a ejecutar. La etapa seleccionada corresponde a una de las tres fases

en las que se ha dividido el proyecto. Si la fase en ejecución es la uno o la dos, el microcontrolador tiene en cuenta únicamente dos parámetros, el que decide la fase respectiva y el que selecciona el canal analógico. En la fase tres se utilizan los 4 parámetros.

La figura 3.1, muestra el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para el PIC18F4550.

Figura 3.1 Diagrama de flujo de la aplicación desarrollada para el PIC18F4550.



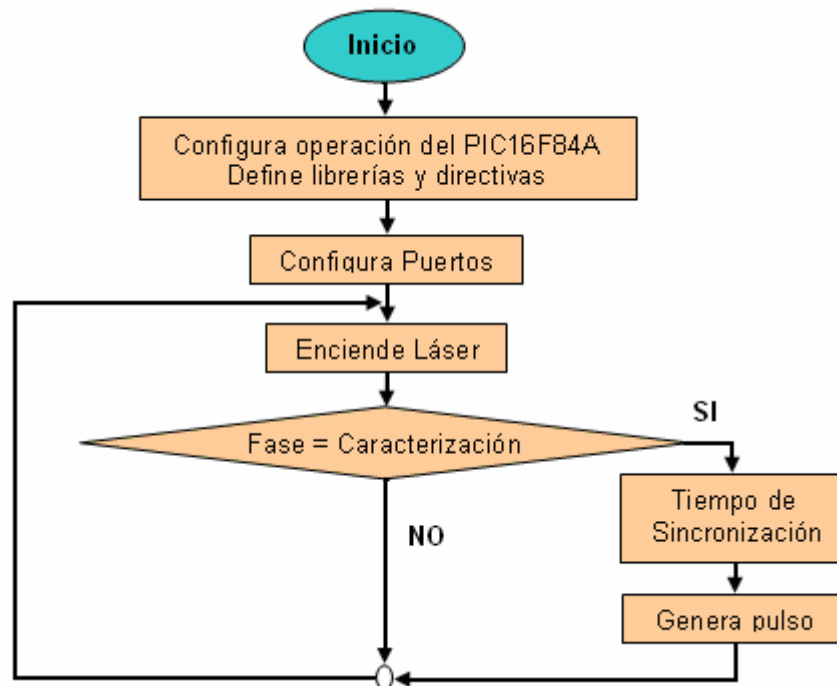
3.1.2 Aplicación para el PIC16F84A. El PIC16F84A hace parte del circuito disparador de la fuente óptica y su funcionamiento electrónico determina el control del diodo láser. El microcontrolador opera de la siguiente forma:

- Si la fase a ejecutarse no es la de caracterización, el PIC mantiene continuamente encendido el diodo láser.

- Si la fase a ejecutarse es la de caracterización, el PIC genera un pulso para el diodo láser, cuya representación eléctrica se convierte en los datos de entrada que permitirán obtener un modelo matemático aproximado del comportamiento del sensor LDR y del receptor óptico, ante dicha entrada.

La figura 3.2, muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado para el PIC16F84A.

Figura 3.2 Diagrama de flujo de la aplicación para el PIC16F84A



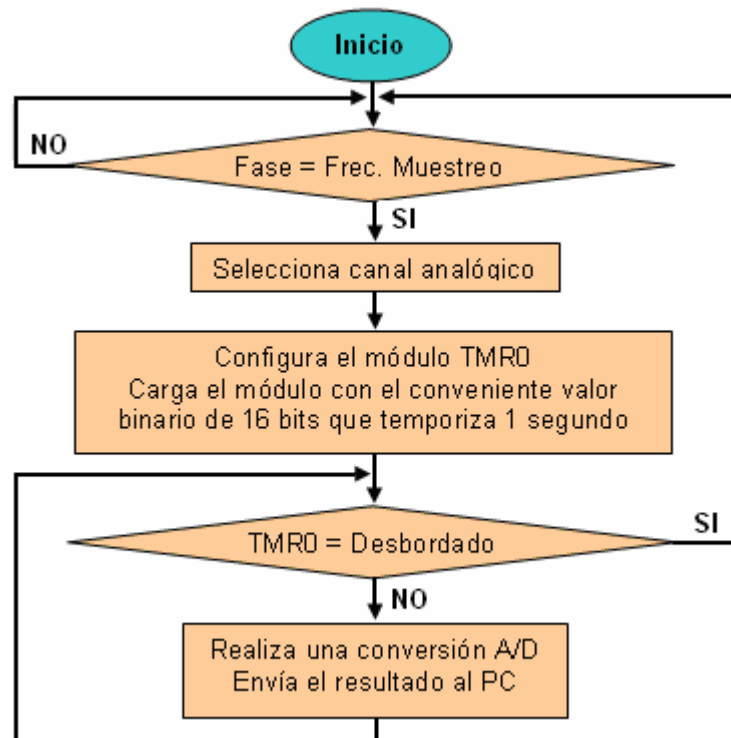
3.2 FASE 1. DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO.

Los datos obtenidos de los dispositivos sensoriales, son tratados y analizados en el computador, a través de herramientas como el filtrado digital de señales o los métodos de identificación de sistemas. Estas herramientas trabajan con datos que son la representación digital de la señal analógica, y la *frecuencia de muestreo* de dicha señal es un parámetro vital en su estructura.

El módulo TMR0 del PIC18F4550 es la base del procedimiento que determina la frecuencia de muestreo del sistema. El módulo se carga con un número binario de 16 bits y un prescaler de 1:256, de tal forma que se temporiza 1 segundo. Durante éste intervalo de tiempo, el PIC toma una muestra del canal analógico seleccionado y envía el dato al computador, el proceso se repite de forma

ininterrumpida hasta que el desbordamiento del TMR0 se produzca. El diagrama de flujo para esta parte del algoritmo del PIC18F4550 se muestra en la figura 3.3.

Figura 3.3 Diagrama de flujo del algoritmo del PIC18F4550 para la fase 1



3.2.1 Aplicación en Matlab para la fase 1. Los algoritmos se implementan en archivos M-File, estos archivos son editores de código que pueden contener funciones, variables de entrada, variables de salida y también a través de ellos se puede llamar a otras herramientas del entorno de Matlab.

Todas las aplicaciones desarrolladas en Matlab, que interactúan con la tarjeta de adquisición de datos, tienen la siguiente secuencia general de operación:

- Envían los datos esperados por el PIC18F4550 (Bytes de salida).
- Capturan los datos provenientes de la tarjeta de adquisición (Bytes de entrada).
- Procesan los datos.
- Visualizan resultados.

Características principales de la transferencia de datos son:

- La comunicación por medio de COM virtual implementa en el computador un buffer que contiene los bytes de salida y los bytes de entrada en un mismo vector de datos.
- El resultado de cada conversión análogo digital se envía al computador en 4 bytes.

Durante las primeras pruebas de transferencia de datos se observó que existían algunas ocasiones en que no todos los datos esperados llegaban, cuando el inconveniente se presentaba el sistema quedaba bloqueado y Matlab debía finalizarse a través del administrador de tareas de Windows. La dificultad se superó ostensiblemente optimizando los algoritmos en Matlab mediante herramientas de temporización y por escaneo continuo del buffer durante la adquisición de datos.

La figura 3.4, muestra el diagrama de flujo de la aplicación en Matlab para la fase de determinación de la frecuencia de muestreo. El algoritmo envía al PIC18F4550 los 4 parámetros de funcionamiento que éste requiere, en seguida captura los datos que el microcontrolador consiguió enviar antes del desbordamiento del TMR0, luego confirma si los datos obtenidos son reales y finalmente calcula el número de muestras por segundo obtenidas.

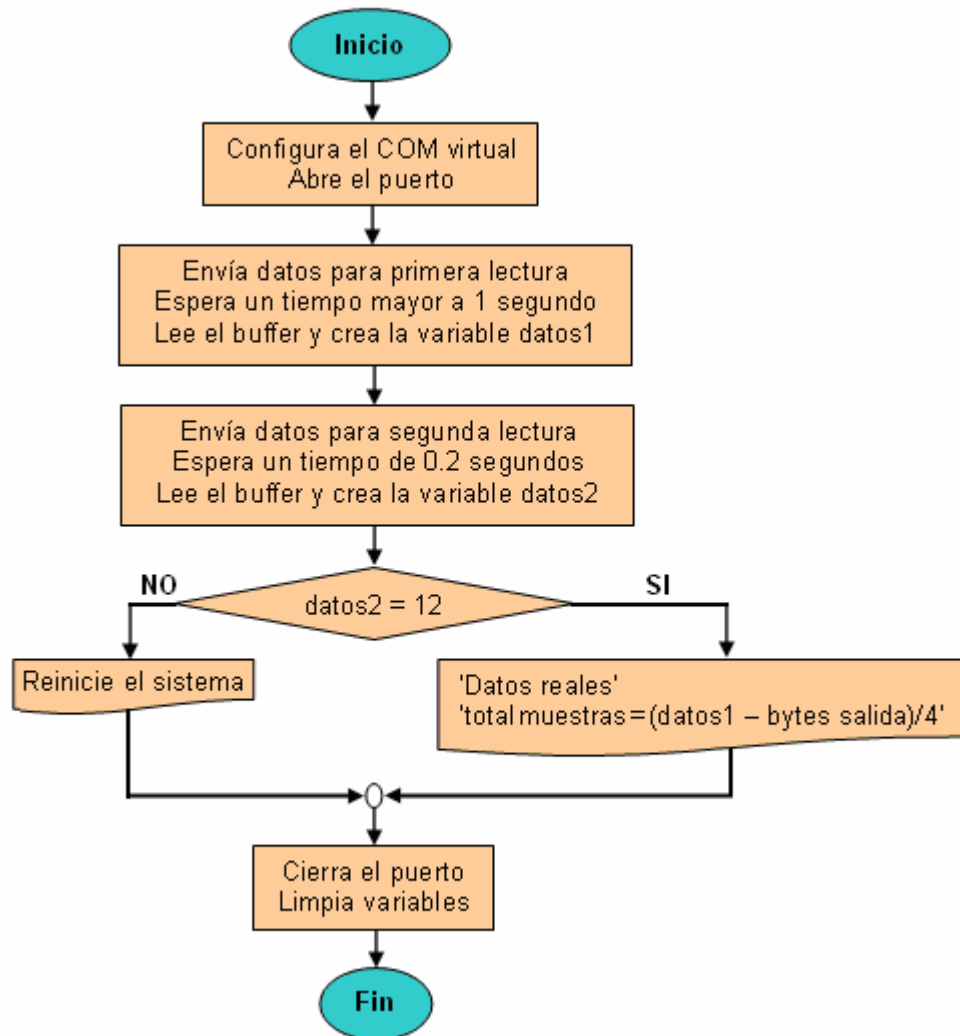
Esta primera aplicación no introduce la parte algorítmica que sortea la dificultad de datos incompletos en el buffer. Para determinar si los datos que resultan de la temporización con el módulo TMR0 son reales, se hace una segunda lectura donde se solicita al PIC18F4550 que envíe únicamente dos muestras, de esta forma el número de bytes de entrada es 8 y los bytes de salida se adecua para que sean 4, así, el número total de bytes presentes en el buffer será 12. Si el tamaño del buffer en la segunda lectura es precisamente 12, entonces, los datos de la primera lectura son reales y se procede a calcular el número de muestras. Si el tamaño es mayor que 12, es porque los datos de la primera lectura son incompletos, y entonces, la aplicación recomienda reiniciar el sistema.

La relación que permite obtener el número de muestras es:

$$total_muestras = \frac{(total\ bytes\ buffer) - (bytes\ de\ salida)}{4} \quad (3.1)$$

3.2.2 Resultados fase 1. Al ejecutar la fase 1 el sistema responde bien y continuamente confirma que los datos de la primera lectura son reales. Sin embargo, aunque se esperaba que el número de muestras siempre fuese el mismo, se encontró que este valor es cambiante, y gira alrededor de las 17000 muestras con un margen de error máximo de ± 15 , siendo más constante la variación superior que la variación inferior.

Figura 3.4 Diagrama de flujo de la aplicación en Matlab para la fase 1



En vista de que 15 muestras de un total de 17000 no es un valor demasiado significativo, se decidió asumir, que bajo las condiciones de funcionamiento en que se encuentra, la frecuencia de muestreo para el PIC18F4550 es de:

$$\begin{aligned}
 \text{Frecuencia (PIC18F4550)} &= 17000 \text{ muestras/segundo} \\
 \text{Frecuencia (PIC18F4550)} &= 17000 \text{ Hertz}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Con un porcentaje de error del 0.088%

El valor de 17000 Hertz es el que se utilizará en las restantes fases del proyecto y la obtención de las muestras ya no hará uso del módulo TMR0.

3.3 FASE 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS SENSORIALES

La fase de caracterización del sensor LDR y del receptor óptico pretende evaluar el tipo de respuesta que cada dispositivo produce, cuando es excitado por una fuente de luz controlada. El proceso radica básicamente en:

- Mirar cada caso como un sistema que integra el sensor y su circuito receptor de señal.
- Obtener los datos de la señal de entrada y de la respuesta producida por cada sistema.
- Estimar una función de transferencia para cada caso utilizando el método paramétrico ARX de identificación de sistemas.
- Validar el modelo obtenido, mediante el estudio de las características de la función de transferencia estimada y técnicas de simulación.

Lo anterior permitirá hacer un análisis comparativo de los dos sensores para determinar las ventajas o desventajas que pueda presentar el receptor óptico con respecto al sensor fotorresistivo. El proceso es vital porque es un paso importante para establecer la viabilidad de utilizar la configuración receptor óptico como medidor de cambios de intensidad luminosa.

La forma como se asumen los sistemas se muestra en la figura 3.5, en ella se observa que la señal de entrada a cada sistema es la misma y consiste en un pulso de luz producido a través del transmisor óptico. Las señales de salida se obtienen de los respectivos circuitos acondicionadores de señal. Los valores de las resistencias R11 y R12 de la misma figura para esta fase son de 1.2k y 330 Ω , respectivamente.

En este proyecto las señales de entrada y salida que se toman para el proceso de caracterización son de tipo eléctrico; por tal razón, la señal de entrada a muestrear es el pulso eléctrico responsable de su equivalente lumínico, que como se mira en la figura 2.9, se obtiene directamente del voltaje que recae sobre la fuente óptica, a través del canal analógico AN0.

3.3.1 Funcionamiento de la tarjeta electrónica externa durante la fase 2. La operación de los microcontroladores en esta fase se ilustra por el diagrama de tiempo de la figura 3.6. La secuencia es:

- El PIC18F4550 genera un pulso de 6 microsegundos a través del pin RB2.
- El pulso es detectado por el PIC16F84A que apaga el láser llevando a estado bajo el pin RA4.
- Los dos microcontroladores esperan un tiempo t_1 de sincronización de 550 milisegundos.

- Terminado el tiempo t_1 , durante el siguiente segundo: El PIC16F84A genera el pulso de disparo para el láser de la forma como se muestra en la figura 3.6, con un ciclo de trabajo del 35%. Por su parte el PIC18F4550 en ese mismo intervalo toma 17000 muestras de la entrada analógica habilitada desde el computador.
- Terminado el intervalo de 1 segundo el pin RA4 del PIC16F84A vuelve a estado alto encendiendo el láser.

El tiempo de espera t_1 es necesario debido esencialmente al tiempo de estabilización del sensor LDR.

Figura 3.5 Sistemas sensoriales con sus respectivas señales de entrada y salida

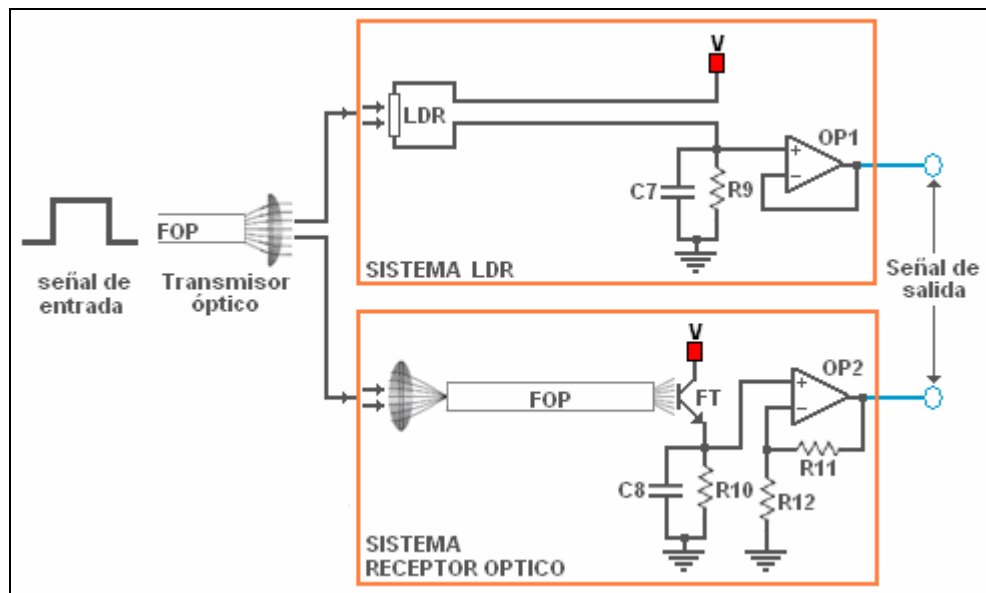
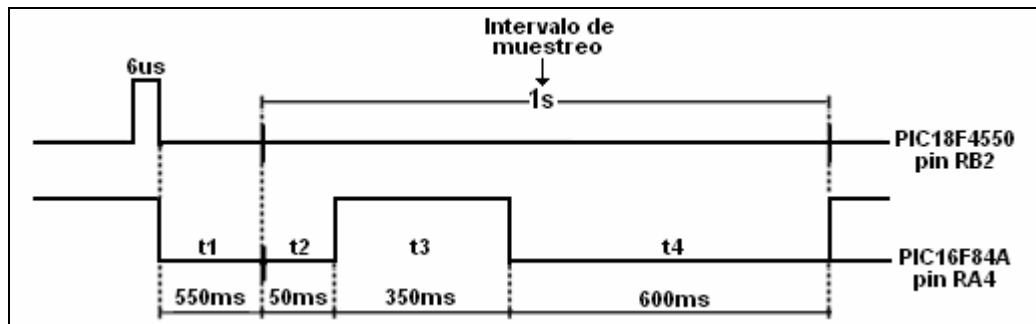
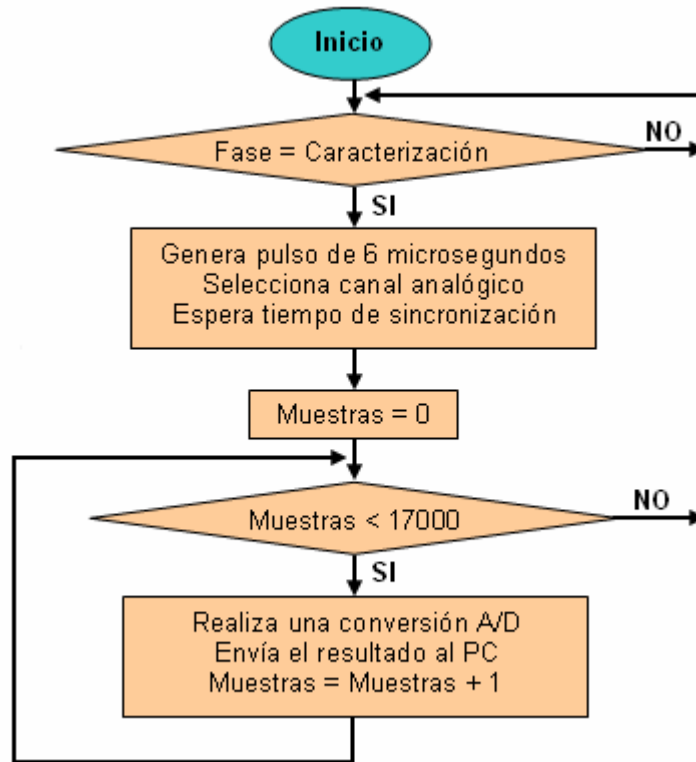


Figura 3.6 Diagrama de tiempo del funcionamiento de los microcontroladores durante la fase de caracterización.



El algoritmo para el PIC16F84A ya se describió en el apartado 3.1.2. El diagrama de flujo para esta parte del algoritmo del PIC18F4550 se ilustra en la figura 3.7

Figura 3.7 Diagrama de flujo del algoritmo del PIC18F4550 para la fase 2



3.3.2 Aplicaciones en Matlab para la fase 2. La Aplicación en Matlab para la fase de caracterización consta de tres partes, en la primera se efectúa la captura de datos, en la segunda se realiza la estimación de la función de transferencia, y en la tercera se analiza la validez del modelo matemático obtenido.

La captura de datos. El algoritmo de captura de datos se implementa en un archivo M-File, y su rasgo principal es que se ejecuta en dos tiempos, uno para leer los datos de la señal de entrada y otro para leer los datos de la señal de salida de cada sistema sensorial. En esta nueva secuencia se introducen los ajustes algorítmicos que optimizan el comportamiento del sistema cuando se produce el evento de datos incompletos en el buffer.

Cuando el problema se presenta se evalúan dos condiciones, una que mira continuamente si la totalidad de los datos esperados ya se encuentran en el buffer, y otra que evalúa un tiempo prudente de adquisición. Si los datos son incompletos y el tiempo de espera se ha superado, se eliminan los datos existentes y se solicita nuevamente al PIC18F4550 que envíe un número pequeño de datos, tal acción obtiene un nuevo buffer donde están presentes los datos faltantes, los nuevos datos enviados y los nuevos datos solicitados. Con esta información y efectuando cálculos aritméticos se determina si el tamaño del nuevo buffer es

coherente, de serlo, es porque el sistema se ha estabilizado, y la aplicación sugiere hacer una nueva captura de datos; de no serlo, la aplicación sugiere reiniciar el sistema, prioritariamente la tarjeta de adquisición.

Una vez adquiridos los datos se procesan y grafican. La gráfica generada contiene las señales de entrada y salida del sistema que se esté caracterizando, el eje de abscisas corresponde al número de muestras tomadas y el eje de ordenadas al valor en decimal del resultado de cada conversión análogo digital. El diagrama de flujo del algoritmo en Matlab para la captura de datos se muestra en la figura 3.8.

Estimación de la función de transferencia. Si se pretendiera obtener un modelo matemático teórico que describa a los sistemas de la figura 3.5, se necesitaría analizar una a una las distintas partes que los constituyen. Por ejemplo, para el caso del sistema receptor óptico, habría que describir lo que sucede a nivel del lente y la fibra, a nivel del fototransistor y el circuito RC, y finalmente lo que pasa en la parte del amplificador operacional.

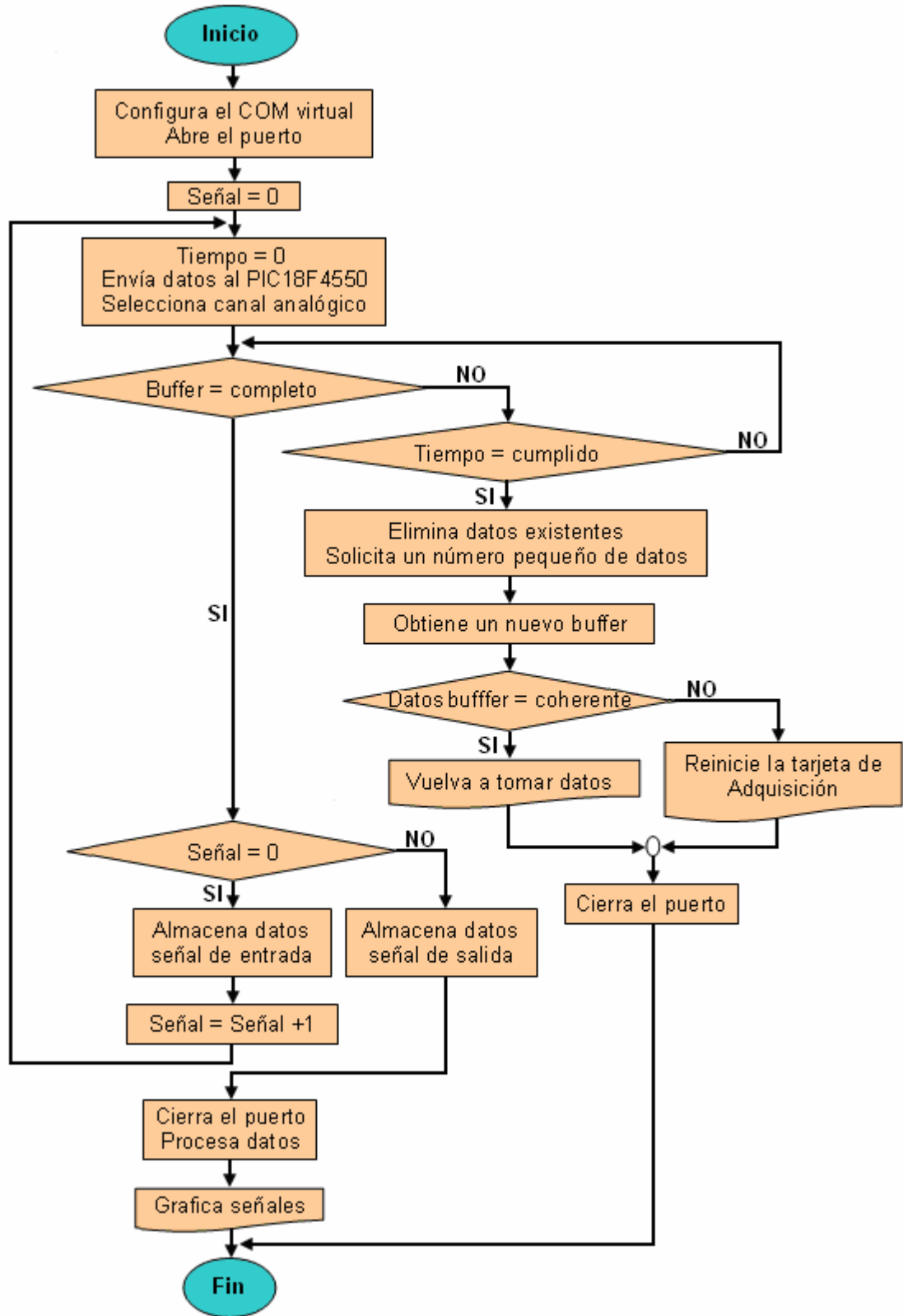
La estimación de una función de transferencia con métodos lineales paramétricos requiere mirar el sistema como un todo, donde únicamente importa lo que hay en la entrada y la salida del “paquete”. Los métodos paramétricos son técnicas de tipo experimental que generan un modelo en tiempo discreto a partir de datos reales obtenidos del sistema. En este proyecto se utiliza el método ARX descrito en la sección 1.9.

La estructura ARX se ejecuta en Matlab mediante instrucciones que necesitan la siguiente información de inicio: los vectores de datos de las señales de entrada y salida del sistema en estudio, el tiempo de muestreo de dichas señales, el grado de los polinomios involucrados $[n_a, n_b]$ y el factor n_k de retardo entre la entrada y la salida. Los valores de n_a , n_b y n_k , en esencia sirven para establecer el grado del numerador y denominador de la función de transferencia a estimarse.

ARX en Matlab calcula los coeficientes de los polinomios A y B propios de la estructura con los cuales se obtiene una función de transferencia en variable z. La transformada Z es la que se corresponde con los sistemas en tiempo discreto. ARX también retorna un error de predicción que indica que tan cerca o tan lejos se encuentra la respuesta del modelo estimado con respecto a los datos obtenidos por muestreo.

Las técnicas experimentales de identificación recomiendan manipular los parámetros n_a , n_b y n_k para encontrar un modelo matemático cuyo grado de complejidad sea consecuente con el sistema y el error de predicción sea el menor posible.

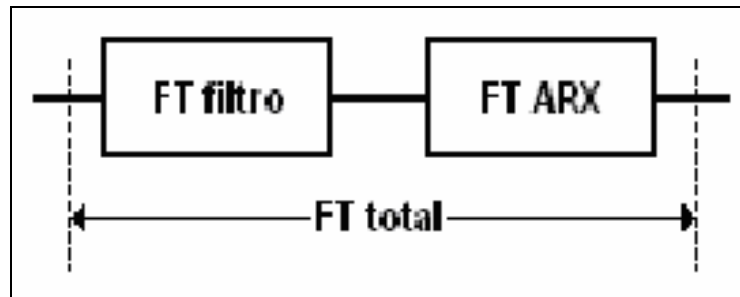
Figura 3.8 Diagrama de flujo de la captura de datos en el proceso de caracterización.



Al graficar las señales adquiridas se encontró que poseían un nivel de ruido que era conveniente filtrarse, entre otras cosas porque el ruido en el modelo ARX disminuye los porcentajes de aproximación. Se procedió entonces a implementar un filtrado por software en Matlab mediante un filtro Butter de orden uno, pasa bajos, con frecuencia de corte a 100 Hertz. En estas condiciones el modelo matemático para cada sistema sensorial es una combinación de la función de transferencia filtro y la función de transferencia generada por la estructura ARX. Esta situación se representa por el diagrama de bloques de la figura 3.9

Para que exista similitud en los referentes de comparación, se ubican distancias entre el transmisor óptico y los dispositivos sensoriales de tal manera que al producirse el nivel alto del pulso, el voltaje a la salida de los circuitos receptores de señal esté alrededor de 3 voltios. La escogencia de este punto de trabajo se hace por dos razones: la primera para que la respuesta de los dos sistemas se encuentre en el mismo rango de variación (0 a 3 voltios), la segunda porque hasta ese nivel de voltaje está garantizada la no saturación del amplificador operacional LM324.

Figura 3.9 Función de transferencia total de los sistemas sensoriales

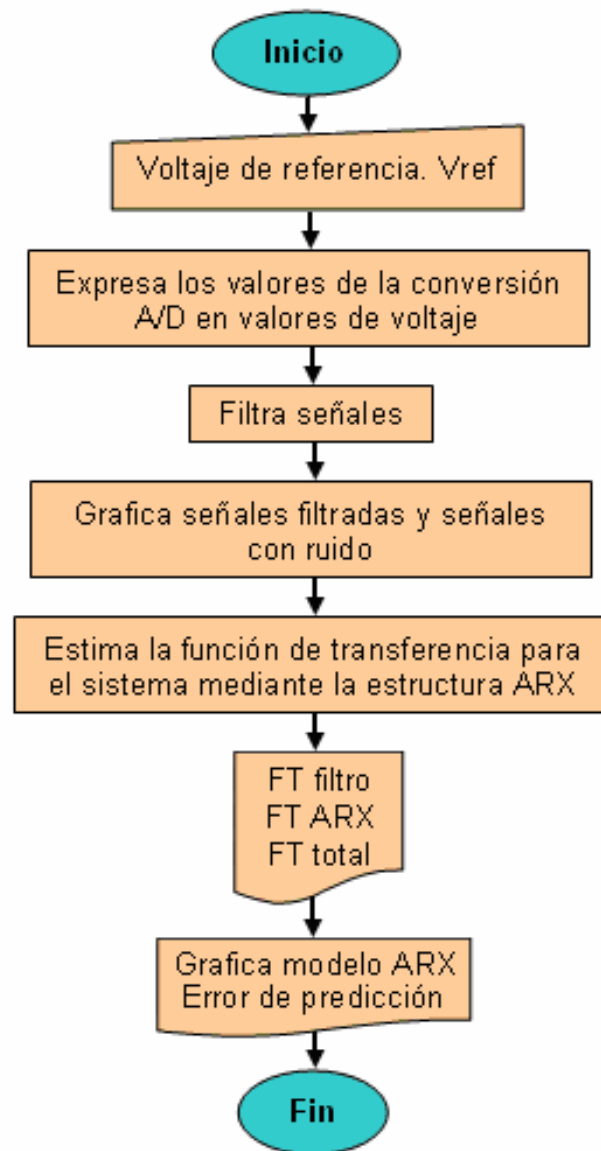


El diagrama de flujo de la aplicación en Matlab para la estimación de la función de transferencia se ilustra en la figura 3.10.

Además de la información requerida por la estructura ARX, la figura 3.10, indica que existe otro valor de entrada que sirve de referencia para transformar los datos de la conversión A/D en valores de voltaje. Dicho valor es un voltaje de referencia que corresponde al voltaje de alimentación de la tarjeta electrónica externa.

Las gráficas generadas por el diagrama de flujo de la figura 3.10, son ahora una representación del voltaje que se obtiene a la salida de los circuitos acondicionadores de señal en función del tiempo.

Figura 3.10 Diagrama de flujo que estima la función de transferencia en el proceso de caracterización



Validación del modelo obtenido. Es la última parte del proceso de caracterización, y consiste en el análisis de la función de transferencia total obtenida para cada sistema.

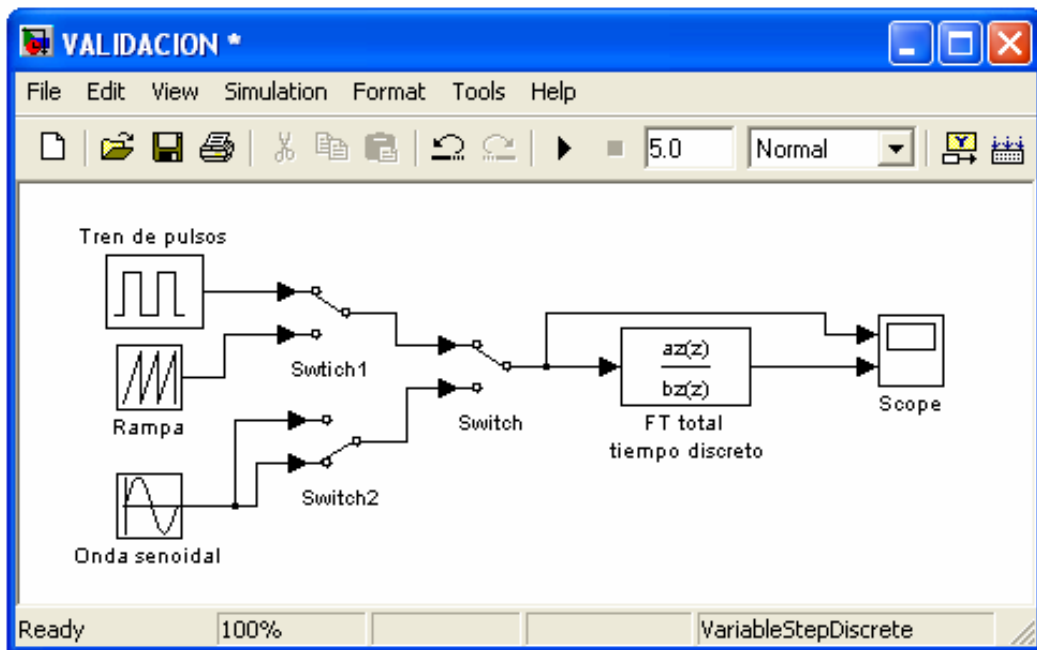
Consta de un archivo M-File de únicamente dos instrucciones:

La primera instrucción inicializa la herramienta *fvtool* de Matlab; aunque *fvtool* es un instrumento para el análisis de filtros digitales, igual permite importar el numerador y denominador de una determinada función de transferencia y observar

su respuesta al impulso, al escalón, el diagrama de polos y ceros en el plano complejo z , sus coeficientes, etc.

La segunda abre el archivo “VALIDACIÓN” desarrollado en Simulink, en el que por simulación se evalúa la respuesta de cada modelo cuando tiene como entradas un tren de pulsos, una señal rampa y una onda senoidal, ésta última permite realizar un estudio aproximado de la respuesta en frecuencia de cada sistema sensorial. La aplicación implementada en Simulink se muestra en la figura 3.11.

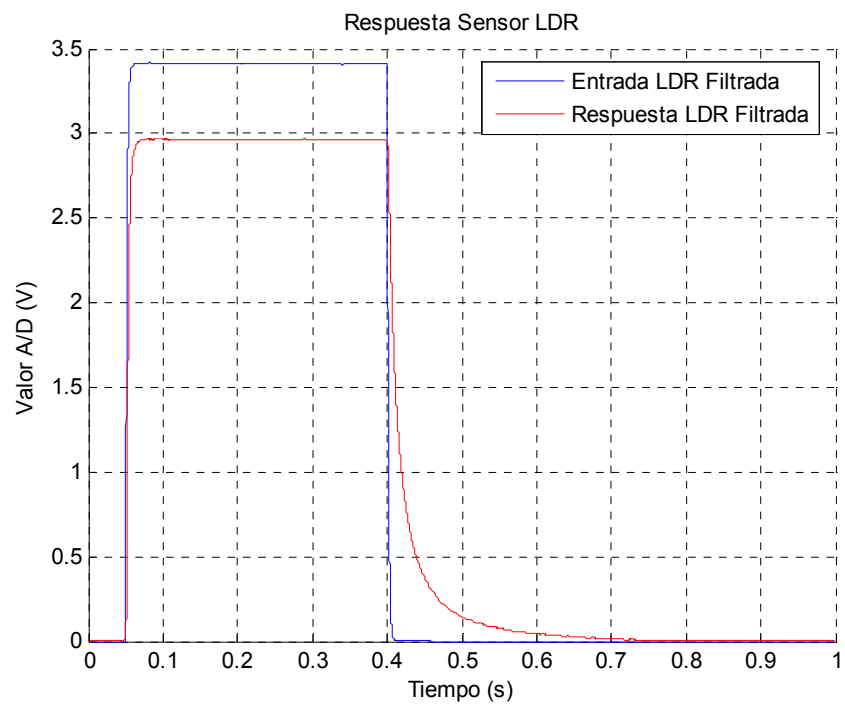
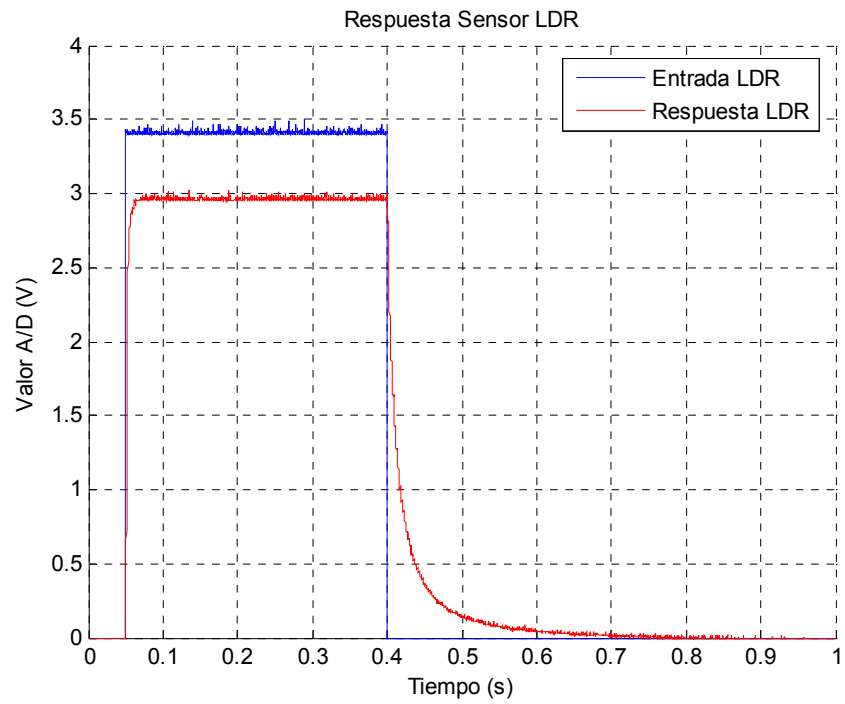
Figura 3.11 Archivo de validación construido en Simulink para los sistemas sensoriales



3.3.3 Resultados fase 2. El inconveniente de datos incompletos en el buffer ocasionalmente se produce, y cuando esto sucede, rara vez la aplicación recomienda reiniciar el sistema. Lo anterior indica que la mayoría de las veces es posible volver a hacer una nueva captura de datos sin problemas de bloqueo o similares.

Caracterización del sistema LDR. La figura 3.12, indica las señales de entrada y salida obtenidas del sistema LDR para el punto de trabajo establecido de 0 a 3 voltios. Se puede observar la acción del filtro digital utilizado, y el comportamiento exponencial del sensor fotorresistivo ante cambios abruptos de luminosidad.

Figura 3.12 Señales con ruido y filtradas del sistema LDR



De aquella fotorresistencia de la que no se conocía hoja de especificaciones alguna, la interfaz electrónica nos permite afirmar, que ante una entrada pulso con

un ciclo de trabajo del 35%, ésta posee un tiempo de estabilización ascendente relativamente corto en comparación con el tiempo de estabilización descendente. La LDR responde lentamente a cambios abruptos que van de un estado de alta a uno de baja luminosidad.

Para la estimación de la función de transferencia se asignó a n_a , n_b y n_k valores de 2, 2 y 1, respectivamente. Valores más grandes no disminuyen notoriamente el error de predicción, pero en cambio generan funciones de transferencia de mayor grado que resultan exagerados para el sistema. Una de las premisas de los métodos de identificación es precisamente lograr buenos porcentajes de aproximación con modelos que tengan el menor orden de complejidad posible.

Con los valores de n_a , n_b y n_k establecidos, se tiene que la función de transferencia del modelo ARX es de orden 2; siendo 1, el orden de la función de transferencia filtro, entonces, la función de transferencia total que representa al sistema LDR es una función en tiempo discreto de grado 3.

Al ejecutar la fase 2 se encontró que el porcentaje de aproximación para un mismo punto de trabajo no es constante, y por ende los coeficientes del modelo matemático estimado son cambiantes. Para el caso del sistema LDR se halló que los porcentajes varían entre un 84% y 90%. Gráficamente se puede observar que porcentajes por debajo del 87% son malas aproximaciones y en consecuencia se elige un modelo que se encuentre por encima de este valor.

En la figura 3.13, se muestra la gráfica generada por el modelo ARX con un porcentaje de aproximación del 88.28%. El recuadro de la figura 3.14, contiene las respectivas funciones de transferencia.

Caracterización del sistema receptor óptico. La figura 3.15, indica las señales de entrada y salida obtenidas del sistema receptor óptico en el mismo rango de variación de 0 a 3 voltios. Se observa que éste sistema responde muy velozmente a cambios abruptos de intensidad luminosa, ya que los flancos ascendentes y descendentes de la respuesta se superponen a sus similares del pulso de entrada.

Los valores de n_a , n_b y n_k asignados al modelo ARX para el sistema receptor óptico son: $[n_a, n_b, n_k] = [1, 1, 1]$. Así, la función de transferencia ARX es de grado 1 y por tanto la función de transferencia total será de grado 2.

En éste caso se encontró que los porcentajes de aproximación varían entre un 94% a un 99%, siendo muy buenas aproximaciones las que se encuentran por encima del 95%.

Figura 3.13 Respuesta medida, respuesta estimada y porcentaje de aproximación obtenidos con la estructura ARX para el sistema LDR.

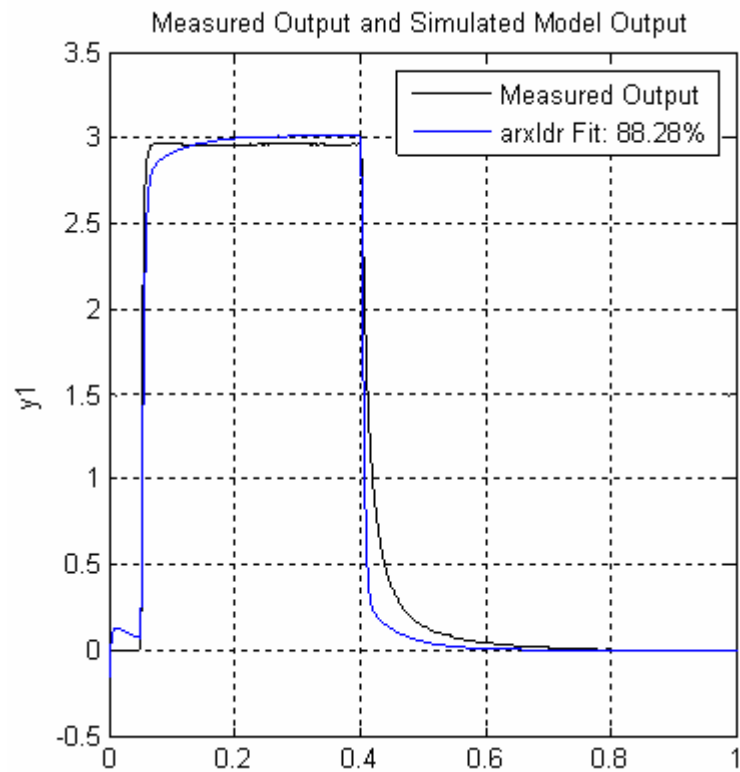


Figura 3.14 Funciones de transferencia en tiempo discreto del sistema LDR

```

%.....Función de transferencia filtro.....
Transfer function:
0.01815 z + 0.01815
-----
z - 0.9637

%.....Función de transferencia ARX.....
Transfer function from input "u1" to output "y1":
0.01335 z - 0.01333
-----
z^2 - 1.982 z + 0.9821

%.....Función de transferencia total LDR.....
Transfer function from input "u1" to output:
0.0002422 z^2 + 2.884e-007 z - 0.0002419
-----
z^3 - 2.946 z^2 + 2.892 z - 0.9465
    
```

La figura 3.16, indica la gráfica generada por el modelo ARX para el sistema receptor óptico, con un porcentaje de aproximación del 98.08%. El recuadro de la figura 3.17, contiene las respectivas funciones de transferencia.

Figura 3.15 Señales con ruido y filtradas del sistema receptor óptico

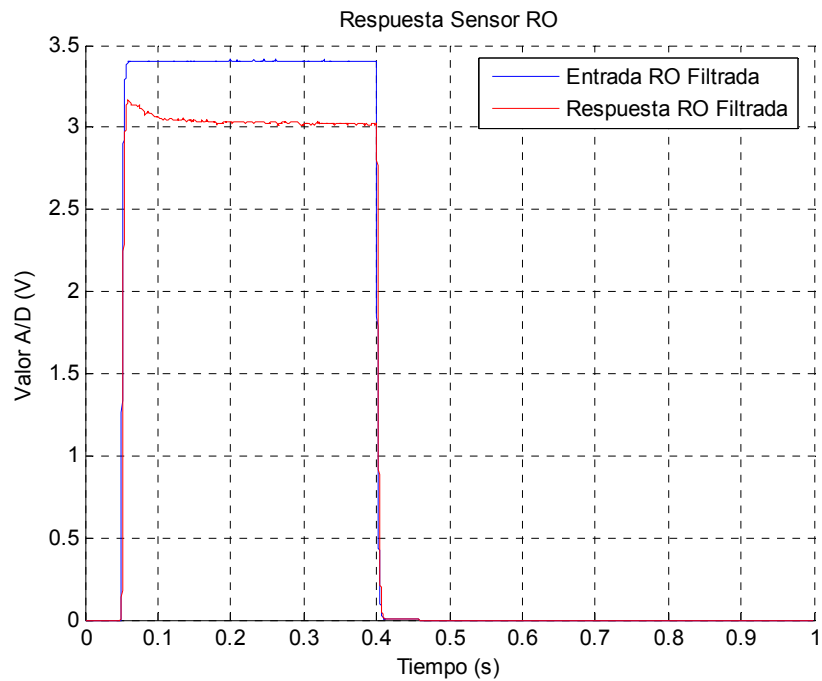
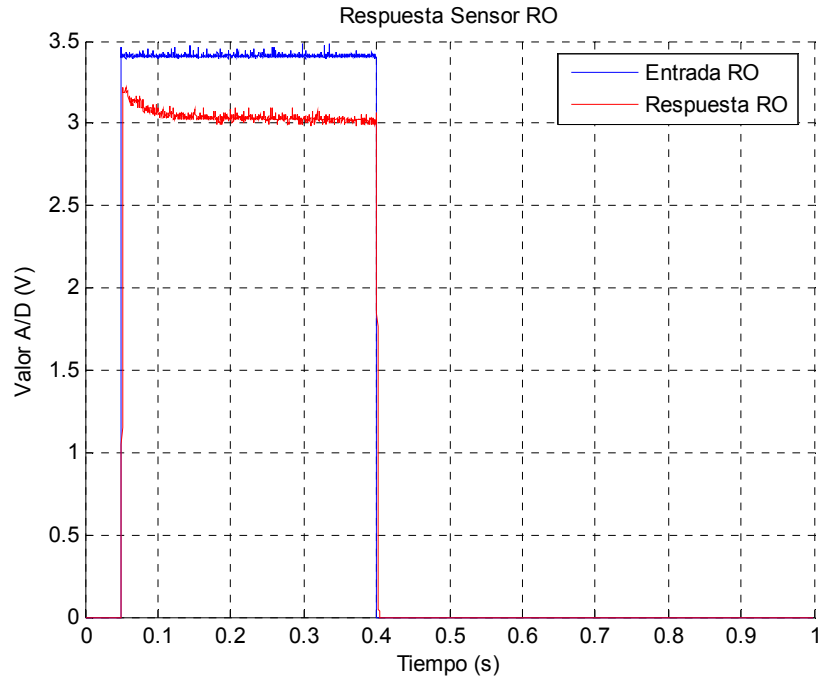


Figura 3.16 Respuesta medida, respuesta estimada y porcentaje de aproximación obtenidos con la estructura ARX para el sistema receptor óptico.

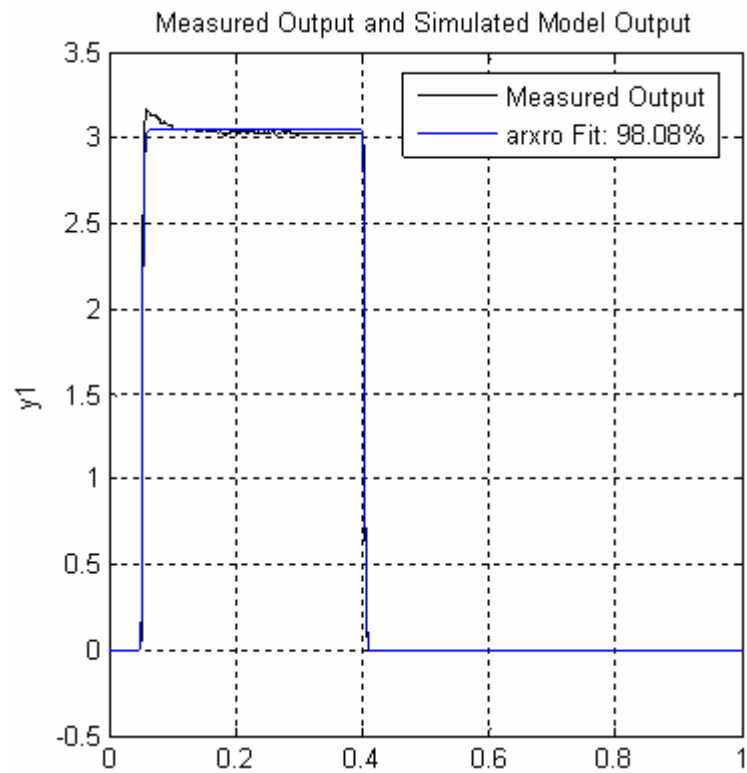


Figura 3.17 Funciones de transferencia en tiempo discreto del sistema receptor óptico

```

%.....Función de transferencia filtro.....
Transfer function:
0.01815 z + 0.01815
-----
z - 0.9637

%.....Función de transferencia ARX.....
Transfer function from input "u1" to output "y1":
0.04353
-----
z - 0.9513

%.....Función de transferencia total RO.....
Transfer function from input "u1" to output:
0.0007898 z + 0.0007898
-----
z^2 - 1.915 z + 0.9168
    
```

Validación de los modelos. La estabilidad es un factor que se analiza desde una perspectiva matemática. Un sistema es estable si, ante cualquier entrada acotada en un intervalo cualquiera de tiempo, la salida también es acotada. Para que en tiempo discreto, un sistema se considere estable, todos los polos de su función de transferencia deben estar en el interior del círculo unitario del plano complejo z .

Al importar el numerador y denominador de las funciones de transferencia estimadas tanto para el sensor LDR como para el receptor óptico, la herramienta `fvtool` de Matlab siempre confirma la estabilidad de ambos modelos, y en el diagrama de polos y ceros que genera, se puede verificar que sus polos efectivamente se encuentran en el interior del círculo unitario.

La simulación de los modelos mediante la aplicación desarrollada en Simulink muestra que:

- Con las señales tren de pulsos y rampa, la respuesta de los sistemas es afín con lo encontrado experimentalmente, donde ante cambios abruptos, el sensor LDR se estabiliza de manera exponencial y el módulo receptor óptico sigue velozmente dichos cambios. Con la señal rampa, en los intervalos donde ésta crece linealmente, se observa que los dos sensores también responden en forma lineal.
- El análisis de la respuesta en frecuencia mostró que si se toma como límite mínimo de atenuación un valor de 0.1 voltios; ante una entrada senoidal, la respuesta del receptor óptico decae a ese valor soportando una mayor frecuencia en comparación con el sensor LDR. Los valores oscilan alrededor de los 400 ± 150 Hz en el caso del sensor fotorresistivo y los 800 ± 150 Hz en el caso del receptor óptico.

Referentes comparativos de los sistemas sensoriales

- Por los datos reales obtenidos de cada sistema, y por los resultados del proceso de caracterización, se puede afirmar que el receptor óptico posee una superior velocidad de respuesta.
- La función de transferencia estimada para el sistema receptor óptico mediante la estructura ARX, alcanza mejores porcentajes de aproximación con un menor grado de complejidad que el sistema LDR.
- Por ser el transmisor y receptor módulos basados en fibra óptica, en teoría, estos dispositivos gozan de alta inmunidad al ruido y perturbaciones de tipo electromagnético.

Para finalizar lo referente a la fase de caracterización mencionaremos dos aspectos importantes:

El primero es indicar que el *Toolbox Ident* de Matlab fué un elemento importante durante el proceso ya que estimuló el estudio de los referentes teóricos de los modelos paramétricos, permitió intuir las características del filtro digital a utilizarse y conocer el tipo de instrucciones que permiten acceder a la estructura paramétrica ARX. Consecuencia de lo anterior, es que las aplicaciones desarrolladas en Matlab permiten caracterizar los sistemas sin necesidad de entrar al Toolbox, lo que redundo en versatilidad de ejecución.

El segundo es señalar que Matlab permite hacer transformaciones de tiempo discreto a continuo y viceversa, con lo que el análisis de los modelos estimados puede hacerse también desde la perspectiva de la **Transformada de Laplace**.

3.4 FASE 3. PRÁCTICAS CON EL TRANSMISOR Y RECEPTOR ÓPTICO

El proceso de caracterización indica que es viable utilizar el receptor óptico como detector de variaciones de intensidad luminosa. En esta fase se implementan tres prácticas encaminadas a tal fin, donde a través de situaciones reales se ponen a prueba el transmisor y el receptor óptico. La visualización de resultados de los cambios de tipo lumínico comprometidos en cada una de las prácticas, se muestran únicamente como variaciones de niveles de voltaje.

La primera práctica consiste en detectar la variación de intensidad luminosa ambiental, la segunda es un contador de revoluciones del eje de giro de un motor DC y la tercera obtiene una curva de decaimiento del azul de metileno en reacción química, basándose en el principio de espectroscopia de absorción.

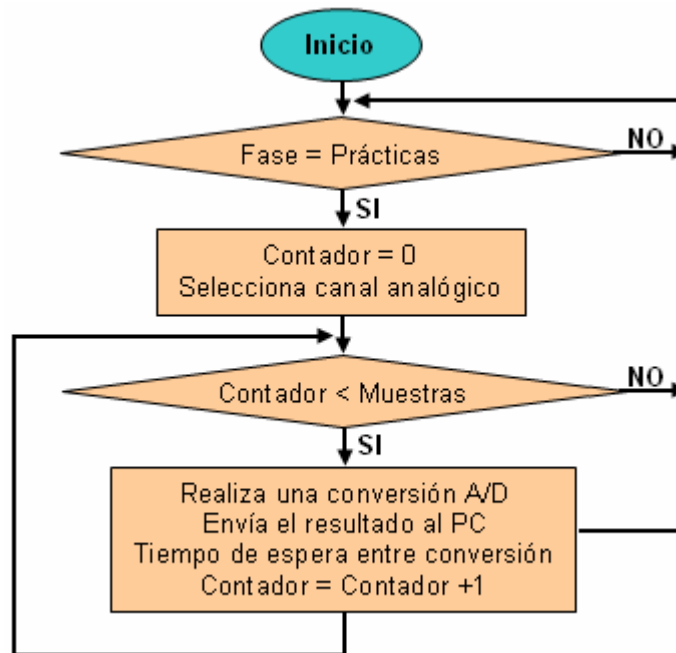
El algoritmo del PIC18F4550 para esta fase, se ilustra por el diagrama de flujo de la figura 3.18, su rasgo más significativo es que utiliza los cuatro parámetros de funcionamiento asignados desde el computador.

3.4.1 Aplicación en Matlab para la fase 3. Es un programa que cuenta con elementos algorítmicos de las anteriores aplicaciones entre los cuales están: la captura y procesamiento de datos, la configuración del puerto virtual y el filtrado digital de señales, entre los más importantes. La captura de datos se hace con la subrutina que mejora la respuesta del sistema cuando los datos en el buffer son incompletos. El diagrama de flujo de esta aplicación se muestra en la figura 3.19.

De los cuatro parámetros que controlan la operación del PIC18F4550, dos siempre son constantes, y se encargan de seleccionar en el microcontrolador la fase 3, y el canal analógico que monitorea la señal del receptor óptico. Los dos restantes

cambian dependiendo de la práctica, y son los que controlan el número de muestras a tomar y el tiempo de espera entra cada muestra.

Figura 3.18 Diagrama de flujo del algoritmo del PIC18F4550 durante la fase 3



3.4.2 Práctica 1. Detección de la variación luminosa ambiental. Se hace exclusivamente con el receptor óptico, este dispositivo en posición horizontal, solamente percibe la intensidad luminosa de una fuente que esté en la misma línea y que apunte directamente a él. Para que el receptor óptico detecte los cambios de su entorno más inmediato necesita de un ángulo de trabajo respecto a la horizontal. Esta situación se representa por el diagrama de la figura 3.20.

La práctica 1 cuenta con las siguientes características de operación:

- Un buen rango de detección de cambios de intensidad luminosa se consigue cuando el ángulo i de la figura 3.20 es 30 grados.
- Los valores de las resistencias R_{11} y R_{12} de la figura 3.5 en este caso son de 1.2k y 50 Ω , respectivamente.
- Para esta práctica se destina un tiempo de adquisición de 20 segundos durante el cual se toman cincuenta mil muestras con un tiempo de espera entre una muestra y otra de 350 microsegundos.

Figura 3.19 Diagrama de flujo de la aplicación en Matlab para la fase 3

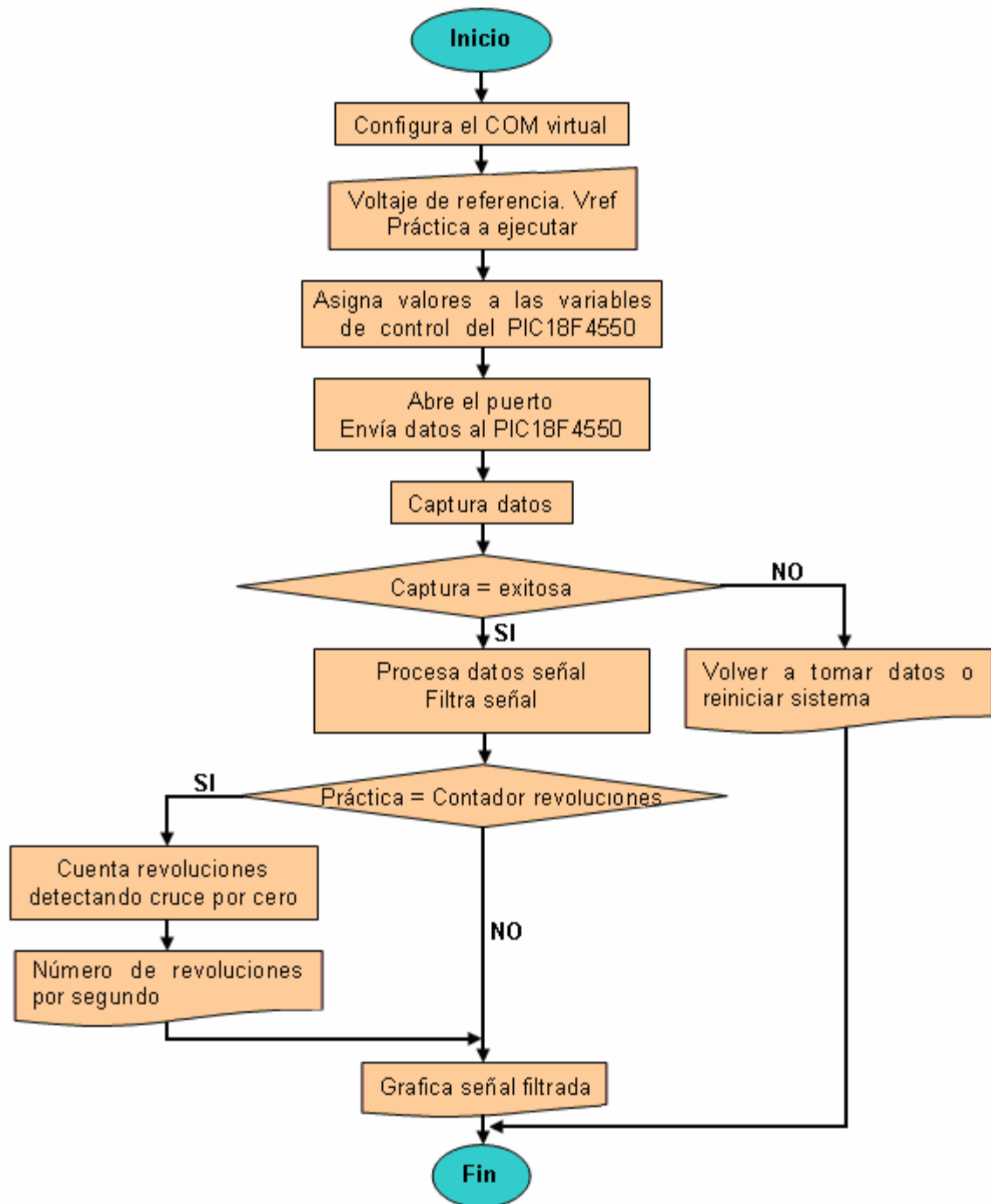
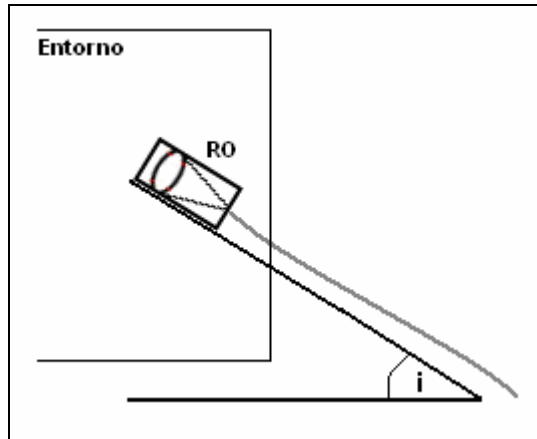
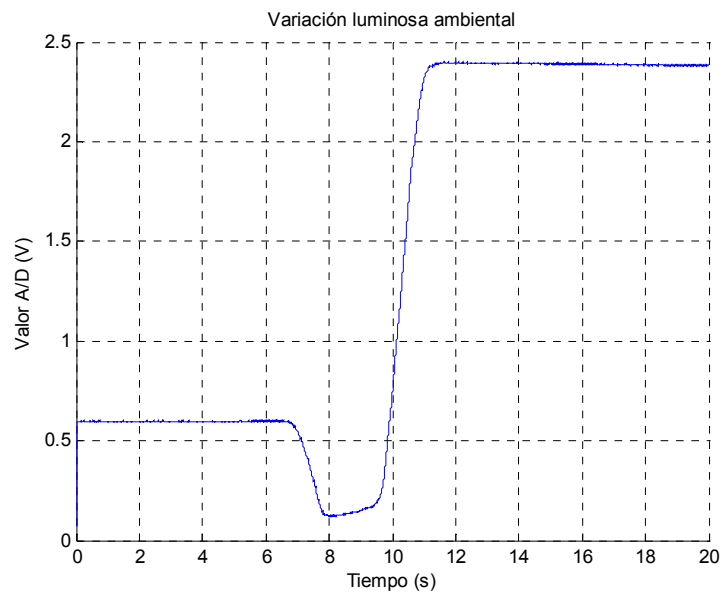


Figura 3.20 Posición de trabajo del receptor óptico en la práctica 1



La señal de una situación cualquiera se muestra en la figura 3.21, el primer tramo de la curva representa un estado inicial de luminosidad, los siguientes tramos corresponden a perturbaciones introducidas en el entorno, que provocan un descenso y luego un aumento de la intensidad luminosa presente en el momento.

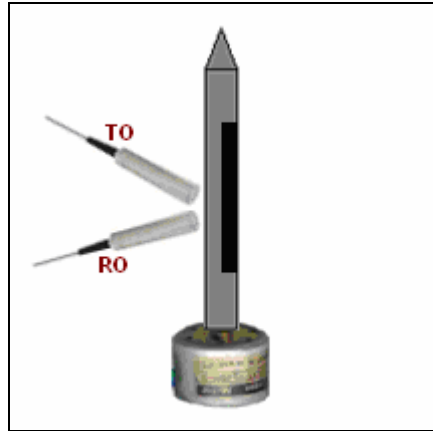
Figura 3.21 Curva de detección de la luminosidad ambiental con el receptor óptico



La observación del comportamiento del receptor óptico durante esta práctica, indica que la resolución del dispositivo no es muy buena en bajas luminosidades.

3.4.3 Práctica 2. Contador de revoluciones. La figura 3.22, muestra el montaje implementado. Una parte del eje acoplado al motor se pinta de negro con la intención de generar un movimiento ondular. La práctica consiste en determinar el número de revoluciones por segundo (rps) para diferentes niveles de voltaje suministrados al motor. Como se indica en el diagrama de flujo de la figura 3.19, el conteo se realiza detectando los cruces por cero de la señal adquirida.

Figura 3.22 Montaje del contador de revoluciones



Otros parámetros de funcionamiento de la práctica 2 son:

- El motor, es un motor de corriente continua de 9 voltios.
- El transmisor y receptor óptico forman un ángulo de 90 grados entre sí.
- Los valores de las resistencias R11 y R12 de la figura 3.5 son de 1.2k y 30Ω, respectivamente.
- Siendo el tiempo de adquisición de 1 segundo, el número de muestras a tomar son 17000, sin ningún retardo entre una muestra y otra.

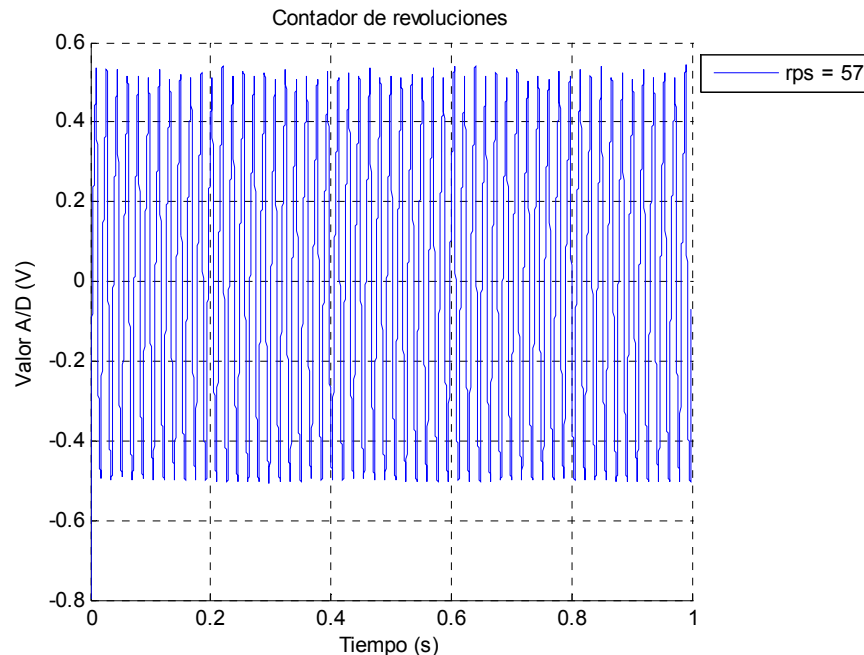
Los resultados del contador de revoluciones se registran en la tabla 3.1. La señal resultante cuando el voltaje de alimentación del motor es 5 voltios se muestra en la figura 3.23.

Tabla 3.1 Resultados del contador de revoluciones

Voltaje (V)	Revoluciones por segundo (rps)
3	33
5	57
6	71
7	87

Cada uno de los valores rps de la tabla 3.1, pueden presentar una variación de ± 1 revoluciones.

Figura 3.23 Señal obtenida del contador de revoluciones cuando el voltaje suministrado al motor es 5 voltios.

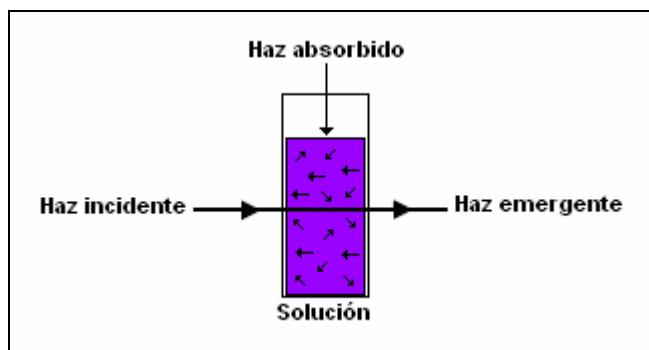


3.4.4 Práctica 3. Obtención de una curva de decaimiento del azul de metileno en reacción química, fundamentada en el principio de espectroscopia de absorción. La espectroscopia de absorción es un fenómeno atribuible a moléculas o sustancias químicas que tienen la propiedad de absorber energía radiante de una determinada longitud de onda. Así por ejemplo, el isopropanol y la acetona presentan alta absorción a una longitud de onda de 780 nm, por su parte, el azul de metileno absorbe las radiaciones centradas alrededor de los 650 nm.

Es importante recordar aquí, que tanto la fibra como el láser utilizados en la construcción del transmisor y receptor óptico, también poseen una longitud de onda de trabajo en 650 nm.

La forma como normalmente se efectúa el análisis espectroscópico de una determinada molécula se ilustra a través del esquema de la figura 3.24. La sustancia a analizar hace parte de una solución química sobre la cual incide el tipo de luz que ella es capaz de absorber. La cantidad de luz absorbida se relaciona estrechamente con el grado de concentración de la sustancia en la solución.

Figura 3.24 Sistema de análisis espectroscópico



La reacción química³⁸. Es una reacción que trabaja con un indicador ácido-base que se decolora, de azul a transparente, pero que vuelve al color inicial bajo determinadas condiciones.

En primera instancia se preparan 3 disoluciones de la siguiente forma:

Disolución A: 2 gramos de glucosa en 100 mililitros de agua.

Disolución B: 2 gramos de hidróxido de sodio en 100 mililitros de agua.

Disolución C: Azul de metileno al 1%

En seguida se mezclan las disoluciones A y B dentro de una botella y se añaden unas gotas de azul de metileno. Tapamos y agitamos, en este momento la disolución tendrá color azul. Si dejamos reposar, al cabo de un tiempo, la botella se decolora quedando la disolución transparente. Pero se puede volver a recuperar el color azul si agitamos de nuevo. Dejando reposar la disolución se decolora otra vez, de forma que se puede repetir el proceso varias veces.

Una de las formas en las que se puede producir una reacción química es por transferencia de electrones de unas sustancias a otras. La pérdida de electrones es conocida como oxidación y la ganancia de éstos como reducción.

La Glucosa en solución alcalina es lentamente oxidada por el oxígeno transformándose en ácido glucónico. En presencia de hidróxido sódico el ácido es convertido a gluconato sódico. El azul de metileno apresura la marcha de la reacción actuando como agente de transferencia de oxígeno. Por la oxidación de la glucosa, el azul de metileno se reduce a azul de leucometileno, y se convierte en incoloro.

³⁸<http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid2/rc-100/agua/rc-100d.htm>.

Para el fin que se persigue con esta práctica se puede considerar la reacción en dos etapas, así:

Etapa 1. Al agitar la solución:

Indicador incoloro (azul de leucometileno) → Indicador azul (azul de metileno)

Etapa 2. Al dejar reposar la solución:

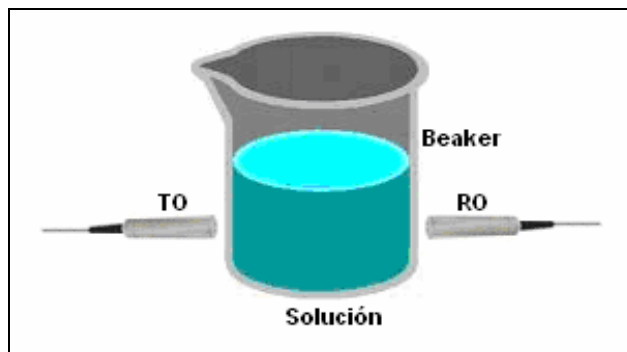
Indicador azul (azul de metileno) → Indicador incoloro (azul de leucometileno)

Ejecución de la práctica. La figura 3.25, indica el montaje implementado. El beaker vacío se ubica en la trayectoria del rayo de luz entre el transmisor y el receptor óptico. Externamente se agita la solución y en seguida se deposita en el beaker, en este momento, la cantidad de azul de metileno presente en la solución es máxima. A partir de entonces se inicia la captura de datos que tarda un minuto y 10 segundos.

La práctica 3 tiene los siguientes parámetros de funcionamiento:

- Los valores de las resistencias R11 y R12 de la figura 3.5 son de 1.2k y 50Ω, respectivamente.
- El tiempo de adquisición es de 70 segundos durante el cual se toman 65000 muestras con un lapso de espera entre una muestra y otra de 1000 microsegundos.

Figura 3.25 Montaje de obtención de la curva del decaimiento del azul de metileno.



La curva resultante del proceso químico se muestra en la figura 3.26. Se observa que la reacción tiene tres partes principales:

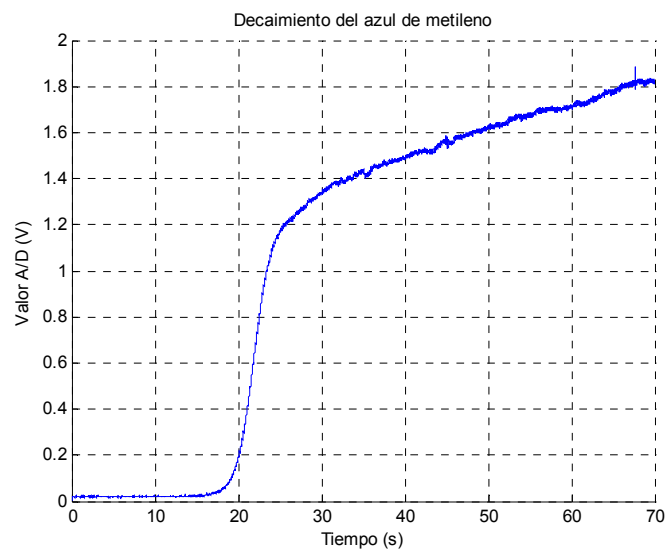
El primer segmento representa el tiempo final de lo que hemos denominado la etapa 1 de la reacción, en donde gran parte de la radiación incidente es absorbida

por la elevada cantidad de azul de metileno presente en ese instante. Así, la intensidad de luz que llega al receptor óptico es mínima.

El segundo segmento es una curva sigmoide y corresponde al descenso de la concentración del azul de metileno por reducción a azul de leucometileno. Al final de la sigmoide la solución ya tiene una tonalidad transparente.

El tercer segmento tiene un comportamiento más lineal en el que los remanentes finales del azul de metileno decaen más lentamente.

Figura 3.26 Curva del decaimiento del azul de metileno en reacción química.



4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos, tras evaluar el comportamiento del sistema receptor óptico mediante el proceso de caracterización y las prácticas implementadas, indican que es perfectamente viable utilizar esta configuración como detector de variaciones de intensidad luminosa, teniendo en cuenta algunos referentes de operación como ángulos de trabajo, ganancia de amplificación, rangos de variación de voltaje, entre otros.

La fase de caracterización permite afirmar que el módulo receptor óptico tiene una superior velocidad de respuesta en comparación con el sensor fotorresistivo. Tal afirmación se basa en el análisis de respuesta en frecuencia de ambos sistemas sensoriales, y también porque, el receptor óptico responde velozmente a variaciones instantáneas de luminosidad.

El hecho de haber construido un transmisor y un receptor óptico, amplía el panorama de aplicación del proyecto, donde a través de un sistema óptico, se puede monitorear el comportamiento de procesos de diferente índole.

Las estructuras paramétricas de identificación son una herramienta experimental, que si se quiere, tienen la desventaja de no analizar un sistema desde la perspectiva de las leyes físicas y matemáticas propias de él. Sin embargo, su importancia radica en que el modelo matemático que generan, es el resultado de estudiar el sistema en condiciones reales, y no teóricas de funcionamiento.

Los microcontroladores de gama alta son dispositivos que cuentan con diversos módulos funcionales en un solo chip. Esta característica es definitiva en proyectos de diseño electrónico, donde optimizan la operación del sistema y disminuyen el número de elementos hardware requeridos.

5. RECOMENDACIONES

Trabajar con mejoras físicas y de hardware como la utilización de fibra óptica no desnuda, la utilización de un fotodetector tipo PIN y el uso de un láser de mayor potencia óptica, puede redundar en una mayor sensibilidad de medición.

Incrementar el alcance en distancia del transmisor y receptor óptico.

Estudiar mecanismos o herramientas que permitan desarrollar aplicaciones en tiempo real.

Trabajar con el Toolbox “guide” de Matlab (Interfaz Gráfica de Usuario), optimizará la ejecución de algoritmos y la visualización de resultados.

BIBLIOGRAFÍA

AGUADO, Alberto. MARTINEZ, Miguel. Identificación y Control Adaptativo. Prentice Hall.

ALONSO, Marcelo. FINN, Edward. Física. Volumen II: Campos y Ondas. Addison Wesley Iberoamericana.

BOYLESTAD, Robert. NASHELSKY, Louis. Electrónica: Teoría de circuitos. Prentice Hall. 6ª. Ed.

DUCHOWICZ, Ricardo. NORIEGA, Sergio. Intercomunicador por fibra óptica. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Argentina 2005.

Fairchild Semiconductor. Zeners. 1N4370A - 1N4372A / 1N746A - 1N759A. DataSheet.

Fairchild Semiconductor. PN2222A / MMBT2222A / PZT2222A. DataSheet.

JARDÓN, Hildeberto. LINARES, Roberto. Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas. Alfaomega. 1995.

Matlab 7.0 Help. System Identification Toolbox - arx. Polynomial Representation of Transfer Functions.

Microchip Technology Inc. PIC18F2455/2550/4455/4550 DataSheet.

Microchip Technology Inc. PIC16F84A DataSheet.

PALACIOS, Enrique y col. Microcontrolador PIC16F84 Desarrollo de proyectos. Alfaomega.

PALLÁS, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Alfaomega. 3a Edición.

POWERS, John. An introduction to fiber optical systems. McGraw-Hill. International Editions.

Universal Serial Bus Specification. Revision 2.0. PDF – 2000.

www.ate.uniovi.es/campo/instrum/teoria/presentaciones/foto/fotodiodos.PDF.

www.centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid2/rc-100/agua.

ANEXOS

ANEXO A. Driver de instalación proporcionado por Microchip para microcontroladores PIC18FXX5X y sistema operativo Windows XP.

; Windows USB CDC ACM Setup File
; Copyright (c) 2000 Microsoft Corporation
; Copyright (C) 2004 Microchip Technology Inc.

[Version]
Signature="\$Windows NT\$"
Class=Ports
ClassGuid={4D36E978-E325-11CE-BFC1-08002BE10318}
Provider=%MCHP%
LayoutFile=layout.inf
DriverVer=08/17/2001,5.1.2600.0

[Manufacturer]
%MFGNAME%=DeviceList
[DestinationDirs]
DefaultDestDir=12
[SourceDisksFiles]
[SourceDisksNames]

[DeviceList]

%DESCRIPTION%=DriverInstall, USB\VID_04D8&PID_000A

; Windows 2000/XP Sections

[DriverInstall.nt]
CopyFiles=DriverCopyFiles
AddReg=DriverInstall.nt.AddReg

[DriverCopyFiles]
usbser.sys,,0x20

[DriverInstall.nt.AddReg]
HKR,,DevLoader,,*ntkern
HKR,,NTMPDriver,,usbser.sys
HKR,,EnumPropPages32,, "MsPorts.dll,SerialPortPropPageProvider"

[DriverInstall.nt.Services]
AddService=usbser, 0x00000002, DriverService

[DriverService]
DisplayName=%SERVICE%
ServiceType=1
StartType=3
ErrorControl=1

ServiceBinary=%12%\usbser.sys

; String Definitions

[Strings]

MCHP="Microchip Technology Inc."

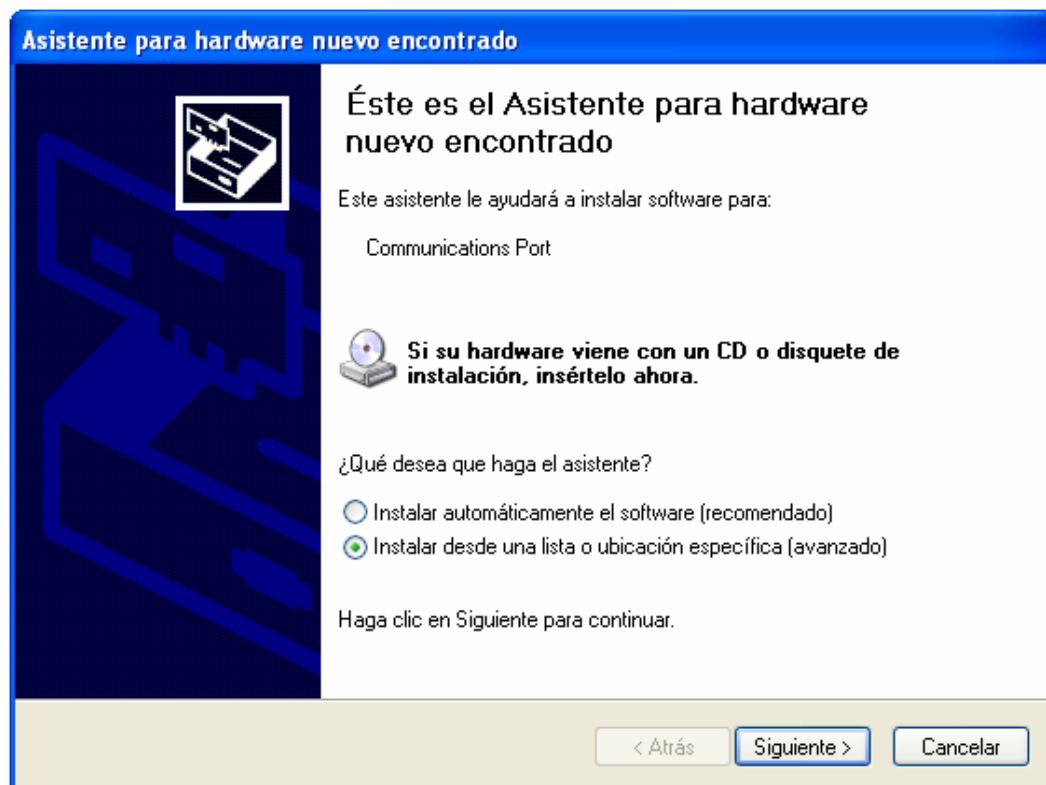
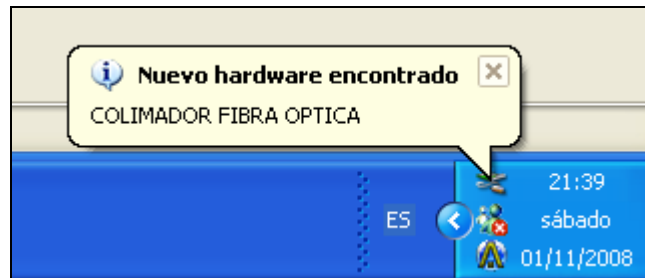
MFGNAME="Microchip Technology Inc."

DESCRIPTION="Communications Port"

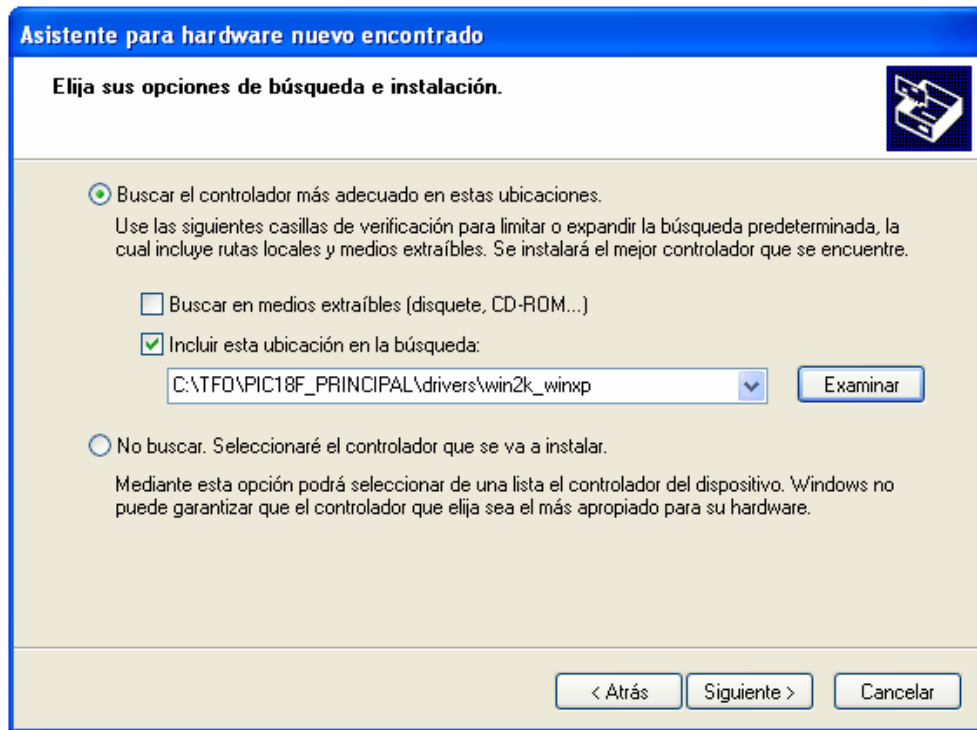
SERVICE="USB RS-232 Emulation Driver"

ANEXO B. Proceso de instalación de la tarjeta de adquisición de datos.

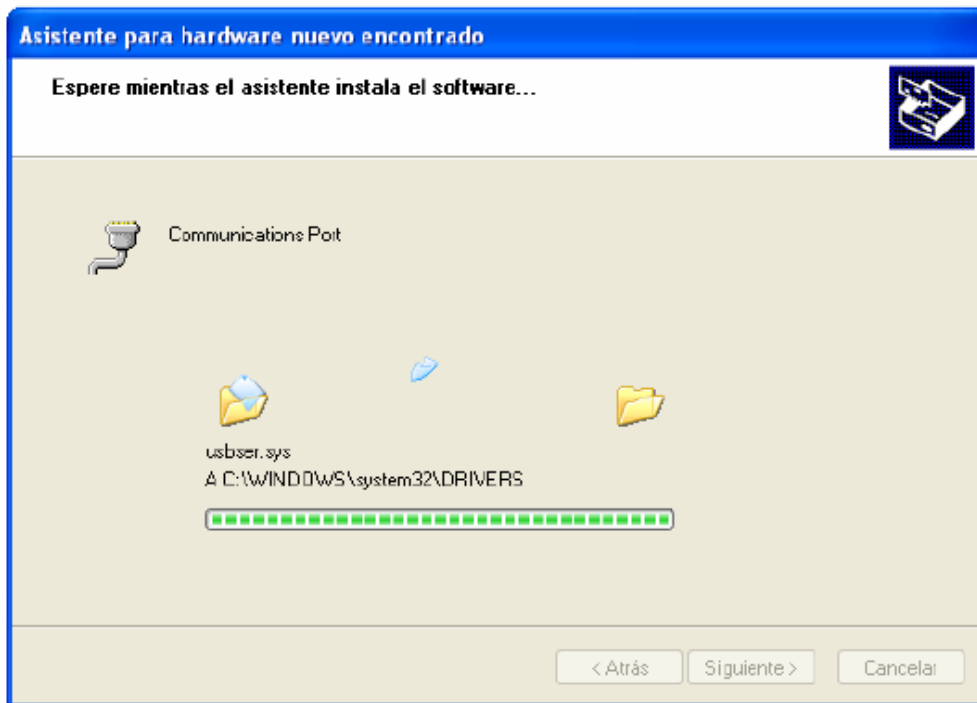
Al conectar por primera vez la tarjeta al computador, Windows ofrece instalar el nuevo hardware encontrado.



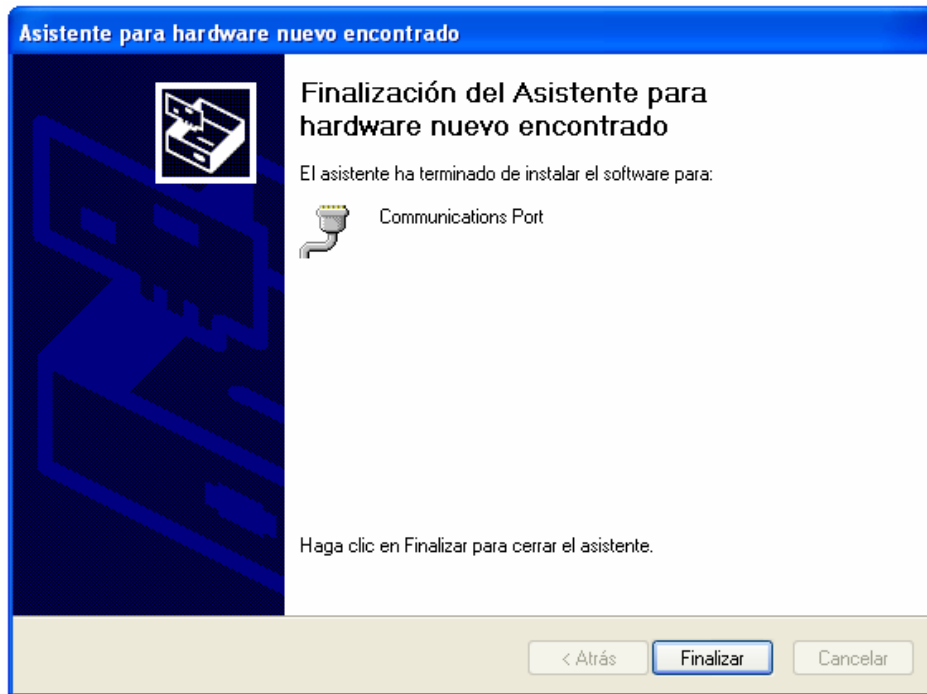
Se selecciona la carpeta de ubicación del Driver proporcionado por Microchip.



El asistente de Windows instala el dispositivo.



Termina la instalación



En administrador de dispositivos la tarjeta aparece como un puerto de comunicaciones serial COM4. Se puede observar el nombre “COLIMADOR FIBRA ÓPTICA” asignado al nuevo dispositivo.

