

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR FIBRA,
BASADO EN EL FLUJO FOTÓNICO, PARA DETECTAR EL NIVEL DE COMBUSTIBLE
EN UN DEPÓSITO

LYNN JAIRO MELODELGADO PABON
BYRON MOLINA ORDOÑEZ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA
SAN JUAN DE PASTO
2009

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR FIBRA,
BASADO EN EL FLUJO FOTONICO, PARA DETECTAR EL NIVEL DE COMBUSTIBLE
EN UN DEPÓSITO

LYNN JAIRO MELODELGADO PABON
BYRON MOLINA ORDOÑEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Ingeniero Electrónico

Director Ingeniero Wagner Suero Pérez

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA
SAN JUAN DE PASTO
2009

RESPONSABILIDAD

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

Artículo Primero del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del Honorable Concejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

San Juan de Pasto, 8 de Febrero de 2009

Autores “A nuestras familias y amigos por su colaboración y apoyo constante”

AGRADECIMIENTOS

A Dios por hacer todo posible.

A la Universidad de Nariño por brindarnos las herramientas, para llevar a cabo este proyecto.

Al Profesor Omar Paredes por su colaboración para solucionar las dudas surgidas durante el desarrollo del trabajo.

A todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de éste proyecto.

GLOSARIO

AJUSTE DE LA SENSIBILIDAD: Ajuste que determina la capacidad del sensor para discriminar entre niveles diferentes de luz u ondas ultrasónicas.

ALINEACION: Posicionamiento de la fuente de luz (emisor), el receptor, el reflector o el objeto de manera que la mayor cantidad de la energía luminosa emitida llegue al foto- detector del receptor.

APROXIMACION AXIAL: Aproximación del objeto manteniendo su centro en el eje de referencia.

A PRUEBA DE EXPLOSIONES: Término para ubicaciones peligrosas que hace referencia a la protección contra explosiones.

ATENUACION: Reducción de la fuerza de una señal, o pérdida o reducción de la intensidad del haz debida a factores ambientales tales como polvo, suciedad, humedad, vapor u otros contaminantes presentes en la zona de detección.

CIRCUITO ELÉCTRICO: Interconexión de elementos eléctricos unidos entre sí en una trayectoria cerrada de forma que pueda fluir continuamente una corriente eléctrica.

CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN: Corriente necesaria que mantiene el funcionamiento de un sensor fotoeléctrico, un sensor de proximidad o una base de control. En ocasiones se denominacomo “consumo de corriente”.

CONCAVO: Se aplica a las superficies curvas que forman una cavidad. Las lentes cóncavas son más delgadas en el centro que en el borde.

CONVEXO: Se aplica a las superficies curvas redondeadas hacia el exterior. Las lentes convexas son más gruesas en el centro que en el borde.

CUBIERTA: Generalmente fabricada en plástico protege mecánicamente a los dos anteriores.

DIFRACCION: Desviación de las ondas producida por el borde de un obstáculo o una apertura.

DISPERSION: a) Separación o descomposición de la luz en los colores del espectro, como la que se produce, por ejemplo, al pasar la luz por un prisma. b) Desviación

irregular de la luz en todas direcciones, como la producida, por ejemplo, por las partículas de la atmósfera.

DIODO: Semiconductor de dos capas que permite el flujo de corriente en una dirección y que inhibe el flujo de corriente en dirección contraria.

DIVERGENTE: Se aplica a los lentes y espejos que aumentan la divergencia (o disminuyen la convergencia) de un haz de luz. Las lentes cóncavas son divergentes.

EFEECTO FOTOELECTRICO: Emisión de electrones por una superficie metálica, producida por la iluminación del metal. A los electrones así liberados se les llama fotoelectrones.

FIBRA ÓPTICA: Fibra transparente de vidrio o plástico empleada para conducir y guiar energía luminosa. Se utiliza en sensores fotoeléctricos como “tubos de luz” para conducir la luz de detección hacia dentro y hacia fuera del área de detección.

FOTOCONDUCTOR: Material que aumenta su conductividad eléctrica bajo la influencia de la luz.

FOTON: Cuanto de luz; partícula luminosa sin masa y con energía $h\nu$ donde ν es la frecuencia asociada a la luz y h la constante de Planck.

HAZ TRANSMITIDO: Modo de detección fotoeléctrica en el que el emisor y el receptor se encuentran uno al frente del otro de manera que la luz del emisor choca directamente en el receptor.

INFRARROJO: Energía luminosa invisible que comienza a partir de una longitud de onda de 690 nm. Los LED infrarrojos se utilizan como emisor en sensores fotoeléctricos.

INTERFERENCIA ELECTROMAGNETICA: Ruido eléctrico que puede interferir con el funcionamiento apropiado de sensores, controladores lógicos programables, contadores, registradores de datos y otros equipos electrónicos sensibles. Las fuentes habituales de IEM son los controles y aparatos luminosos, los motores, los generadores y los contactores.

LED (diodo emisor de luz): Fuente luminosa de estado sólido que genera diversos colores de luz.

LASER. Fuente de luz coherente que opera en dos etapas: inicialmente los átomos son bombeados a un estado excitado, y después se estimula la emisión de luz por estos átomos. La palabra láser es el acrónimo de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

LEY DE SNELL: Ley que relaciona el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción de

la luz al pasar de un medio a otro; esta relación está determinada por el cociente de los índices de refracción de los dos medios. Llamada así en honor de su descubridor, W. Snell.

LENTE: Componente óptico de un sensor fotoeléctrico que enfoca los rayos de luz emitidos y/o enfoca los rayos de luz sobre el receptor.

LINEALIDAD: cercanía de la curva de respuesta típica de un instrumento o dispositivo a una línea recta.

LONGITUD DE ONDA: Distancia recorrida por la luz al completar una onda sinusoidal completa. Se expresa en nanómetros (nm). Cada color tiene una longitud de onda específica.

MARGEN DE DETECCIÓN: La distancia entre el emisor y el receptor, que puede discriminar variación de la señal.

NANÓMETRO (nm): Unidad de longitud utilizada para especificar la longitud de onda de la energía luminosa. $1 \text{ nm} = 0,00000001\text{m} (10^{-9} \text{ m})$. Algunas longitudes de onda típicas son: LED rojos, 650 nm; LED verdes, 560 nm; LED infrarrojos, 880 ó 940 nm.

OPTO-ELECTRÓNICA: La optoelectrónica es el nexo de unión entre los sistemas ópticos y los sistemas electrónicos. Los componentes opto-electrónicos son aquellos cuyo funcionamiento está relacionado directamente con la luz.

POTENCIA OPTICA: Potencia o intensidad de la luz proyectada disponible desde un emisor específico; intensidad del haz.

RADIO DE CURVATURA MÍNIMO: Radio mínimo de curvatura que puede soportar un paquete de fibras ópticas sin que se rompan las fibras.

RECEPTOR: Componente electrónico, sensible a la intensidad de la luz o a ondas ultrasónicas, que se combina con circuitos asociados y dispositivos de salida.

REFRACCIÓN: “Desviación” de los rayos de luz al atravesar el límite entre dos medios con índices de refracción diferentes. Por ejemplo, del aire al agua o de aire a un vidrio o plástico.

REFLEXIÓN: Fenómeno que ocurre cuando la luz incide sobre una superficie y es desviada por ésta sin cambiar de medio. La reflexión es especular cuando la superficie es lisa, y difusa cuando la superficie es rugosa°.

RESISTENCIA ELÉCTRICA: Se denomina resistencia eléctrica de una sustancia a la oposición que encuentra la corriente eléctrica durante su recorrido a través de ésta.

NÚCLEO: (core), Es la parte interior de la fibra, que esta fabricado por un material dieléctrico, normalmente vidrio de sílice (SiO_2) dopado con materiales como B_2O_3 , GeO_2 o P_2O_5 para ajustar su índice de refracción, aunque también se encuentran en el mercado fibras ópticas con el núcleo de plástico o cuarzo fundido.

REVESTIMIENTO: (cladding), Envuelve al núcleo, fabricado con materiales similares al núcleo pero con un índice de refracción menor, para que se produzca el fenómeno de la reflexión total interna. Gracias a este fenómeno los rayos de luz que entran en la fibra hasta cierto ángulo, quedan confinados en el núcleo de ésta siendo guiados por la fibra hasta el otro extremo.

SENSOR: Dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal.

SENSOR FOTOELÉCTRICO (FOTODETECTOR): Dispositivo que detecta cambio en la intensidad de la luz.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. GENERALIDADES	20
1.1 LA LUZ	20
1.2 NATURALEZA CUANTICA DE LA LUZ	20
1.3 LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	21
1.3.1 Las ondas luminosas	24
1.4 FIBRA ÓPTICA	24
1.4.1 Tipos de fibra óptica	25
1.4.1.1 Fibra óptica multimodo	25
1.4.1.2 Fibra óptica monomodo	26
1.4.1.3 Fibra óptica de plástico (Plastic Optical Fiber, POF)	27
1.5 TRANSMISIÓN DE SEÑALES EN UNA FIBRA ÓPTICA	27
1.6 SISTEMA DE COMUNICACIÓN	28
1.7 DISEÑOS A IMPLEMENTAR	28
1.7.1 Sistema a implementar	29
1.7.2 Pruebas preliminares	31
2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA EL SISTEMA	34
2.1 SELECCIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA	36
2.2 APERTURA NUMERICA, ÁNGULO DE ACEPTACIÓN	38
2.3 PROPAGACION DE AL LUZ	40
2.3.1 REFLECCION TOTAL INTERNA (TIR)	41
2.4 ACOPLAMIENTO CON LA FIBRA	41
2.5 DISPERSION	42
2.5.1 Dispersión modal	42
2.5.2 Dispersión Cromática	43
2.6 ATENUACION	43
2.7 EMISOR ÓPTICO (FOTO-EMISOR)	47
2.7.1 Eficiencia.	47
2.7.2 Led	47
2.8 DESARROLLO DE CONECTORES.	52
3. CALCULO DE DISEÑO	55
3.1 EL ÁNGULO CRÍTICO	55
3.2 DISEÑO DEL CIRCUITO DE EXITACION PARA LA FUENTE ÓPTICA	55
3.3 DISEÑO DEL CIRCUITO FOTO-RECEPTOR	57
3.3.1 Foto-receptor	57
3.3.4 Tratamiento de los datos.	68
3.4 COLIMACIÓN	70
3.4.1 Distancia Focal	71
3.5 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL	71

3.6 PROCESAMIENTO Y VISUALIZACIÓN	72
4 PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR	73
5 RESULTADOS	75
6 POBLEMAS ENCONTRADOS Y SOLUCIONES ADOPTADAS	76
7 CONCLUSIONES	86
8 RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFIA	89
ANEXOS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. El espectro electromagnético	21
Figura 2. Onda luminosa con el campo eléctrico vertical y el campo magnético Horizontal	22
Figura 3. Efecto Fotoeléctrico	23
Figura 4. Parámetros importantes en una onda.	24
Figura 5. Fibra óptica multimodo de salto de índice	26
Figura 6. Fibra óptica multimodo de índice gradual	26
Figura 7. Fibra óptica monomodo	26
Figura 8. Fibra óptica de plástico	27
Figura 9. Regla metálica utilizada en la medición de nivel de combustible en Depósitos de 5000 galones	30
Figura 10. Diagrama de bloques funcionales del circuito sistema de detección Del nivel de combustible implementado.	30
Figura 11. Conector fibra óptica de 1.50 m	32
Figura 12. Adecuación de la fibra para el conector	32
Figura 13. Proceso de corte de la fibra	33
Figura 14. Secado del epóxido aplicado al conector (horno de secado)	33
Fig. 15. Avisos de precaución localizados en estaciones de gasolina	35
Figura 16. a) Tanque de almacenamiento de combustible b) modelo prototipo	36
Figura 17. Fibra óptica plástica seleccionada	36
Fig. 18. Atenuación espectral de una POF junto con la respuesta de dos tipos de transmisores típicos.	38
Figura 19. Angulo de aceptación	39
Figura 20. Relación entre la Apertura Numérica de la fibra óptica y el sistema focal	39
Figura 21. Curva típica de atenuación en la fibra	46
Figura 22. Comparación resultado de transmisión de la señal de dos frecuencias diferentes a una misma potencia óptica a través de la fibra	
a) fuente 1 led 2R3BSKNT b) fuente 2 led rojo.	51
Figura 23. Conector desarrollado: Foto emisor - Fibra Óptica	52
Figura 24. Conector desarrollado: Foto receptor - Fibra Óptica	53
Figura 25. Conector: Lente de colimación - Fibra Óptica	53
Figura 26. Flotador	54
Figura 27. Acople: Fibra Óptica – Deposito	54
Figura 28. Diodo emisor de luz con la unión polarizada en sentido directo	56
Figura 29. Vista del sensor fotoeléctrico dentro del conector	57
Figura 30: Variación de resistencia (LDR) en función de la longitud de onda de la radiación.	58
Figura 31. Circuito Foto-detector Implementado	59
Figura 32. Respuesta del circuito fotodetector para R2=1k	61
Figura 33. Respuesta del circuito foto-detector para R2= 2K	61
Figura 34. Respuesta del circuito foto-detector para R2=10K	62

Figura 35. Respuesta del circuito foto-detector para R2=20K	62
Figura 36. Respuesta del circuito fotodetector para R2=40K	62
Figura 37. Respuesta del circuito foto-detector para R2=50K	63
Figura 38. Respuesta del circuito foto detector para R2=60k	63
Figura 39. Respuesta del circuito foto detector para R2=70k	63
Figura 40. Respuesta del circuito foto-detector para R2=100k	64
Figura 41. Respuesta del circuito foto-detector para R2=150K	64
Figura 42. Respuesta del circuito foto-detector para R2=200k	64
Figura 43. Respuesta del circuito foto-detector para R2=220k	65
Figura 44. Respuesta del circuito foto detector para R2=250k	65
Figura 45. Respuesta del circuito foto detector para R2=300k	65
Figura 46. Respuesta del circuito foto-detector para R2=350k	66
Figura 47. Respuesta del circuito foto-detector para R2=400k	66
Figura 48. Respuesta del circuito foto-detector para R2=500k	66
Figura 49. Respuesta del circuito foto-detector para R2=600k	67
Figura 50. Respuesta del circuito foto-detector para R2=1000k	67
Figura 51. Representación gráfica de intensidad luminosa (lux) vs Voltaje (V)	69
Figura 52. Regresión lineal para la gráfica de intensidad luminosa (lux) vs Voltaje	69
Figura 53. Principio de colimación	70
Figura 54. Implementación de la lente para colimación de la señal óptica a) Vista lateral b) vista frontal.	70
Figura 55. Circuito de acondicionamiento de señal	71
Figura 56. Microprocesador PIC16f877	72
Figura 57. LCD utilizado para la presentación de resultados	73
Figura 58. Programación del PIC 16f877, despliegue mensaje de bienvenida	74
Figura 59. Programación del PIC 16f876, conversión analógica digital	74
Figura 60. Certificador de Patch Cords	76
Figura 61. Acople fuente-fibra óptica multimodo, para transmisión de señal IR	77
Figura 62. Resultado de la transmisión de señal IR, por la Fibra Óptica	77
Figura 63. Sistema de anestesia, donde se tiene un sensor de flujo que utiliza el principio,transmisión óptica.	78
Figura 64. Sensor de Flujo	78
Figura 65. Principio de Deteccion de Oximetria	79
Figura 66. sensor con el cual se efectuo las pruebas	79
Figura 67. Fuente Óptica Utilizada, LED de 5mm	80
Figura 68. Sensor Óptico de Distancia por Reflexión	80
Figura 69. Tacómetro Digital	81
Figura 70. Lente bajo Prueba	81
Figura 71. Colimación de señal en Transmisiones Ópticas	82
Figura 72. Sensor LDR, Dentro del Conector Diseñado	82
Figura 73. Guía para el Movimiento del Flotador	83
Figura 74. Flotador, donde se observa la pestaña de acople con la guía	84
Figura 75. Terminales de la fibra ubicados paralelos	84

Figura 76. Conectores para diferentes diámetros del tubo	85
Figura 77. Medición por Haz Transmitido	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación NA y Sistema Focal	40
Tabla 2. Color generado por algunos compuestos de Galio	48
Tabla 3. Materiales para la fabricación de un diodo y color obtenido	49
Tabla 4. Caída de tensión e intensidad.	50
Tabla 5. Valores de voltaje obtenidos Para $R2=1K$	60
Tabla 6. Valores de potencia óptica y voltajes obtenidos a la salida del circuito	68

RESUMEN

Este proyecto desarrolla un sistema de comunicación por fibra óptica, basado en el flujo fotónico para detectar el nivel de combustible en un depósito, el sistema no genera riesgo de ignición ya que no se trabaja con corrientes eléctricas dentro de un ambiente que puede resultar explosivo, si no con flujo de luz.

Se genera una señal óptica en el módulo transmisor, a partir de un diodo emisor, LED) cuyo espectro de emisión está ubicado dentro de la luz visible, ésta señal es acoplada a una fibra óptica plástica (FOP) de diámetro de núcleo 5 mm, la cual es el medio que conduce la luz desde el transmisor hasta el depósito y de regreso de éste, el dispositivo trabaja bajo el principio de haz transmitido es decir que al salir el haz de luz de la fibra es colimado por lentes especiales las cuales se diseñaron, dichas lentes permiten mayor alcance de la señal, la diferencia de este sistema con los sistemas de comunicación tradicionales que usan fibra óptica es que la luz “sale” de la fibra, se transmite a través de otro medio, en este caso el aire, hasta llegar a ser colimada por una lente, e inyectada de nuevo a otra fibra que la conduce al módulo receptor, donde es procesada.

Como se dijo al salir la luz de la primera fibra, esta es colimada por una lente especial, que la acopla a la segunda fibra para que el sistema tenga mayor alcance y la señal tenga la potencia óptica suficiente para ser acoplada dentro de la fibra. Se trabajó con fibra óptica plástica, que presenta las mejores características de desempeño en sensores fotoeléctricos, para el acople de la señal desde el emisor a la fibra no se utiliza acopladores comerciales, estos fueron fabricados para que cumplieran con las especificaciones del sistema. La señal de luz es inyectada a la segunda fibra calculando el punto focal de la lente, así se ubica la fibra en este punto, permitiendo que ésta señal tenga una potencia suficiente para ser sensada a la salida de la fibra por un fotodetector, cuyo circuito adjunto genera un cambio de voltaje proporcional a la luz recibida, se realiza el análisis del circuito para obtener el mejor resultado, posteriormente el voltaje obtenido a la salida del circuito foto-receptor es acondicionado a los niveles requeridos para ser adquiridos y procesado por el microcontrolador PIC16F877 que cumple con la tarea de muestreo, conversión y finalmente la señal digitalizada es procesada para que pueda ser mostrada en un display LCD, donde se obtiene el valor de la distancia que representa el nivel de combustible.

Palabras clave: fibra óptica, luz, espectro electromagnético, sensores fotoeléctricos.

ABSTRACT

In this project development a system of communication by optical fiber, based on the photon flow to detect the fuel level in a deposit, the system does not generate ignition risk since it does not work with electrical currents within an atmosphere that can be explosive, works with light flow.

An optical signal is generated in a modulate transmitter, from an emitting diode LED whose phantom of emission is located within the visible light, this one signal is connected to a plastic optical fiber (FOP) of diameter of core 5 mm, which it is the means that lead the light from the transmitter to the deposit and of return of this one, the device works under the principle of transmitted beam that is to say, that when leaving the beam light of the fiber is sighted on by special lenses which were designed, these lenses allow greater reach of the signal, the difference of this system with the traditional systems of communication that use optical fiber is that the light “leaves” the fiber, is transmitted through another means, in this case the air until arriving to be sighted on by a lens, and injected sprout to another fiber that leads it to a modulate receiver, where it is processed.

As the light were said when leaving the fiber it is sighted on by a special lens, that it allows that the system has greater reach and the signal has the optical power sufficient to be connected within the fiber. Work with plastic optical fiber since it presents displays the best characteristics of performance in photoelectric sensors, for is reconciled of the signal from the emitter to the fiber is not used commercial couplers, these were made so that they fulfilled the specifications of our system. The light signal is injected to the second fiber having calculated the focal point of the lens, therefore the fiber in this point is located, which allows, that this one signal, when coming out has a power sufficient to be sensada of the fiber by a photodetector, whose attached circuit generates a change of proportional voltage to the received light. The obtained voltage when coming out of the photo-receiving circuit it is prepared at the required levels to be acquired and processed by the microcontroller PIC16F877 who finally fulfills the task of sampling, conversion and the digitized signal is processed so that it can be shown in display LCD, where obtains the value of the distance that represents the fuel level.

INTRODUCCIÓN

En años 40 del siglo XIX, el físico suizo Daniel Collodon y el francés Jacques Babinet, demostraron que la luz podía guiarse a lo largo de los chorros de agua de una fuente. John Tyndall popularizó la idea en 1854 en base a un experimento que usaba un chorro de agua fluyendo desde un tanque.

Un paso fundamental en la consecución definitiva de las comunicaciones por fibra óptica fue el descubrimiento del láser por Theodore Maiman. En el año 1962 ya se realizaron los primeros láseres semiconductores.

La primera prueba se realizó en AT&T en Atlanta en 1976. El servicio comercial comenzó al año siguiente en Chicago, donde un sistema de fibra óptica transportaba voz, datos y señales de vídeo a través de 2,4 km de cables subterráneos que conectaban dos oficinas de conmutación de la compañía telefónica de Illinois Bell Telephone Company. Estas primeras generaciones de sistemas podían transmitir luz a varios kilómetros sin repetidor, pero estaban limitadas por una atenuación de aprox. 2 dB/km.

La fibra de dispersión desplazada (DSF), se introdujo en 1985, y anunció una nueva era en las comunicaciones ópticas. Uniendo el mínimo de atenuación en la ventana de 1,550nm con dispersión cero en la misma longitud de onda, mayores velocidades de datos podrían llevarse a distancias mayores.

En 1990, los Laboratorios Bell transmiten una señal de 2.5 Gb/s a través de 7.500 km sin regeneración. El sistema usaba un láser solitón y un amplificador EDFA que permitía a la onda de luz mantener su forma y densidad. En 1998, los mismos laboratorios Bell transmitieron 100 señales ópticas de 10 Gb/s por una sola fibra de 400 km. En este experimento, gracias a las técnicas WDM (wave-division multiplexing) que permite combinar múltiples longitudes de onda en una sola señal óptica, se incrementó la capacidad de transmisión de una fibra en un terabit por segundo (10^{12} b/s).

En la década de los 90 tuvo lugar un increíble crecimiento de la necesidad de la capacidad en las comunicaciones, tanto en términos de velocidad como en cobertura geográfica. La transmisión de TV digital, voz, datos, la telefonía móvil y la aparición del fenómeno Internet han hecho que el tráfico de la información requiera de medios de elevada capacidad. Las fibras ópticas en el campo de las comunicaciones se empezaron a aplicar en telefonía de voz, pero actualmente están presentes total o parcialmente en cualquier sistema de comunicación.

Estos avances en el ámbito de las comunicaciones ópticas alentaron para trabajar un campo tan importante como el sensado, desarrollando un sistema de comunicación por

fibra óptica cuya finalidad es detectar el nivel de combustible presente en un depósito y que dicho sensor de fibra óptica pudiera ser llevado a cabo con los materiales y la tecnología disponible, presentando un aporte para quien entra en el mundo de la fibra óptica y su implementación en ambientes no convencionales.

El documento inicia tratando conceptos básicos sobre fibra óptica, luego de realizar la descripción general del sistema, pasa a explicar el diseño llevado a cabo, describe el proceso de experimentación y desarrollo de la programación del microcontrolador, se presenta finalmente los resultados obtenidos y finalmente se presentan las correspondientes conclusiones y recomendaciones que surgen durante la ejecución y culminación de este proyecto.

Cabe resaltar la importancia del sistema desarrollado ya que permite la introducción, a esta nueva tecnología de tan variadas aplicaciones como lo es la fibra óptica, se sienta un precedente que impulsará en la UDEAR la investigación acerca de las comunicaciones ópticas.

1. GENERALIDADES

1.1 LA LUZ¹

Al principio se creyó que la luz era una serie de partículas que se desplazaban en una misma dirección dando lugar a lo que se conoció como rayo óptico u óptica geométrica, es así como surgieron las leyes de Snell (1621) y Fermat (1650). Se avanzó y en 1815 Fresnel sugiere la óptica de onda, es decir, ahora la onda era un frente plano donde si $\lambda \leq$ objeto funciona esta teoría como función de onda escalar. Sin embargo a esta teoría le faltan los fenómenos de polarización de luz, pero Maxwell dio solución a este problema en 1860. Cuando $\lambda \gg$ objeto, ninguna de las tres teorías explica los fenómenos asociados. Surge la óptica cuántica y define que la luz está formada por fotones que tienen comportamiento de onda, es la teoría de dualidad onda-corpúsculo.

1.2 NATURALEZA CUANTICA DE LA LUZ

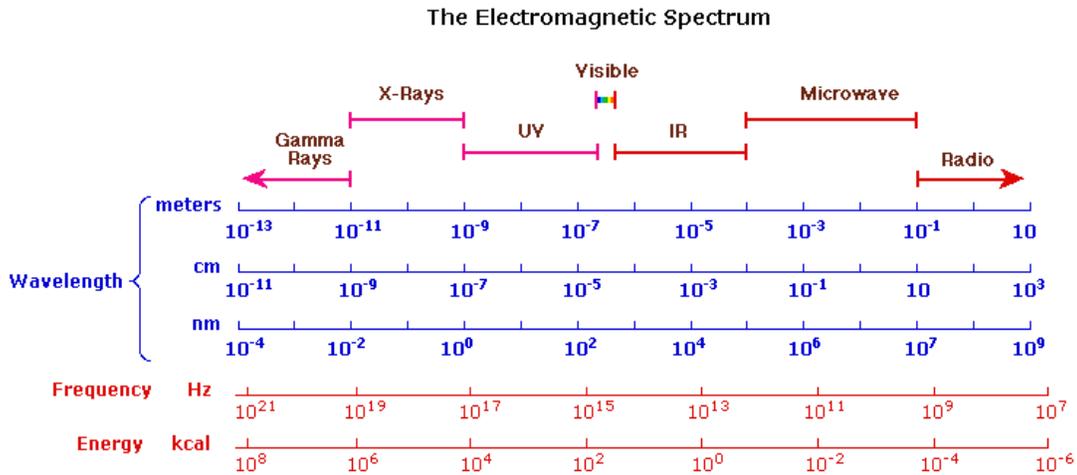
La teoría electromagnética clásica no podía explicar la emisión de electrones por un conductor cuando incide luz sobre su superficie, fenómeno conocido como efecto fotoeléctrico. Este efecto consiste en la emisión espontánea de electrones (o la generación de una diferencia de potencial eléctrico) en algunos sólidos (metálicos o semiconductores) irradiados por luz. Fue descubierto y descrito experimentalmente por Heinrich Hertz en 1887 y suponía un importante desafío a la teoría electromagnética de la luz. En 1905, el físico Albert Einstein presentó una explicación del efecto fotoeléctrico basándose en una idea propuesta anteriormente por Planck para la emisión espontánea de radiación lumínica por cuerpos cálidos y postuló que la energía de un haz luminoso se hallaba concentrada en pequeños paquetes, que denominó cuantos de energía y en el caso de la luz se denominan fotones. El mecanismo del efecto fotoeléctrico consistiría en la transferencia de energía de un fotón a un electrón. Cada fotón tiene una energía proporcional a la frecuencia de vibración del campo electromagnético que lo conforma. Posteriormente, los experimentos de Millikan demostraron que la energía cinética de los fotoelectrones coincidía exactamente con la dada por la fórmula de Einstein.

El punto de vista actual es aceptar el hecho de que la luz posee una doble naturaleza que explica de forma diferente los fenómenos de la propagación de la luz (naturaleza ondulatoria) y de la interacción de la luz y la materia (naturaleza corpuscular). Esta dualidad onda/partícula, postulada inicialmente para la luz, se aplica en la actualidad de manera generalizada para todas las partículas materiales y constituye uno de los principios básicos de la mecánica cuántica.

¹ DE LEON GUERRERO, Rubén, Comunicaciones Ópticas. E.T.S.I.T UPM, Madrid 2004-2005

1.3 LA RADIACION ELECTROMAGNETICA

Figura 1. El espectro electromagnético



Algunos conceptos básicos.

La radiación electromagnética está formada por fotones.

Cada fotón lleva asociada una energía que se caracteriza por su longitud de onda según la ecuación

$$E = hc / \lambda \quad (1)$$

donde

E = energía del fotón

c = velocidad de la luz $3 \cdot 10^8$ m/s

h = constante de Planck

λ = longitud de onda del fotón.

El numerador de la expresión de la energía es una constante. Por eso, la energía de un fotón es mayor cuanto menor sea la longitud de onda, que se encuentra en el denominador. La luz, como tal, es una parte de la radiación electromagnética que es capaz de excitar las células de la retina del ojo. La radiación electromagnética abarca un concepto más general. León Foucault probó experimentalmente en 1850 que la velocidad de la luz es menor en un medio denso que en el vacío, obteniendo que el factor en el que se reduce esta velocidad al entrar a un cuerpo transparente es justamente el valor del índice de refracción. Así, se puede escribir:

$$c / v = n \quad (2)$$

Donde v es la velocidad de la luz en el medio y c es la velocidad de la luz en el vacío.

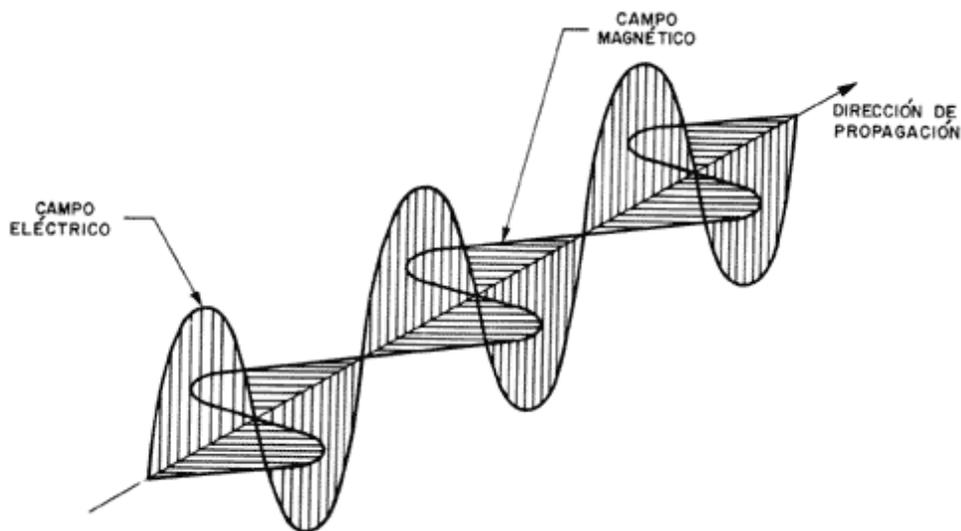
En 1864 ya estaba aceptada la teoría ondulatoria; sin embargo, era completamente desconocido el tipo de onda que era la luz. En este año el físico escocés James Clerk

Maxwell (1831-1879) planteó su teoría electromagnética de la luz, con ella probó que la luz es una onda electromagnética transversal de la misma naturaleza de las ondas de radio, que aún no se habían descubierto, diferenciándose de éstas sólo en que su frecuencia es mucho mayor, como se muestra en la figura 2. Maxwell tuvo tanto éxito con su teoría que pudo explicar cualitativa y cuantitativamente todos los fenómenos luminosos conocidos entonces y aun predecir otros más. L. Obtuvo el valor de la velocidad en el vacío calculándola teóricamente a partir de constantes eléctricas conocidas del vacío.

En 1883, Gustav Kirchhoff (1824-1887) derivó en Berlín su teoría escalar de la difracción; Esta teoría se puede considerar como una aproximación a la de Maxwell o como una mejoría de la de Fresnel. Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) en 1886 en Alemania demostró experimentalmente la existencia de las ondas de radio, confirmando así sin lugar a dudas la teoría electromagnética de Maxwell.

Al calentarse un cuerpo cualquiera emite luz, generalmente no monocromática, con una distribución de longitudes de onda que se le llama "espectro", este depende tanto de la temperatura como del tipo de material del que esté hecho el cuerpo.

Figura 2. Onda luminosa, con el campo eléctrico vertical y el campo magnético horizontal.

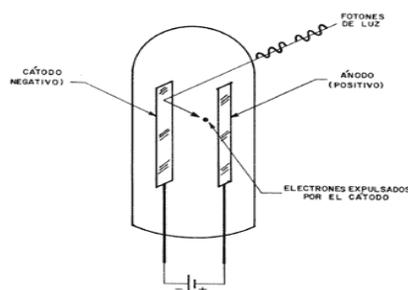


1.3 el efecto fotoeléctrico

H. R. Hertz, descubridor de las ondas de radio, encontró también el efecto fotoeléctrico, que consiste en la expulsión de electrones de un metal cuando incide un haz

luminoso sobre él (Figura 3). La energía cinética de los electrones expulsados era tanto mayor cuanto mayor era la frecuencia de la luz que iluminaba el metal. Ninguna teoría física de la época podía explicar este fenómeno. La explicación satisfactoria tanto cualitativa como cuantitativa de este efecto la dio Albert Einstein, quien postuló que la luz está formada por unas partículas a las que G. N. Lewis llamó fotones en 1923. Los fotones tienen una energía que depende de la frecuencia, de la misma manera que los cuantos de Planck. Esta teoría completaba muy bien la teoría de la radiación del cuerpo negro de Planck. Con esto quedaba bien cimentado por primera vez el concepto de fotón. Esta teoría, fue la que le dio el premio Nobel de física a Einstein en 1905.

Figura 3. Efecto fotoeléctrico.



Se presentaba entonces una dualidad de la luz muy difícil de concebir, pues no podía ser una onda, y al mismo tiempo una partícula. El francés Louis Víctor de Broglie (1892-1987) trata de resolver el enigma afirmando que onda y corpúsculo son solamente dos manifestaciones diferentes del mismo ente, que se presentan según las circunstancias del experimento. Con ello predice entonces que lo que suponemos que son solamente partículas, como los electrones, bajo ciertas circunstancias deben manifestarse como ondas. Debido a esta predicción que se confirmó más tarde, recibió el premio Nobel de física en 1929. De Broglie afirmó que la longitud de onda de la onda asociada a una partícula está dada por:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (3)$$

Donde p es el momento lineal de la partícula. Tratando de demostrar lo anterior, Davidson y Germer hacen pasar un haz de electrones a través de la red de un cristal. Se observó que los electrones producen, al chocar sobre una pantalla después de atravesar el cristal, un patrón similar al producido por una onda que atraviesa una rejilla de difracción.

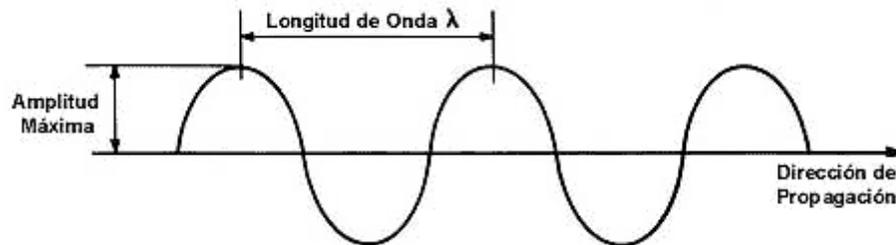
Ahora se sabe que todas las ondas electromagnéticas son de la misma naturaleza y que sólo difieren entre sí por su longitud de onda. La figura 1. muestra el espectro electromagnético completo, con sus longitudes de onda aproximadas. La dualidad onda-

fotón persiste hasta la fecha, así que podemos hablar de la radiación electromagnética tanto en términos de una onda como de un flujo de fotones. El fotón contiene la cantidad más pequeña de energía E que se puede aislar de esta radiación, de frecuencia ν relacionadas por $E = h \nu$. Mientras más grande sea la longitud de onda, más pequeña es la frecuencia y por lo tanto más pequeña la energía E del fotón. Debido a ello, mientras más grande sea la longitud de onda, más difícil será detectar el fotón individualmente. Como consecuencia, las ondas de radio y televisión también están formadas por fotones.

1.3.1 LAS ONDAS LUMINOSAS

En ciertos experimentos, se puede considerar a la luz como una onda transversal, mientras que en otros es necesario considerarla como un flujo de partículas llamadas fotones, cuya energía individual depende de la frecuencia de la onda. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos, sobre todo en aquellos en los que interviene la metrología, es suficiente utilizar el concepto de onda transversal.

Figura 4. Parámetros importantes en una onda.



Conviene recordar varios conceptos y definiciones relacionados con las ondas. Uno de ellos es la longitud de onda λ , que es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos, como se muestra en la figura 4. La frecuencia ν , es el número de oscilaciones en un segundo, estas dos cantidades no son independientes, sino que están relacionadas entre sí por la velocidad v , con la que se propaga la luz. Si el medio en el que viaja la luz es el vacío, esta velocidad se representa por c , y tiene un valor de 299 792 kilómetros por segundo. La fórmula que relaciona estos tres conceptos básicos de una onda es:

$$\lambda \nu = c \quad (4)$$

1.4 FIBRA ÓPTICA

Una FO es una guía de onda dieléctrica cilíndrica formada por dos dieléctricos de distinto n (coeficiente de refracción). Una fibra óptica está compuesta por: un núcleo, a través del cual se propaga la luz, una camisa que garantice la reflexión de la luz y la

mantenga en el núcleo, una vaina que sirva para proteger la propia fibra del ambiente externo.

La luz que recorre la fibra, se refleja por la superficie separando el núcleo de la camisa, ya que el índice de refracción del núcleo es mayor al de la camisa. Para que un rayo pueda entrar en la fibra, es necesario que llegue a la superficie de la fibra con un ángulo de incidencia inferior al ángulo límite, después del cual los rayos entran en la camisa y se dispersan sobre la recubierta de protección.

1.4.1 Tipos de Fibra Óptica². Básicamente existen dos tipos de fibra óptica: multimodo y monomodo. La fibra óptica multimodo es adecuada para distancias cortas, como por ejemplo redes LAN o sistemas de video- vigilancia, mientras que la fibra óptica monomodo está diseñada para sistemas de comunicaciones ópticas de larga distancia.

1.4.1.1 Fibra óptica multimodo. Este tipo de fibra fue el primero en fabricarse y comercializarse. Su nombre proviene del hecho de que transporta múltiples modos de forma simultánea, ya que este tipo de fibra se caracteriza por tener un diámetro del núcleo mucho mayor que las fibras monomodo. El número de modos que se propagan por una fibra óptica depende de su apertura numérica o cono de aceptación de rayos de luz a la entrada. El mayor diámetro del núcleo facilita el acoplamiento de la fibra, pero su principal inconveniente es que tiene un ancho de banda reducido como consecuencia de la dispersión modal. Los diámetros de núcleo y cubierta típicos de estas fibras son 50/125 y 62,5/125 micrómetros.

Existen dos tipos de fibra óptica multimodo: de salto de índice o de índice gradual. En el primer caso, existe una discontinuidad de índices de refracción entre el núcleo ($n_1 = \text{cte}$) y la cubierta o revestimiento de la fibra ($n_2 = \text{cte}$). Por el contrario, en el segundo caso la variación del índice es gradual. Esto permite que en las fibras multimodo de índice gradual los rayos de luz viajen a distinta velocidad, de tal modo que aquellos que recorran mayor distancia se propaguen más rápido, reduciéndose la dispersión temporal a la salida de la fibra.

²DE LEON GUERRERO, Rubén, Comunicaciones Ópticas. E.T.S.I.T UPM, Madrid 2004-2005

Figura 5. Fibra óptica multimodo de salto de índice

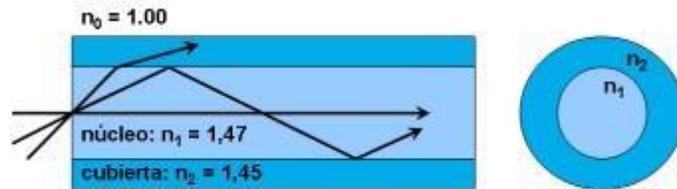
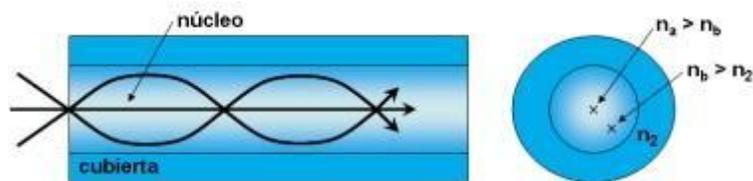
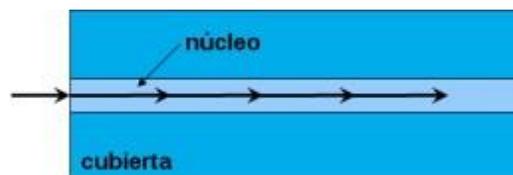


Figura 6. Fibra óptica multimodo de índice gradual



1.4.1.2 Fibra óptica monomodo. Las fibras ópticas monomodo tienen un diámetro del núcleo mucho menor, lo que permite que se transmita un único modo y se evite la dispersión multimodal. Los diámetros de núcleo y cubierta típicos para estas fibras son de 9/125 micrómetros. Al igual que las fibras multimodo, las primeras fibras monomodo eran de salto de índice, en la actualidad existen diseños bastante más complejos del perfil de índice de refracción que permiten configurar múltiples propiedades de la fibra. Las fibras monomodo también se caracterizan por una menor atenuación que las fibras multimodo, aunque como desventaja resulta más complicado el acoplamiento de la luz y las tolerancias de los conectores y empalmes son más estrictas. A diferencia de las fibras multimodo, las fibras monomodo permiten alcanzar grandes distancias y transmitir elevadas tasas de bit, las cuales vienen limitadas principalmente por la dispersión cromática y los efectos no lineales.

Figura 7. Fibra óptica monomodo



1.4.1.3 Fibra óptica de plástico (Plastic Optical Fiber, POF)

Figura 8. Fibra óptica de plástico



Las fibras ópticas de plástico constituyen una solución de bajo costo para realizar conexiones ópticas en distancias cortas, como ejemplo en el interior de dispositivos, automóviles, redes en el hogar, etc. Se caracterizan por unas pérdidas de 0,15-0,2 dB/m a 650 nm y por un ancho de banda reducido como consecuencia de su gran apertura numérica (diámetro del núcleo del orden de 1 mm), ofrecen como ventajas manejo e instalación sencillos y una mayor robustez². las pérdidas que se producen son muy bajas con radios de curvatura de hasta 25 mm, lo que facilita su instalación.

1.5 TRANSMISIÓN DE SEÑALES EN UNA FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica permite la transmisión de señales luminosas y es insensible a interferencias electromagnéticas externas. Cuando la señal supera frecuencias de 10^{10} Hz hablamos de frecuencias ópticas. Los medios conductores metálicos son incapaces de soportar estas frecuencias tan elevadas y son necesarios medios de transmisión ópticos. Por otra parte, la luz ambiental es una mezcla de señales de muchas frecuencias distintas, por lo que no es una buena fuente para ser utilizada en las transmisiones de datos; Son necesarias fuentes especializadas³

Existen dos fenómenos que contribuyen a degradar la información en la fibra. Se tratan de las pérdidas por atenuación al interior de la fibra y de la dispersión en el material.

³ Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” Laboratorio de Redes de Computadores 1 (RDC1+)Práctica N° 2 Atenuación, Ing. Roger A. Ortiz T.

1.6 SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Los sistemas de comunicaciones que utilizan como medio de transmisión la fibra óptica, emplean un medio físico dieléctrico como canal de transmisión. En este tipo de sistemas la información viaja en forma de haces de luz. Debe tenerse en cuenta que la óptica geométrica, resalta que si el diámetro del núcleo de la fibra es mayor con respecto a la longitud de onda de la fuente que se desea utilizar, la luz viajara en forma de rayos de luz, o en ondas Electromagnéticas guiadas si la longitud de onda es comparable con las dimensiones de la fibra, ya que aquí las leyes de la óptica geométrica resultan menos válidas, es necesario utilizar la teoría ondulatoria de la luz.⁴.

En el transmisor se requiere de un transductor de ondas de voltaje y corriente en ondas luminosas, en el receptor se requiere de un transductor de ondas luminosas en ondas de voltaje y corriente. Algunas de las principales ventajas de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica son: eliminación de las interferencias electromagnéticas, aislamiento eléctrico, pérdidas pequeñas, ancho de banda grande, diámetro y peso pequeño, estabilidad en medios severos, etc. Algunas desventajas son: el costo es mayor en un sistema de comunicación por fibra óptica y la construcción de técnicas de transmisión y recepción más complejas. La atenuación de una señal de luz que se propaga a lo largo de una fibra óptica es una consideración importante en el diseño de un sistema de comunicación óptica, ya que juega un papel importante en la distancia máxima de transmisión.

1.7 DISEÑOS A IMPLEMENTAR

Como se va a transmitir señales luminosas, se diseña un circuito electro óptico conformado por un circuito excitador y un LED. A continuación se acopla la señal generada por el LED y la fibra, con ayuda de un conector construido específicamente para esta implementación al llegar al final del cable de fibra óptica la luz viaja por el aire, luego la señal llega a una lente especial que se encarga de colimar la señal óptica para luego inyectarla dentro de una segunda fibra. que la llevará al foto-receptor localizado en el circuito transductor implementado, la señal eléctrica entregada por el transductor es adquirida y procesada por el microcontrolador PIC16f877 para ser desplegada finalmente en una pantalla de cristal liquido. Para la implementación del proyecto se empleó una fibra óptica plástica, con un núcleo de 5 mm, se seleccionó este tipo de fibra puesto que permite acoplamiento de mayor cantidad de luz debido a su mayor apertura numérica en comparación con otros tipos de cable de fibra óptica otra consideración importante tenida en cuenta es que la inserción de la señal dentro de la fibra, no presenta la dificultad que tendría en las fibras monomodo o multimodo de sílice.

⁴JARDÓN AGUILAR Hildeberto, LINARES, Roberto. Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas, México, D.F: Alfaomega, 1995. Cap 6,7 8.

El circuito foto-detector basado en una fotocélula convierte los cambios de nivel óptico a cambios de niveles de voltaje. Estos niveles de voltaje pasan hacia un conversor análogo digital implementado en el microcontrolador.

Uno de los propósitos del sistema desarrollado es facilitar la investigación de aplicaciones relacionadas con la tecnología de la fibra óptica en aplicaciones no convencionales

1.7.1 Sistema a Implementar. El diseño de este sistema de comunicación tiene en cuenta la aparición de la tecnología de la fibra óptica y explora una de las aplicaciones de esta tecnología como es el sensado, desarrollando un sistema que permite determinar el nivel de combustible en un depósito sin que se genere peligro de ignición ya que en lugar de corrientes eléctricas se trabaja con flujo de fotones dentro del depósito de combustible ambiente que puede resultar potencialmente explosivo.

Por tanto se requiere un sistema de transmisión por fibra óptica que permita aprovechar las variaciones de la señal óptica, para relacionarlas con el nivel, dicho sistema deberá cumplir con las siguientes características:

- Transmisión y recepción de una señal óptica
- Conversión electro óptica
- Procesamiento de la señal eléctrica
- Despliegue visual del nivel de combustible

Para cumplir con las características anteriores se escogió la fibra óptica plástica, este tipo de fibra por su factibilidad de manejo, y su mayor diámetro de núcleo trae consigo, menor dificultad en el acople de la señal generada en el foto-emisor, hacia la fibra, mayor apertura numérica (NA), que es proporcional a la cantidad de luz que puede transmitir. La fuente de luz o foto-emisor adecuado para trabajar con fibra óptica plástica es el Led, los ítems de selección se tratan más adelante en este trabajo.

El sistema trabaja de la siguiente manera: se genera una corriente de excitación para la fuente electo-óptica, dicha fuente a su vez produce una señal óptica ubicada en el espectro visible, esta señal se acopla a la fibra óptica, al salir de ésta primera fibra la señal se transmite a través del depósito de combustible, luego es colimada por una lente que permite el acople e inyección a otra fibra del mismo tipo, que la llevara la luz de regreso, desde la sonda al circuito receptor, donde la señal óptica será convertida en una señal eléctrica proporcional a la potencia óptica de llegada, a continuación, la señal se digitaliza y trata en el procesador, de donde se obtiene la información respecto al nivel, que finalmente tras ser procesada se despliega, en una pantalla LCD (Liquid Cristal Display).

Actualmente la medición del nivel de combustible en depósitos con capacidad para 5000 galones se hace por aproximación, empleando para ello una regla metálica con marcas aproximadamente cada 500 galones, este proceso de medición se realiza manualmente; En

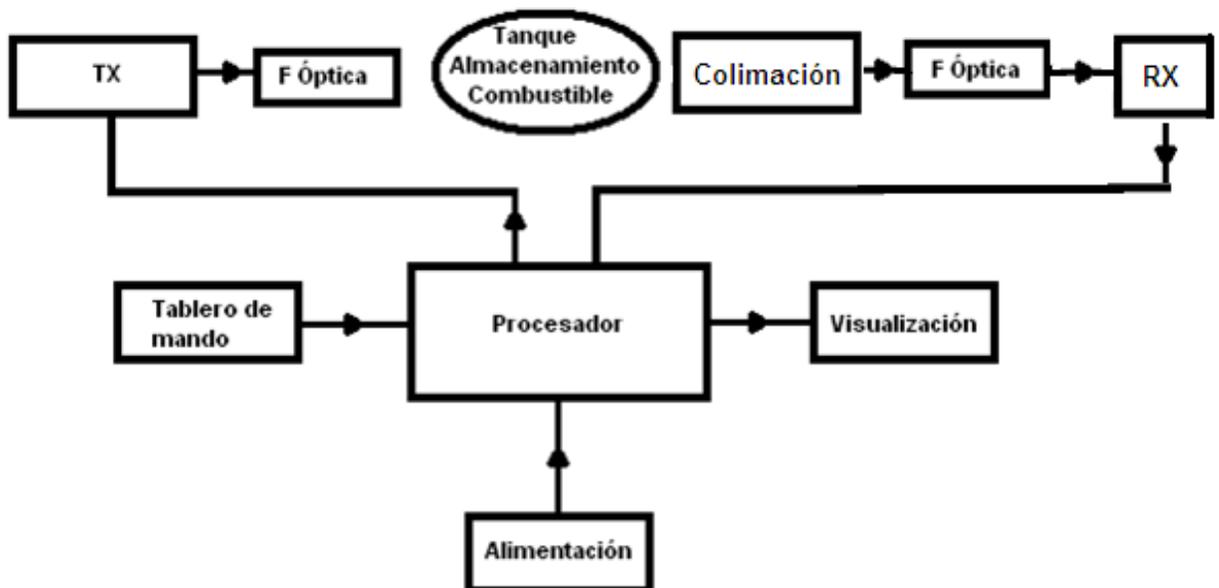
la siguiente figura se muestra la regla utilizada en la medición del nivel.

Figura 9. Regla metálica utilizada en la medición de nivel de combustible en depósitos de 5000 galones



A continuación se muestra el diagrama de bloques que representa el diseño general simplificado. Posteriormente, se explicara en que consiste cada bloque.

Figura 10. Diagrama de bloques funcionales del circuito sistema de detección del nivel de combustible implementado



TX: El transmisor está encargado de crear una corriente que generará la señal luminosa a ser enviada por el sistema.

Fibra Óptica: transporta la luz hacia el depósito de combustible y de regreso de éste hacia el circuito foto-detector.

Colimación: consiste de la disposición de una lente encargada de adecuar la señal proveniente de la primera fibra óptica para ser inyectada en la segunda fibra.

RX: Foto-detector encargado de la generación de la señal eléctrica proporcional a la cantidad de fotones de luz transmitidos.

Procesador: su función es enviar la señal de habilitación del transmisor, ésta señal es adecuada en nivel y potencia previamente. El procesador estará encargado de la adquisición, conversión analógica digital de la señal recibida y su programación nos permite desarrollar la proporcionalidad de dicha señal con el nivel de combustible almacenado.

Tablero de mando: la interfaz de usuario.

Visualización: en esta etapa se presenta la información resultante del nivel desplegada en LCD

Alimentación: etapa encargada de proveer la energía con la cual se alimenta el sistema.

La punta óptica de prueba tiene dos grupos de fibra una es la que lleva la señal óptica emitida y la otra se encarga de llevar la señal de regreso al sistema para ser transformada y medida. El receptor (RX), consiste en un sensor que convierte la cantidad de luz reflejada en una señal eléctrica que es proporcional a la distancia de la punta de prueba hasta la superficie del combustible.

El sistema completo estará en capacidad de sensar y desplegar la información correspondiente del nivel de llenado de un depósito de combustible.

1.7.2 Pruebas preliminares. Para las primeras pruebas se crearon dos conectores de fibra óptica de vidrio, por ser este tipo de fibra de trabajo más rápido y se disponía de ella en la facultad de Ingeniería de la Udenar y se contaba con los equipos para la realización de los conectores.

Para la realización de pruebas preliminares de transmisión de la longitud de onda seleccionada, fue construido un conector de fibra con 1.50 m de longitud, utilizando fibra óptica multimodo, el resultado final se muestra en la siguiente figura.

Figura 11. Conector fibra óptica de 1.50 m



Dicho conector fue utilizado para probar la transmisión de la luz de 940 nm a través de la fibra, este tipo de luz es generada por LED, esto se explica más adelante en el documento.

El proceso de fabricación del conector:

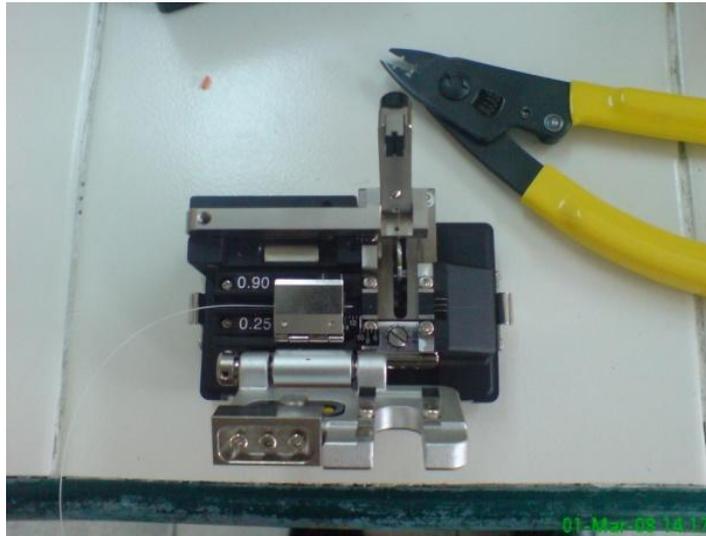
1. Se deja el núcleo al descubierto con las dimensiones adecuadas para la utilización del conector.

Figura 12. Adecuación de la fibra para el conector



2. Seguidamente se hace el proceso de corte se ve en la siguiente figura.

Figura13. Proceso de corte de la fibra



Luego es instalado el conector, y se procede al secado del epóxico en un horno a temperatura promedio de 70 grados centígrados, para este paso fue necesario un tiempo de secado de una hora.

Figura 14. Secado del epóxido aplicado al conector (horno de secado)



Finalmente es cortada la parte de la fibra que sobresale del conector, se hace su pulido con las lijas de 5 y 3 micrones respectivamente siguiendo el símbolo del infinito, hasta obtener los parámetros requeridos los cuales se verificaron con la ayuda del microscopio.

Con las pruebas preliminares se logró transmitir una señal correspondiente al infrarrojo cercano por una de las fibras, pero no fue posible traer la señal de regreso por la segunda fibra ya que la poca señal a la salida de la fibra, no se logró colimar para ser insertada en la segunda fibra y los conectores presentan gran dificultad para acoplar la señal de un LED infrarrojo a la fibra óptica de sílice; otro factor de influencia negativa fue la atenuación causada por los iones hidroxil, presentes en mayor cantidad en la fibra óptica plástica estos son causantes de la gran atenuación sufrida por la señal a esta longitud de onda particular 940nm con ancho espectral de 40nm; de este modo surge un inconveniente en el desarrollo del proyecto, se realizaron pruebas con diferentes materiales para lograr la reflexión y la inserción de la señal en la fibra pero no se obtuvo buenos resultados, así que fue necesario un cambio con respecto a la idea de aprovechar la característica y las propiedades de revote de las señales de infrarrojo.

2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA EL SISTEMA

En este caso siendo el ambiente de aplicación un ambiente volátil, fue ideado en construir un sistema que permita determinar el nivel de combustible de un depósito sin generar riesgo de ignición, y es posible ya que lo que se transmite en el medio es luz, no corrientes eléctricas (flujo de electrones), es conocido que una falla, un corto circuito en un componente electrónico o una sobretensión puede generar chispa si hace contacto con ambientes volátiles pueden desencadenar una tragedia.

El sistema diseñado funciona precisamente para evitar esa posibilidad. La onda electromagnética es generada por una fuente que no está presente en el depósito de combustible, esta onda es acoplada a la fibra que la transmite hacia el depósito de combustible; al salir de la fibra la luz se encuentra con una lente que permite ser colimada, para hacerla incidir en otra fibra que la lleva hasta el sistema receptor, allí es proporcionalmente convertida en tensión eléctrica por el circuito transductor adjunto al foto-receptor, este valor variable, de tensión es adquirido y procesado por el PIC16f877 el cual comanda el despliegue gráfico de la información obtenida en un display de cristal líquido, el código del programa fue escrito y compilado en MPLab ide v7.6, y la simulación se realizó en Isis Proteus v6.

Fig. 15. Avisos de precaución localizados en estaciones de gasolina.



Otra posibilidad fue medir el tiempo de reflexión de la onda principio utilizado por los sistemas de medición de atenuación y pérdidas ópticas OTDRs (optical time domain reflectometers) que se basan en la medición de la pérdida de potencia óptica debido a las imperfecciones moleculares en la construcción de la fibra y a la falta de pureza óptica, pero fue descartada, por cuanto al medir la velocidad de retorno de la luz y relacionarla con la distancia recorrida, para saber el nivel, es una tarea muy difícil porque la respuesta del procesador no es lo suficientemente rápida, razón por la cual los OTDR tienen una zona ciega que corresponde a los primeros metros de la red de fibra óptica muy amplia.

Para el desarrollo del sistema fue construido un tanque de almacenamiento prototipo, que permite modelar las condiciones de los depósitos existentes, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 16.a) Tanque de almacenamiento de combustible b) modelo prototipo

a)



b)



2.1 SELECCIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

Figura 17. Fibra óptica plástica seleccionada



La mayoría de los sistemas de fibra óptica para comunicaciones usan fibra óptica de sílice, por la gran distancia que se puede conseguir alrededor de 50 km sin amplificación.

Para sistemas de sensores o para aplicaciones industriales la fibra utilizada es fibra óptica plástica, debido a su gran versatilidad y resistencia; Entre las características principales que se pueden aprovechar en estos sistemas se encuentra su radio de curvatura de 30cm aproximadamente, que brinda gran versatilidad para su manejo, además se puede instalar junto a redes de alta tensión muy comunes en ambientes industriales, que no afecta ni genera interferencia electromagnética.⁵

Otro aspecto importante en la decisión de la utilización de este tipo de fibra, es que el ajuste de la señal y los conectores no exigen la precisión requerida para los sistemas de fibra óptica de sílice, lo cual fue aprovechado en este sistema particular, por cuanto la luz debe salir de la fibra, posteriormente ser colimada y finalmente insertada de nuevo en otra fibra que la lleva de regreso, para ser analizada en el sistema electrónico; Es importante anotar que los conectores utilizados en el desarrollo del proyecto fueron diseñados para esta aplicación buscando optimizar la transmisión de la señal óptica la construcción fue realizada en material plástico.

El conector diseñado encierra la fibra dentro del emisor para poder acoplar la potencia óptica que emite la fuente a la fibra y así producir las menores pérdidas.

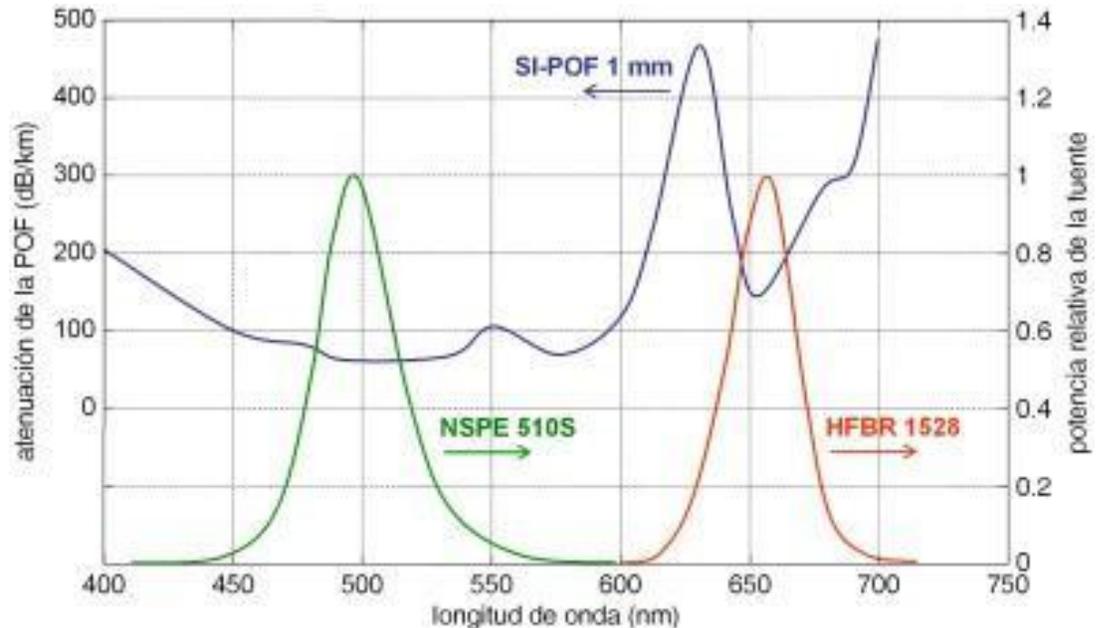
El material típico utilizado en las POF es PMMA (acrílico) o Polimetacrilato de Metilo como núcleo, junto con una cubierta de polímero fluorado. Las POF utilizadas para la transmisión poseen un diámetro mucho mayor que el resto de fibras: típicamente 980/1000 nm. Esto proporciona un área de núcleo equivalente a un 96% de la sección cruzada. Debido a este gran diámetro, la transmisión es posible incluso si los extremos de la fibra están levemente dañados o si el eje de transmisión de la luz se encuentra ligeramente desplazado del centro⁵.

Como inconveniente, sus pérdidas de transmisión son mucho mayores que en el caso de la fibra estándar de sílice, lo cual limita su utilización en transmisiones de larga distancia.

En la figura 16, se muestra la atenuación de una FOP en función de la longitud de onda. Normalmente se utiliza como transmisor un LED, pues además de proporcionar seguridad al encontrarse en el espectro visible, dichas longitudes de onda se utiliza en un gran número de fuentes ópticas. Esto proporciona una atenuación de unos 0,15 dB/m, por lo que los alcances se reducen en un factor 1000 con respecto a la fibra monomodo estándar de 9/125 micrómetros trabajando a 1550 nm.

⁵BRADLEY Allen, Sensores Fotoeléctricos. [en línea]. Enero de 2000. Disponible en internet <[http:// www.ab.com](http://www.ab.com)>

Fig. 18. Atenuación espectral de una POF junto con la respuesta de dos tipos de transmisores típicos.

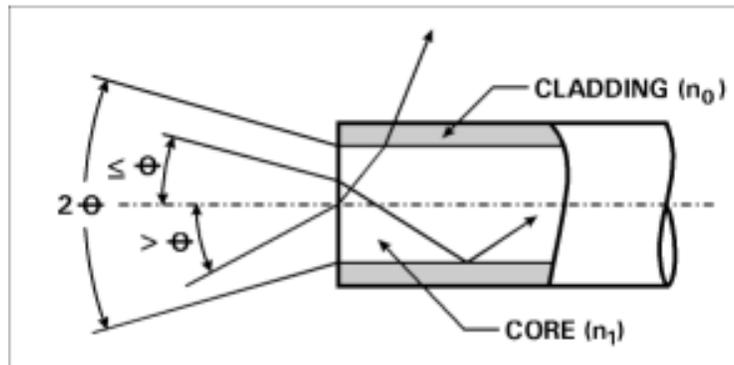


2.2 APERTURA NUMERICA, ÁNGULO DE ACEPTACIÓN⁶.

Todas las fibras tienen un ángulo de aceptación definido. El seno del ángulo de aceptación en el aire es conocido como la Apertura Numérica (AN). La AN de una fibra y también su ángulo de aceptación, está determinado por la relación del índice de refracción del núcleo y de la revestimiento. Los rayos que entran a la fibra a un ángulo mayor que la AN pueden no ser reflejados internamente, y pueden pasar a través o ser absorbidos por el revestimiento de la fibra, entonces estos rayos se pierden. Los rayos que entren a la fibra a un ángulo igual o menor que el ángulo de aceptación serán reflejados internamente y pueden propagarse a través de la fibra.

⁶ RYER, Alex, Light Measurement Handbook. International light Inc. [en línea]. 1998 Disponible en internet: < <http://www.intl-light.com/handbook/> >

Figura 19. Angulo de aceptación

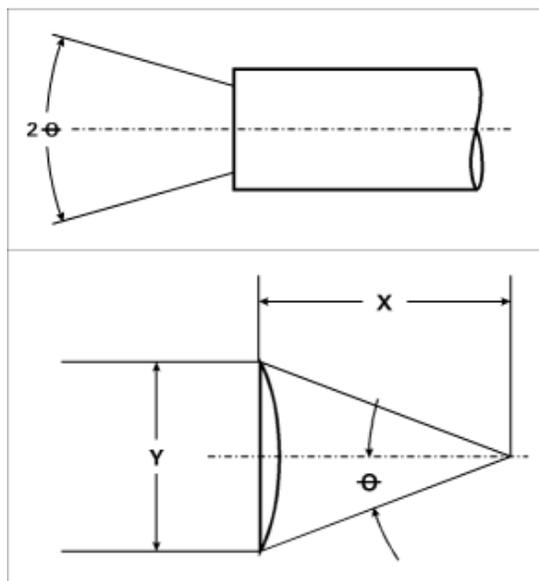


El ángulo de aceptación viene dado por la siguiente ecuación

$$NA = \sin\theta = \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \quad (5)$$

Es esencial considerar el ángulo de aceptación en el diseño con fibra óptica. Este es necesario para encontrar el cono focal, para la entrada o la salida de la señal en la fibra, y así asegurar el óptimo desempeño del sistema.

Figura 20. Relación entre la Apertura Numérica de la fibra óptica y el sistema focal



$$f/\# = Y/X \quad (6)$$

$$\tan \Theta = Y/2X$$

$$\sin^{-1} (NA) = \Theta = \tan^{-1} [1/2(f/\#)]$$

La figura 21, ilustra la relación entre la Apertura Numérica de la fibra óptica y el sistema focal, la siguiente tabla da una referencia para relacionar f/#s estándar y NAs.

TABLA 1. Relación NA y Sistema Focal

f/#s	Angulo De Aceptación	NA
f/1	51.13°	0.45
f/2	28.07°	0.24
f/4	14.25°	0.12
f/8	7.15°	0.06

En el desarrollo del presente trabajo se determinó la apertura numérica, posteriormente el ángulo de aceptación, para conseguir que los rayos entrantes a la fibra con igual o menor ángulo sean transmitidos a través de ella, esto se asegura encontrando el punto focal de la lente de colimación que se dispone, para garantizar la entrada de la señal óptica en la fibra.

2.3 PROPAGACION DE AL LUZ⁷

Para definir los mecanismos de propagación de la luz a través de la fibra óptica, se usara la óptica geométrica. Esta aproximación es suficiente para analizar las principales características de la fibras como medio de transmisión de un sistema. La óptica geométrica considera la luz como rayos angostos

⁷JARDÓN AGUILAR, Hildeberto, LINARES, Roberto. Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas, México, D.F: Alfaomega, 1995. Cap 6,7 8.

2.3.1 Reflexión total interna (TIR). Las ondas electromagnéticas, antes de entrar en el interior de la fibra, son transmitidas a través del aire que tienen un índice de refracción mayor al núcleo sobre el que deben incidir; Interesa es que el rayo incidente sobre el núcleo sea refractado de forma que a continuación incida con un ángulo superior al ángulo crítico en el cladding, las ondas serán reflejadas al medio del que provenían (núcleo) para producir la reflexión total interna (TIR) y la onda sea transmitida ⁸.

2.4 ACOPLAMIENTO CON LA FIBRA

Una característica importante de la fibra óptica es su capacidad de coleccionar luz emitida por la fuente. Cuando se acopla una fuente a una fibra se presentan dos mecanismos de pérdidas, uno de ellos está relacionado al desacoplamiento de área y otro está relacionado con la apertura numérica.

Para disminuir los efectos del primer mecanismo fue seleccionada una FOP de 5mm, que coincide con la fuente óptica, (Led) es también de 5mm, además para reducir este problema la fuente estará a la menor distancia posible de la fibra.

Al ángulo máximo que debe incidir sobre el núcleo se le llama ángulo de aceptación (θ_a), el cual es el ángulo entre la luz incidente y el eje de la fibra, esta relacionado directamente con los índices de refracción del núcleo n_1 y del cladding n_2 (a su vez relacionados con el ángulo crítico) que determinan la apertura numérica (NA), la cual da una idea de cuanta luz puede ser acoplada a la fibra, entonces tenemos que el ángulo de aceptación (θ_a) se encuentra:

$$\theta_a = \arcsen(NA) \quad (7)$$

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$NA = (1.492^2 - 1.417^2)^{1/2}$$

$$NA = 0.467092$$

⁸CADAVID, Diana María, RODRIGUEZ, Laura. Implementación de un Sistema Didáctico de Transmisión de voz por Fibra Óptica Usando WDM. Universidad del Valle. Cali. 2004.

$$\theta_a = \arccos(0.467092) \quad (9)$$

$\theta_a = 0.4859$ radianes ; ángulo de aceptación

$\theta_a = 27.84$ grados ; ángulo de aceptación

El ángulo sólido de aceptación se aproxima a

$$\Omega = \pi \text{NA}^2 \quad (10)$$

$$\Omega = 0.68 \text{ estéreo radianes}$$

El led elegido, referencia 2R3BSKNT, emite a un ángulo de 30 grados permitiendo hacer incidir la mayor parte de la potencia en la fibra óptica plástica, así se asegura que gran porcentaje de la señal óptica sea transmitida ya que el ángulo de emisión del Led, esta muy próximo del ángulo de aceptación de la fibra, que es de 27.84 grados.

2.5 DISPERSION

La dispersión es el ensanche que sufre el pulso emitido al pasar a lo largo de la fibra óptica. Esto es limitado por el ancho de banda (o capacidad de transmisión) de la fibra debido a que todos los rayos interfieren entre sí. Existen dos tipos principales de dispersión modal y material.⁹

2.5.1 Dispersión Modal. Dispersión Modal. Ocurre únicamente en la fibra multimodo y en mayor proporción cuanto mayor sea el diámetro del núcleo. Por ello es la principal en los sistemas de fibra óptica de plástico.

El que la fibra óptica tenga un núcleo grande, le permite alojar muchos modos de propagación que inciden con distintos ángulos en el cladding permitiendo que se retrasen en el tiempo unos modos respecto de otros y por tanto provocando un ensanche del pulso inicialmente emitido.

En este trabajo fue empleada fibra óptica de 5 mm de diámetro en el núcleo, pero la dispersión modal no es un problema, ya que siendo la fibra óptica plástica empleada, una multimodo, en su aplicación requiere solo un modo de transmisión pues no se trata de una transmisión de datos digital y para este caso la dispersión de la señal no afecta el sistema, porque no se trata de distinguir pulsos de luz a la llegada sino de relacionar atenuación de la señal, con la longitud del camino seguido por la luz en todo el sistema.

⁹ SANCHEZ DEL SOTO, Mariano, CORBELLE SANCHEZ, José Antonio.
Prácticas de electrónica: Transmisión digital a través de fibra óptica. Madrid: McGraw-Hil

2.5.2 Dispersión Cromática. Las ondas electromagnéticas viajan a distintas velocidades dependiendo de la longitud de onda a la que se transmiten y del material por el que pasan, por ello el índice de refracción cambia para cada longitud de onda dispersando los modos, en este caso la dispersión cromática puede ser despreciada por cuanto a la salida del sistema la respuesta del receptor no se verá afectada

2.6 ATENUACIÓN

Es la pérdida de potencia óptica, a medida que la luz avanza a través de la fibra óptica. Se mide en dB por unidad de longitud, las principales pérdidas son conocidas como Scattering y Absorción¹⁰.

En principio, la idea fue trabajar con luz infrarroja de 940 nm de longitud de onda, entre las características de estas ondas se encuentra su alta capacidad de reflexión, razón por la cual es usada en sistemas de mando a distancia, se quiso aprovechar esta característica para realizar la transmisión de la onda IR por una fibra, al salir de esta, recorra cierta distancia y al chocar con una barrera, retorne a la otra fibra y la lleve al receptor para ser procesada.

Al realizar las pruebas con el emisor infrarrojo se obtuvo transmisión de la señal por la primera fibra, aunque con demasiada atenuación debida a la presencia de los iones OH en la fibra óptica plástica utilizada.

La pérdida en decibeles esta descrita en una escala logarítmica. Si la señal de entrada es P_0 y la señal P es la señal transmitida o recibida $dB_{loss} = 10 \log_{10} (P_0/P)$

En las características de transmisión para la fibra óptica plástica utilizada en el proyecto la atenuación dada es 180 dB/Km

De allí se ve que la atenuación es una pérdida por unidad de longitud, para convertir la atenuación en porcentaje de transmisión por metro, el procedimiento fue el siguiente:

Ahora, la definición de decibel de atenuación es:

$$dB = 10 \log (P_2/P_1) \quad (11)$$

donde:

P_2 = nivel de potencia entrante a la fibra

P_1 = nivel de potencia de salida en la fibra

¹⁰ URREA, Juan Pablo, Medidas de Atenuación en Fibra Óptica, Grupo de Microelectrónica y Control, Universidad de Antioquia

Para este caso:

Se tiene un sistema con 3.6 m de fibra óptica, y una fuente emitiendo con una longitud de onda de 587nm y que genera una señal de 45mW, teniendo en cuenta la atenuación, dato suministrado en la hoja de características de la fibra que es de 160 dB/Km, obteniendo la porción de la potencia óptica, que se acopla a la fibra en primera instancia, y se transmite al final de ella.

Procedemos así:

Ya que la atenuación en al fibra esta dada por la ecuación

$$R \text{ (dB)} = 10 \log (P2/P1)$$

Primero se obtiene la atenuación en dBm

La atenuación en dBm para la FOP utilizada es 0.16 dBm

Para el caso citado tenemos $0.16 * 3.6 = 0.576$ dBm, perdidas en la fibra

Ya que conocemos la potencia de entrada a la fibra, podemos deducir la potencia de salida:

$$R(\text{dB}) = 10 \log (P2/P1)$$

despejando

$$R(\text{dB})/10 = \log (P2/P1)$$

$$R(\text{Db})/10 = \log (p2/p1)$$

$$10^{R \text{ (dB)}/10} = P2/P1$$

La potencia de salida será

$$P2 = P1 * 10^{R \text{ (dB)}/10}$$

$$P_{\text{salida}} = 45 * 10^{(160)/10} = 45 \text{ EXP } 16 \text{ mW, esto en caso de un km de extensión}$$

Para el sistema tenemos

Si $P1 = 1\text{mW}$ a la ecuación para dB de perdida (o ganancia) puede expresarse

$$\text{dBm} = 10 \log P2 \text{ (en mW)}$$

Se sabe (dato suministrado por la hoja de característica) que la pérdida de potencia en al FOP es de 160 dB por km la pérdida en 3.6 m será de 0.576 dB, la potencia de entrada (calculada en la sección 3.2) es 45mW, se encuentra ahora la potencia de salida.

$$R \text{ dB} = 10 \log P2/P1 = - 0.576$$

$$10^{R/10} = P2/P1 \text{ reemplazamos valores}$$

$$10^{-0.576/10} = P2/45 \text{ mw}$$

$$10^{-0.576/10} = P2/45 \text{ mw} = 0.875, \text{ despejando } P2 \text{ tenemos}$$

$$P2 = 0.875 * (45 \text{ mW}) = 39.375 \text{ mW}, \text{ La potencia de salida}$$

En el vacio

$$V = c = f \lambda_o \text{ donde } c = 3 * 10^8 \text{ metros por segundo}$$

λ_o = longitud de onda en el espacio vacio

en general

$$f * \lambda = v = c/n, \text{ donde } n = \text{índice de refracción } n = c/v$$

además

$$\lambda_m = c/n * 1/f = \lambda_o/n$$

Nuestro led semiconductor, emite a una longitud de onda de 587 nm, su señal es acoplada a una fibra óptica con $n = 1.492$ (nucleo). Se debe entonces calcular la frecuencia y la velocidad de la onda óptica en la fibra

$$f = c / \lambda_o = (3 * 10^8 \text{ m/s}) / (587 * 10^{-9} \text{ m}) = 5,1 * 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f = 5,1 * 10^{14} \text{ Hz}$$

La velocidad será:

$$v = c/n = 3 * 10^8 / 1.492$$

$$v = 2 * 10^8 \text{ m/s}$$

Para los electrones eyectados de la superficie del material, los cuales producen luz (efecto fotoeléctrico):

E_m = máxima energía del electrón

$E_m = hf - q\phi$, donde h = constante de planck = $6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ = $4.135 \text{ eV}\cdot\text{s}$

$q\phi$, es la contante de trabajo y es una característica para cada material

Einstein (circa 1905) interpreto el efecto fotoeléctrico como cuantos de energía, ahora llamados fotones

$E_{\text{foton}} = W_p = hf = h\nu$

Ahora se encuentra cuantos fotones por segundo emite el Led que produce una emisión de 45 mW a longitud de onda de 587 nm

La energía para un fotón del led esta dada por

$E_{\text{foton}} = hf = h \cdot c / \lambda_0 = (6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) \cdot (5.1 \cdot 10^{14} \text{ Hz})$

$E_{\text{foton}} = 3.37926 \cdot 10^{-19} \text{ Julios}$

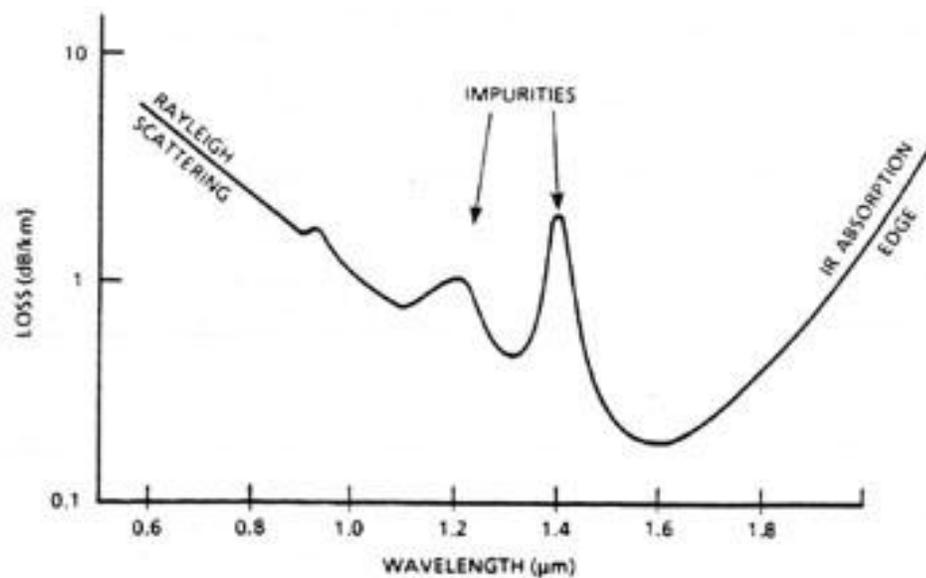
La energía total del led es:

$E_{\text{fotón}} = \text{potencia} \cdot \text{tiempo} = 46 \text{ mW} \cdot 1 \text{ seg} = 46 \cdot 10^{-3} \text{ J}$

El número de fotones emitidos en un segundo es:

$\text{Energía total} / \text{energía del fotón} = 0.046 \text{ J} / (3,37926 \cdot 10^{-19} \text{ Julios/fotón}) = 1,3 \cdot 10^{17} \text{ fotones.}$

Figura 21. Curva típica de atenuación en la fibra



2.7 EMISOR ÓPTICO (FOTO-EMISOR)

La misión del emisor óptico consiste en convertir la señal eléctrica que recibe en una señal de luz, adecuada para ser transmitida por la fibra¹, la señal transmitida es una señal digital varia únicamente entre dos valores “cero” y “uno” lógicos, esta señal es enviada por el PIC16f877.

2.7.1 Eficiencia. Es la relación entre la intensidad luminosa emitida, medida en unidades denominadas milicandelas (mcd) y la corriente eléctrica en mA que produce dicha radiación. Representa por η . Los valores normales oscilan entre los 0,5 y 2 mcd a 20 mA. Pero los de alta eficiencia alcanzan más de 600 mcd a 20 mA¹¹.

El color depende de la energía de los fotones y de la frecuencia de la radiación, existiendo tres estandarizados por la mayoría de los fabricantes; El rojo, verde y amarillo. En el caso de LED de infrarrojos, la radiación no será visible.

Como se ve, la eficiencia es un factor decisivo a la hora de elegir al fuente óptica, por esa razón seleccionamos el led 2R3BSKNT que es una fuente de alta eficiencia, A partir de la hoja de datos del LED 2R3BSKNT utilizado (ver anexo) se tiene 1200 mcd circulando una intensidad típica de 20 mA

2.7.2 Led. Un Led (Light Emitting Diode- Diodo Emisor de Luz), es un dispositivo semiconductor que emite radiación visible, infrarroja o ultravioleta cuando se hace pasar un flujo de corriente eléctrica a través de este en sentido directo. Esencialmente es una unión PN cuyas regiones P y regiones N pueden estar hechas del mismo o diferente semiconductor. El color de la luz emitida está determinado por la energía del fotón, y en general, esta energía es aproximadamente igual a la energía de salto de banda del material semiconductor en la región activa del LED.

El fenómeno de emisión de luz está basado en la teoría de bandas, por la cual, una tensión externa aplicada a una unión p-n polarizada directamente, excita los electrones, de manera que son capaces de atravesar la banda de energía que separa las dos regiones.

¹¹JARDÓN AGUILAR, Hildeberto, LINARES, Roberto. Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas, México, D.F: Alfaomega, 1995. Cap 6,7 8.

Si la energía es suficiente los electrones escapan del material en forma de fotones. Cada material semiconductor tiene unas determinadas características y por tanto una longitud de onda de luz emitida.

Longitud de onda dominante 587 nm

Ancho espectral 15 nm

Luminosidad típica 1200 mcd,

lo anterior bajo las siguientes condiciones típicas de operación:

Corriente del led de 20 mA

Así para obtener una buena intensidad luminosa la corriente debe circular por el LED es 20 mA. En el circuito de polarización, es clave tener en cuenta la caída de tensión parámetro, dato que proporciona la hoja de características del led y para esta frecuencia particular es 2V, el diseño se realiza con una resistencia que irá en serie con el led esto para limitar la corriente circulante, con el fin de no saturar el foto-emisor, porque la saturación genera que una alta fracción de la potencia sea absorbida por el LED y no transforma en radiación visible, teniéndola que disipar al ambiente en forma de calor, lo cual causa deterioro y falla del dispositivo.

Tabla 2. Color generado por algunos compuestos de Galio

Material	Color
GaAs : Zn	Infrarrojo
GaAsP _{.4}	Rojo
GaAsP _{.5}	Ambar
GaAsP _{.85} : N	Amarillo
GaP : N	Verde

En los aislantes, la banda inferior menos energética (banda de valencia) está completa con los e⁻ más internos de los átomos, pero la superior (banda de conducción) está vacía y separada por una banda prohibida muy ancha (~ 10 eV), imposible de atravesar por un e⁻.

En el caso de los conductores las bandas de conducción y de valencia se encuentran superpuestas, y cualquier aporte de energía es suficiente para producir un desplazamiento de los electrones. Entre ambos casos se encuentran los semiconductores, cuya estructura de bandas es muy semejante a los aislantes, pero con diferente de la banda prohibida, que es bastante pequeña. Los semiconductores son, por lo tanto, aislantes en condiciones normales, pero una elevación de temperatura proporciona la suficiente energía a los electrones para que, saltando la banda prohibida, pasen a la de conducción, dejando en la banda de valencia el hueco correspondiente. (figura 2)

Tabla 3. Materiales para la fabricación de un diodo y color obtenido

Compuesto	Color	Long. de onda
Arseniuro de galio (GaAs)	Infrarrojo	940nm
Arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs)	Rojo e infrarrojo	890nm
Arseniuro fosfuro de galio (GaAsP)	Rojo, naranja y amarillo	630nm
Fosfuro de galio (GaP)	Verde	555nm
Nitruro de galio (GaN)	Verde	525nm

Seleniuro de zinc (ZnSe)	Azul	
Nitruro de galio e indio (InGaN)	Azul	450nm
Carburo de silicio (SiC)	Azul	480nm
Diamante (C)	Ultravioleta	
Silicio (Si)	En desarrollo	

Tabla 4. Caída de tensión e intensidad.

Color	Caída de tensión (VLED)
IR	1 V
IR	1 V
Rojo	1,5 V
Amarillo	1,6 - 2,4 V
Verde	2,7 V
Azul	3 V

2.7.2.1 Análisis Circuito en Dc. La resistencia de limitación puede calcularse a partir de la fórmula:

$$R = \frac{V - V_{led}}{I}$$

Si se expresa V en voltios e I en miliamperios el valor de la resistencia vendrá directamente expresado en $K\Omega$.

También debe tenerse en cuenta el calor disipado por la resistencia.

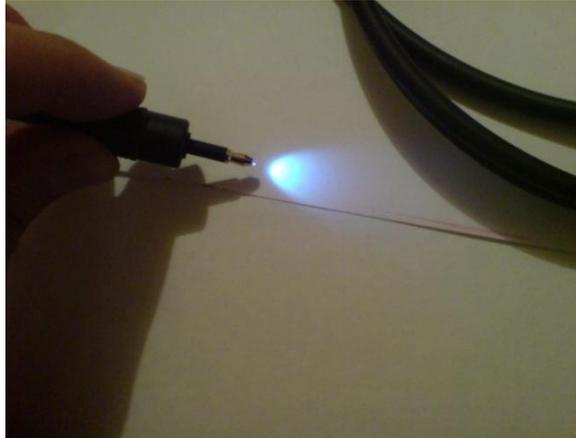
Ley de joule:

$$Potencia = I^2 R \quad (12)$$

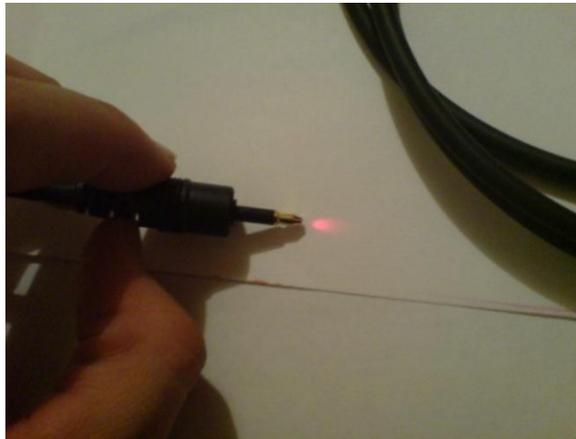
Donde I es la intensidad que atravesará al diodo y R la resistencia calculada antes.

Figura 22. Comparación resultado de transmisión de la señal de dos frecuencias diferentes a una misma potencia óptica a través de la fibra a) fuente 1 led 2R3BSKNT b) fuente 2 led rojo.

a) fuente 1 led 2R3BSKNT



b) fuente 2. led rojo



En la figura anterior se aprecia los resultados de transmisión a través de la FOP conseguidos con dos fuentes, polarizadas con la misma corriente, El tipo de emisores ópticos utilizado son LED (diodo emisor de luz), como se aprecia en las anteriores graficas la mayor transmisión de potencia óptica es conseguida con la fuente de la figura 'a' con longitud de onda central de 587 nm correspondiente al led de alta eficiencia por esta razón es la fuente escogida para realizar la transmisión.

2.8 DESARROLLO DE CONECTORES

El conector es un dispositivo mecánico al final de la fibra óptica, la señal es inyectada por el transmisor o recibida por el receptor a través del conector, el cual puede desconectarse, el conector es esencial en una conexión de fibra óptica porque en él, se puede perder la potencia de la señal¹², se busco una conexión mecánica que no permitiera la pérdida la señal. El primer conector permite alienar el emisor y la fibra dentro del receptáculo, para que la transmisión sea efectiva, buscando un posicionamiento preciso del cable de fibra óptica respecto a la fuente óptica emisora este es un receptáculo plástico que montado se mantiene fijo por cuanto las fluctuaciones y la linealidad son factores importantes; Más adelante este trabajo considera aspectos importantes en la transmisión de la señal por fibra óptica como apertura numérica, ángulo critico, ángulo de aceptación, atenuación.

A continuación se muestran los conectores desarrollados en un material plástico con perforaciones de diferente diámetro en los extremos que permiten la conexión adecuada de fototransmisor y foto receptor a la fibra. Estos conectores fueron diseñados, debido a la dificultad de su adquisición comercial para la FOP utilizada en el trabajo.

Figura 23. Conector Desarrollado: Foto emisor - Fibra Óptica



¹²JARDÓN AGUILAR, Hildeberto, LINARES, Roberto. Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas, México, D.F: Alfaomega, 1995. Cap 6,7 8.

Figura 24. Conector desarrollado: Foto receptor - Fibra Óptica



Figura 25. Conector: Lente de colimación - Fibra Óptica



Figura 26. Flotador



Figura 27. Acople: Fibra Óptica - Depósito



3. CALCULO DE DISEÑO

3.1 EL ÁNGULO CRÍTICO

El índice de refracción del núcleo y de la cubierta (cladding) se obtiene de la hoja de características de la fibra utilizada (ver anexo D) y son respectivamente 1.492 y 1.417.

Según la ley de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2; \quad n: \text{índice de refracción del medio} \quad (13)$$

Cuando n_1 (coeficiente de refracción del núcleo) es mayor que n_2 (coeficiente de refracción de la cubierta óptica), el ángulo de refracción es siempre mayor que el ángulo de reflexión, para un ángulo de incidencia $\theta_2 = 90$ el rayo transmitido viaja a lo largo de la frontera:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin (90) = n_2$$

$$\sin \theta_1 = (n_2/n_1) = \sin \theta_c.$$

Donde θ_c , es el ángulo crítico, despejando se obtiene

$$\theta_c = \arcsen (n_2/n_1) \text{ Reemplazando valores}$$

$$\theta_c = \arcsen (1.417/1.492) = \arcsen (0.949)$$

$$\theta_c = 1.25 \text{ radianes}$$

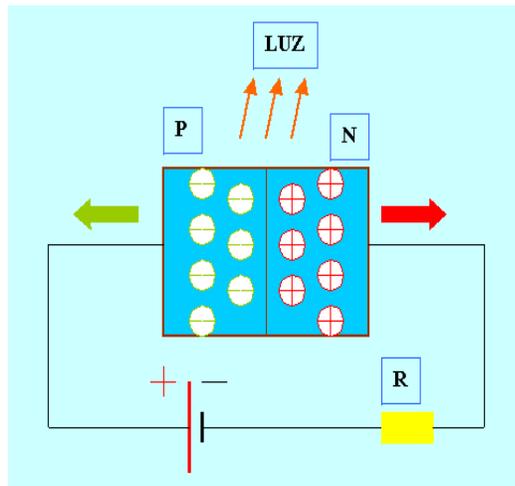
$\theta_c = 71.6$ grados; Ángulo crítico, es el ángulo de incidencia bajo el cual, el rayo transmitido viaja a lo largo de la frontera, debemos cumplir esta condición, para que el rayo incidente se refleje al medio 1.

El ángulo crítico es un factor para tener en cuenta, porque el ángulo de incidencia de la luz, debe ser mayor a este ángulo para que toda la energía sea reflejada al medio 1 (núcleo), para que haya transmisión. Lo anterior se asegura cumpliendo con las consideraciones del ángulo de aceptación de la fibra, pues estos parámetros están relacionados por los índices de refracción del núcleo y la cubierta.

3.2 DISEÑO DEL CIRCUITO DE EXITACION PARA LA FUENTE ÓPTICA

La fuente de luz LED se puede polarizar con circuitos con polarización de base, allí se establece un valor fijo para la corriente de base y en los circuitos de polarización de emisor se establece un valor fijo para la corriente de emisor.

Figura 28. Diodo emisor de luz con la unión polarizada en sentido directo



Debido al problema de la ganancia de corriente, los circuitos con polarización de base, generalmente, se diseñan para conmutar entre la saturación y corte, mientras que los circuitos con polarización de emisor normalmente son diseñados para funcionar en la zona activa. Por tanto el circuito seleccionado es el de polarización de base, donde en corte el LED estará desactivado y en saturación el LED estará encendido.

La configuración elegida para el transistor que excitará la fuente es la de conmutación, cuando por la base circula una intensidad el transistor entre colector y emisor se comporta como un interruptor cerrado, de esta forma, se puede decir que la tensión de la fuente se encuentra en la carga conectada en el colector

Cuando la corriente de base es cero, entonces el transistor está en "Corte". $I_B = 0$

$I_C = 0$; Corte = Led apagado

Ya que se requiere un alta potencia óptica para ser acoplada a la fibra y teniendo en cuenta que el LED no llegue a saturarse, se hace circular por el, una corriente de 20mA, se utiliza una fuente de 5V, ya que se utiliza como foto-emisor un diodo led con voltaje de polarización 2V (consultar anexo, hoja de características del led seleccionado), la resistencia limitadora será:

$$R = \frac{5 - 2.0 - 0.7}{20} = 115 \Omega$$

Esto muestra la dependencia del voltaje de polarización. Al cambiar de LED a otro con diferentes características de polarización su nivel de iluminación variará.

El cálculo de potencia queda:

$$\text{Potencia} = I^2 R$$

Donde: I es la intensidad que atravesará el diodo

R la resistencia calculada anteriormente.

$$P = 0.045 \text{ W, es decir } 45 \text{ mW}$$

3.3 DISEÑO DEL CIRCUITO FOTO-RECEPTOR

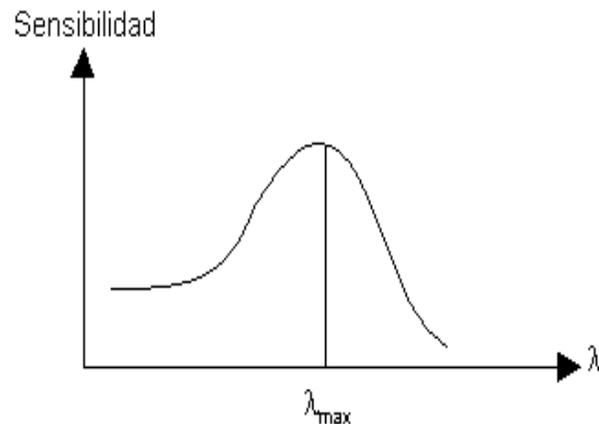
3.3.1 Foto-receptor. LDR (Light Dependent Resistance), dispositivo cuya resistencia óhmica es una función de la iluminación recibida sobre su superficie. En su composición entran materiales que poseen muy pocos electrones libres cuando se encuentran en condiciones de oscuridad, pero el número de electrones libres se incrementa de una forma considerable cuando el dispositivo es iluminado. En consecuencia, la conductividad crece y por tanto la resistencia óhmica disminuye.

Figura 29. Vista del sensor fotoeléctrico dentro del conector



En general, la variación de resistencia en función de la longitud de onda presenta curvas como las de la siguiente figura.

Figura 30: Variación de resistencia (LDR) en función de la longitud de onda de la radiación.



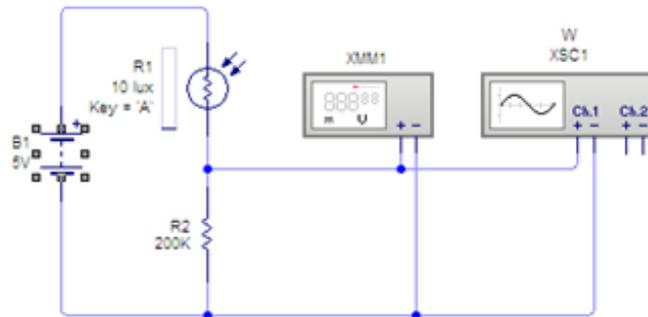
Los LDR se fabrican con un cristal semiconductor fotosensible como el sulfuro de cadmio (CdS). Estas celdas son sensibles a un rango amplio de frecuencias lumínicas, desde la luz infrarroja, pasando por la luz visible, hasta la ultravioleta.

La variación de valor resistivo de un LDR tiene cierto retardo, que es diferente si se pasa de oscuro a iluminado o de iluminado a oscuro. Por esta razón un LDR no se puede utilizar algunas aplicaciones, El tiempo de respuesta típico de un LDR está en el orden de una décima de segundo. La lentitud relativa del cambio es para éste caso una ventaja, porque así se filtran variaciones rápidas de iluminación que podrían hacer inestable el sensor.

Para el desarrollo del receptor de fibra óptica, en nuestro caso de detección directa, es necesario tener en cuenta que se requiere una variable eléctrica la cual depende de la intensidad de luz resultante a la salida de la fibra, por esta razón optamos por el uso de una LDR, se trata de un sensor analógico, y se implemento el respectivo circuito figura 21 para convertir la variación de su resistencia en la variación de voltaje (transductor), el cual es previamente acondicionado por otro circuito y procesado por el microcontrolador PIC16F877, de éste modo se obtendrá el nivel de combustible, relacionado directamente con la potencia óptica recibida por el sensor LDR.

En el circuito implementado son aprovechadas las características que presenta éste sensor cuando varía su resistencia eléctrica. El LDR utilizado en el desarrollo del proyecto presenta valores de resistencia de 50Ω cuando hay luz incidiendo en el y de $200 M\Omega$ sin luz incidente.

Figura 31. Circuito Foto-detector Implementado



En el diseño el LDR va conectado al polo positivo y una resistencia fija al polo negativo, de esa manera el punto de unión entre estos dos componentes podrá tomar valores según la variación de la LDR, estos valores previamente acondicionados, según las características del microcontrolador que se encargará de su procesamiento, irán de cero cuando no incide luz a 5 voltios a plena iluminación; Dicha señal se utiliza como salida del sensor, donde se obtiene una variación de voltaje que depende de la intensidad de la luz al final de la fibra, resta seleccionar la sensibilidad y linealidad del circuito, esto se hace caracterizando la respuesta del circuito al nivel de iluminación, lo cual se hace variando el valor de la resistencia R2, y analizando las graficas resultante. El proceso seguido es:

Primero con el uso de un luxómetro es medida la potencia óptica máxima (menor distancia, es decir mayor nivel) que se obtenía a la salida de la fibra, partimos de allí para caracterizar la respuesta del circuito electrónico asociado a la fotoresistencia y seleccionar los valores de resistencia que nos permitan tener una variación proporcional de voltaje, dependiente de los lux que exciten la LDR.

En el caso de las LDR típicas de sulfuro de cadmio, la longitud de onda incidente a la cual la respuesta es máxima corresponde aproximadamente a 680 nm (en este caso la fuente utilizada es de 587 nm).

Se realizó una variación de la potencia óptica de entrada al LDR consistente en la variación de la fuente óptica en una escala de 10 a 1000 lux y se grafica la variación de voltaje dependiente de la variación de la resistencia eléctrica del LDR. Es analizado el grafico de la caracterización del circuito para seleccionar la respuesta donde exista mayor proporcionalidad con la señal a la salida de la fibra (linealidad), para que finalmente ese sea el diseño escogido

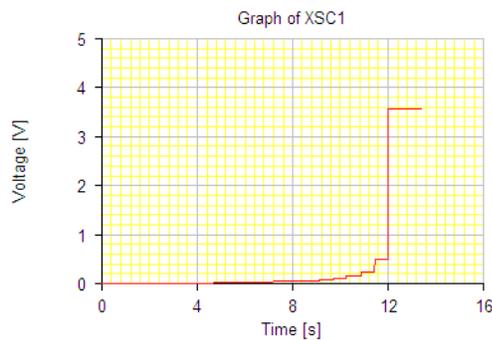
A continuación se muestra los valores de la potencia óptica, trabajados para cada valor de R2 y de este modo obtener la caracterización del circuito.

Tabla 5. Valores de voltaje obtenidos Para R2=1K

LUX (Potencia óptica)	VOLTAJE SALIDA	DE
10	479 micro volt	
60	1.97 mV	
109	4.05 mV	
159	6.4 mV	
208	9.0 9mV	
258	12.19 mV	
307	15.80 mV	
357	20.06 mV	
406	25.16 mV	
456	31.38 mV	
505	39.14 mV	
555	49.08 mV	
604	62.27 mV	
654	80.61 mV	
703	107.87 mV	
753	152.65 mV	
802	239.78 mV	
852	483.35 mV	
901	3.57 V	
951	3.57 V	
1000	3.57 V	

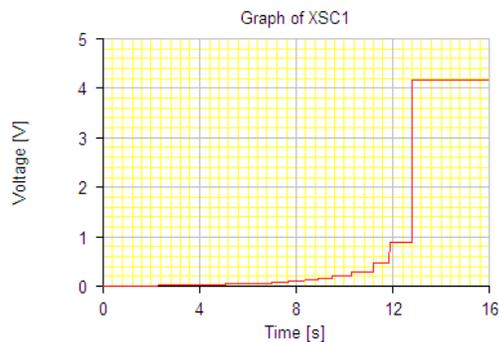
En la siguiente gráfica (figura 32) se aprecia la variación y el salto abrupto en la respuesta del circuito a los 12 segundos, que corresponde al paso de 852 a 901 LUX, esto demuestra que el circuito con esta configuración tiene una respuesta “pobre” porque para solo una variación de potencia óptica, existe un cambio de voltaje de aproximadamente 3V.

Figura 32. Respuesta del circuito foto-detector para R2=1k



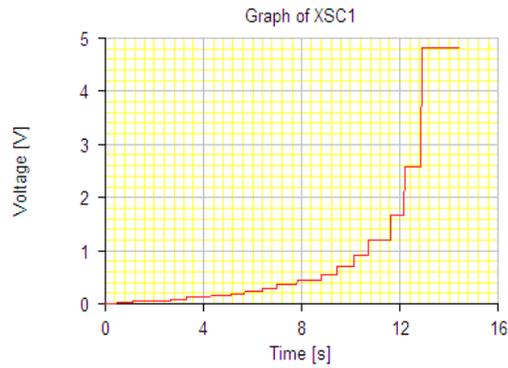
Se presenta a continuación sólo las gráficas de la respuesta del circuito foto-detector, para otros valores de prueba:

Figura 33. Respuesta del circuito foto-detector para R2= 2K



En las gráficas de voltaje vs tiempo se ven diferentes valores que varían abruptamente estos equivalen a cada cambio o salto de potencia óptica (lux), que como se dijo varía de 10 lux a 1000 lux, esto se realiza en 20 saltos o cambios de valor.

Figura 34. Respuesta del circuito foto-detector para R2=10K



En la gráfica anterior la curva de respuesta del circuito tiene un mejor comportamiento, los cambios no son tan abruptos y la respuesta tiende a ser más lineal.

Figura 35. Respuesta del circuito foto-detector para R2=20K

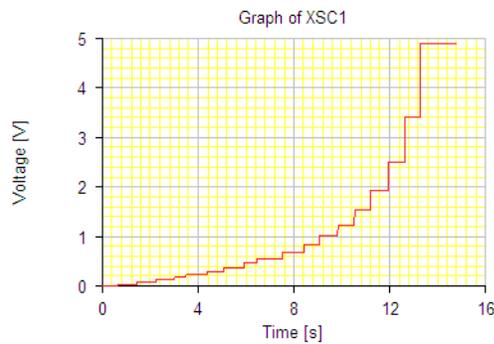


Figura 36. Respuesta del circuito foto detector para R2=40K

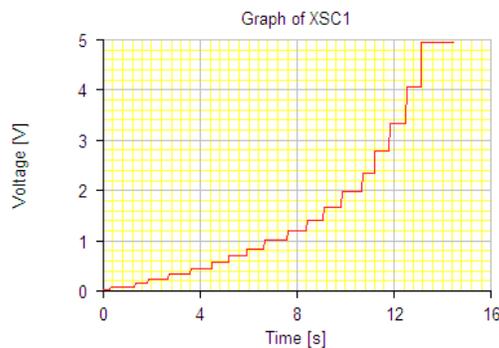


Figura 37. Respuesta del circuito foto-detector para R2=50K

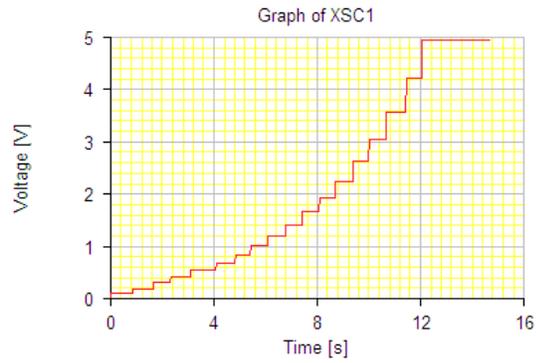


Figura 38. Respuesta del circuito foto-detector para R2=60K

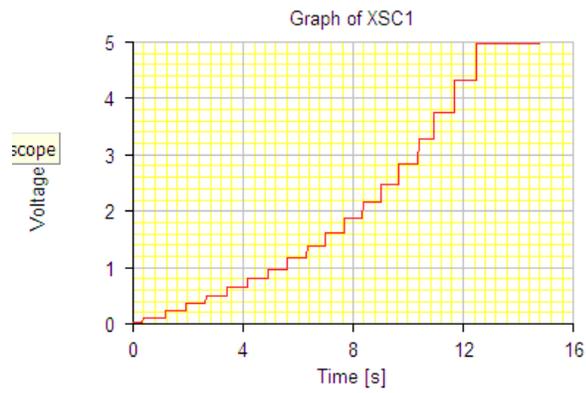


Figura 39. Respuesta del circuito foto-detector para R2=70K

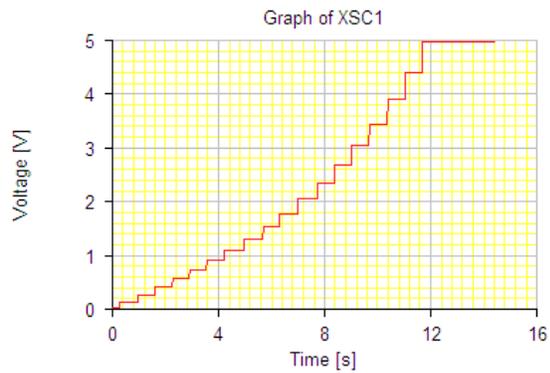


Figura 40. Respuesta del circuito foto-detector para R2=100k

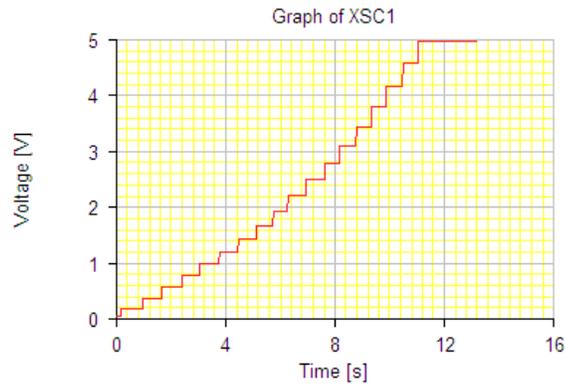


Figura 41. Respuesta del circuito foto-detector para R2=150K

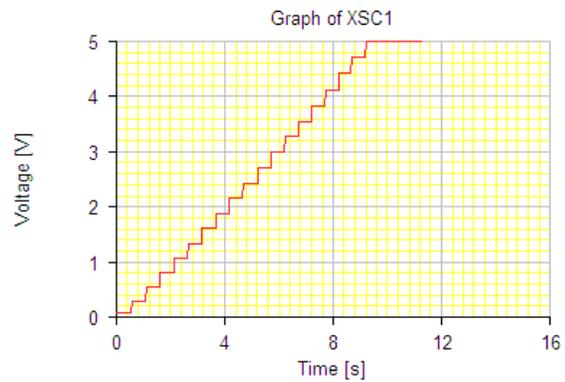


Figura 42. Respuesta del circuito foto-detector para R2=200k

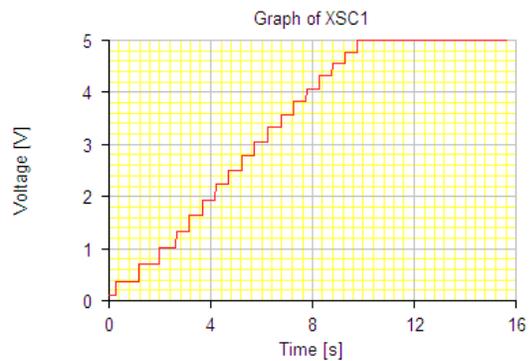
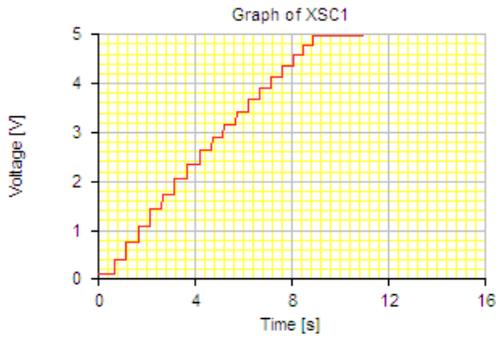


Figura 43. Respuesta del circuito foto-detector para R2=220k



En la grafica anterior es posible observar la linealidad en el comportamiento de la respuesta del circuito.

Figura 44. Respuesta del circuito foto detector para R2=250k

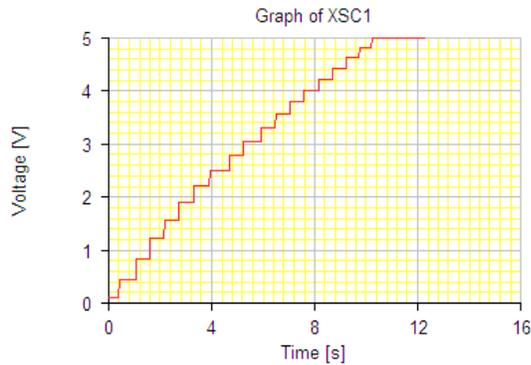


Figura 45. Respuesta del circuito foto detector para R2=300k

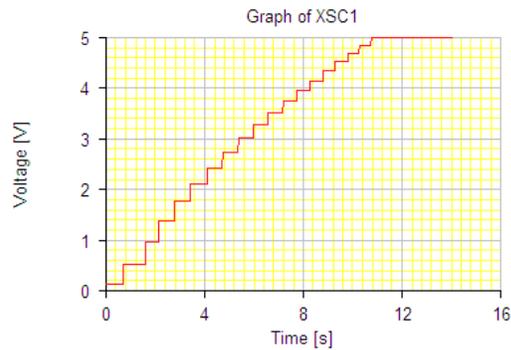


Figura 46. Respuesta del circuito foto detector para R2=350k

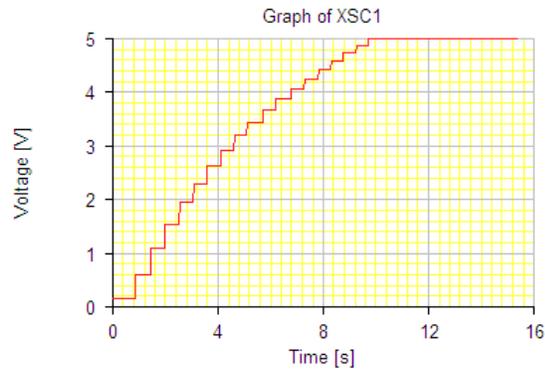


Figura 47. Respuesta del circuito foto-detector para R2=400k

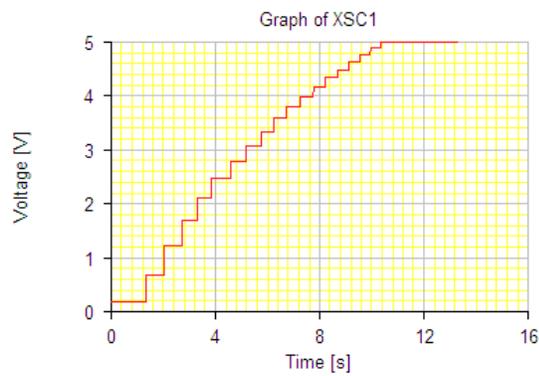


Figura 48. Respuesta del circuito foto-detector para R2=500k

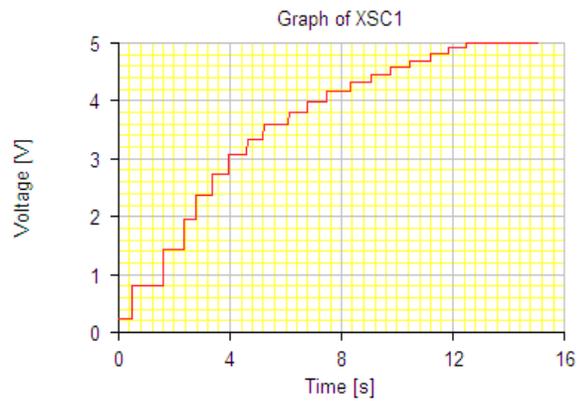


Figura 49. Respuesta del circuito foto-detector para R2=600k

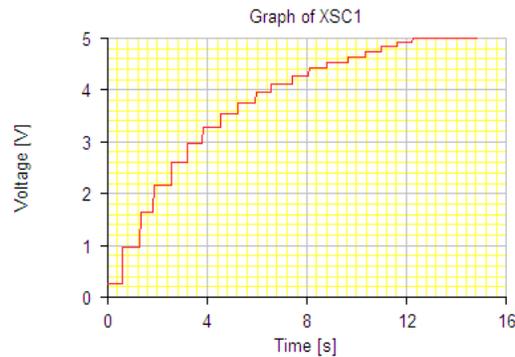
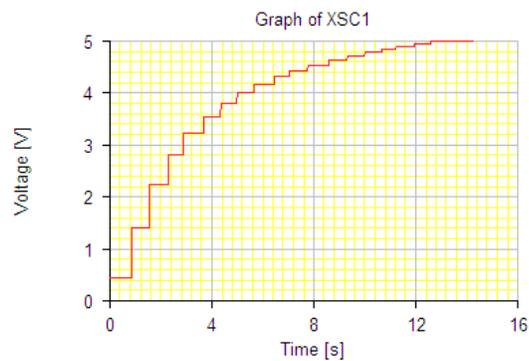


Figura 50. Respuesta del circuito foto-detector para R2=1000k



Por medio del análisis gráfico para la franja de potencias ópticas en la cual tenemos interés es posible concluir que la mejor respuesta la presenta el circuito para una R2= 220K; Por tanto es el valor seleccionado.

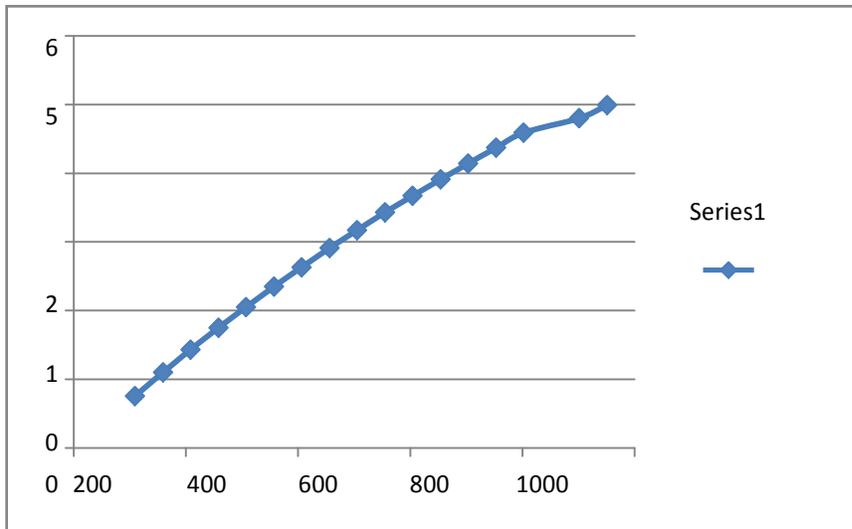
Se comprueba en las anteriores graficas los efectos que tiene en el voltaje de salida del circuito, el cambio del valor de potencia óptica (lux) incidente en la LDR ya que para cada cambio de potencia óptica le corresponde un cambio de voltaje de salida. Cuando se llega a un valor de 5V antes de completar 20 cambios, es señal, el circuito se ha saturado. Por lo anteriormente expuesto el valor seleccionado para R2 es 220K, ya que se busca optimizar así la sensibilidad del circuito.

Tabla 6. Valores de potencia óptica y voltajes obtenidos a la salida del circuito para R2=22

POT ÓPTICA INCIDENTE (LUX)	VOLTAJE DE SALIDA (V)
10	0.10315
60	0.39787
109	0.75523
159	1.10
208	1.43
258	1.75
307	2.05
357	2.35
406	2.63
456	2.91
505	3.17
555	3.43
604	3.67
654	3.91
703	4.14
753	4.37
802	4.59
852	4.8
901	4.97
951	4.98
1000	4.99

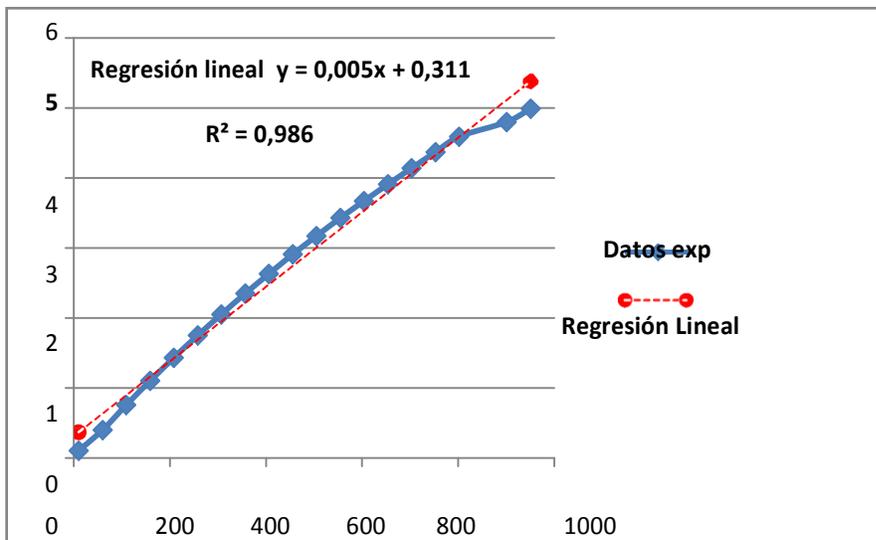
3.3.4 Tratamiento de los datos. Valores potencia óptica vs. Resistencia, de cuya grafica debe obtenerse la recta de ajuste de mínimos cuadrados. El resultado de dicho ajuste es $y = 0,005x + 0,311$, $R^2 = 0,986$, estos valores han sido representados en la figura 43. La ecuación resultante permite el desarrollo de la programación.

Figura 51. Representación grafica de intensidad luminosa (lux) vs Voltaje (V)



A la anterior grafica se le hace regresión lineal para obtener la tendencia:

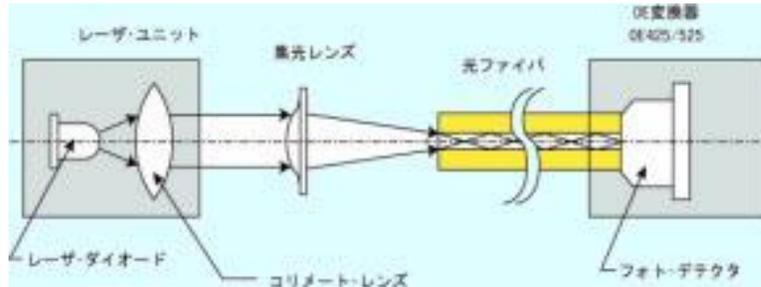
Figura 52. Regresión lineal para la grafica de intensidad luminosa (lux) vs Voltaje



Es posible observar el comportamiento lineal y que la formula de regresión obtenida por mínimos cuadrados $y = 0,005x + 0,311$ es una buena aproximación, esto lo constata el valor de R^2 que esta muy próximo a 1.

3.4 COLIMACIÓN

Figura 53. Principio de colimación



La lente de colimación es una lente especial, permite orientar la luz hasta un punto focal, donde se acopla la señal incidente, en la fibra óptica.¹³

Figura 54. Implementación de la lente para colimación de la señal óptica a) Vista lateral b) vista frontal.

a)



b)



¹³PAREDES, Omar, Conferencia sobre fibra óptica. San Juan de Pasto, Diciembre 2007.

3.4.1 Distancia Focal. Es la potencia o poder de desviación de una lente u objetivo. Su valor puede expresarse directamente en milímetros, como distancia focal, o bien por dioptrías. Una dioptría es el valor inverso de la distancia focal expresado en metros.

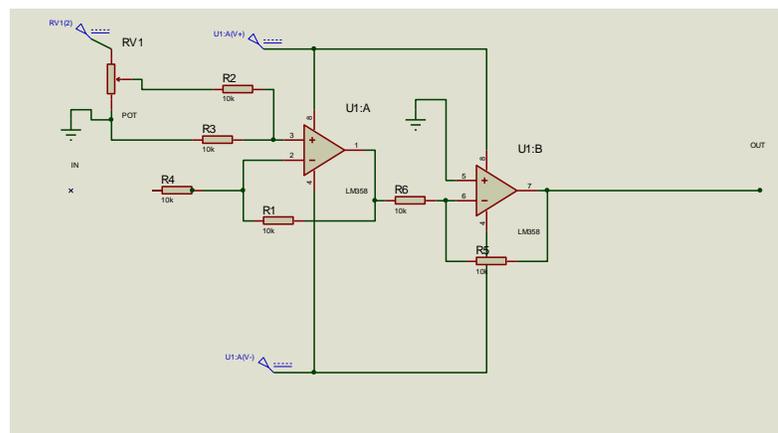
Para el caso de la lente utilizada en el proyecto la distancia focal experimental es de 20 mm. Por tanto su valor en dioptrías es de $1/0,020 = 50$. Este es un valor tenido en cuenta en la realización del conector que une la lente de colimación con la fibra que lleva de regreso la señal desde el deposito de combustible hasta el receptor ubicado fuera de éste, lo anterior se realizo ya que la variación en la geometría (linealidad) del sistema representaría cambio en los resultados.

3.5 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

La señal de salida del foto-receptor pasa antes de ser adquirida por el microcontrolador, pasa por un circuito acondicionador cuya función es adecuarla en rango y amplitud. El circuito de acondicionamiento se ve en la figura 55 consiste de un restador seguido de un amplificador, implementados con el circuito operacional LM324 la señal obtenida del foto-sensor es la señal de entrada en r4, en la primera parte se resta un valor de -2.5 voltios porque en las pruebas se obtuvo valores que varían en el rango 2.8V a 3.5V, la señal de salida del circuito es la señal de llegada al microcontrolador.

$r5 = 10k$ y $r6 = 2k$, los demás valores de las R es 1k. Así tenemos que $r5/r6 = 5$ el cual es el valor de la ganancia requerida, para que el voltaje de entrada al microcontrolador esté en el rango cero a cinco voltios. Los operacionales se alimentan con 12 y -12 voltios

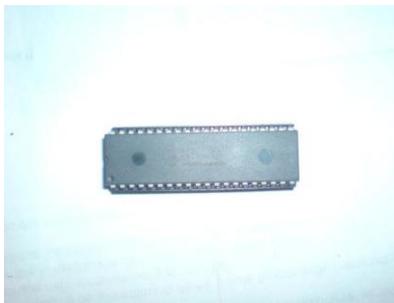
Figura 55. Circuito de acondicionamiento de señal



3.6 PROCESAMIENTO Y VISUALIZACIÓN

El microcontrolador elegido y programado para esta etapa es el 16F877, el programa desarrollado realiza la adquisición de la señal de voltaje, previamente acondicionada, hace su posterior digitalización, procesa los datos y presenta el resultado en LCD (liquid cristal display). El código del programa desarrollado se puede consultar en el anexo A

Figura 56. Microcontrolador PIC16f877



El microcontrolador PIC16F877, es fabricado por MicroChip familia a la cual se le denomina PIC. El modelo 16F877 posee varias características que hacen a este microcontrolador un dispositivo muy versátil, eficiente y practico para ser empleado en la aplicación.

Algunas de estas características son¹⁴

- Conversión analógica-digital de 10 bits
- Soporta modo de comunicación serial, posee dos pines para ello.
- Amplia memoria para datos y programa.
- Memoria reprogramable: La memoria en este PIC es la que se denomina FLASH; este tipo de memoria puede borrarse electrónicamente (esto corresponde a la “F” en el modelo).
- Set de instrucciones reducido (tipo RISC), pero con las instrucciones necesarias para facilitar su manejo.

Para el despliegue de la información, se optó por el uso de display de cristal liquido que permite además de la representación numérica de los datos la presentación de mensajes escritos.

¹⁴Microchip, PIC16F877, Data Shet, 28/40 Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers, 20

Figura 57. LCD utilizado para la presentación de resultados



4 PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR

Esta parte del trabajo se utilizó el pic16f877 el código del programa se desarrolla en MPLAB y las simulaciones se llevaron a cabo en el programa ISIS PROTEUS, el cual permite ver el funcionamiento de la programación y corregir errores, para comprobar el funcionamiento y realizar los cambios y ajustes necesarios antes de programar el PIC físicamente, dichas pruebas consistieron en la adquisición de una señal analógica de voltaje, la cual se puede variar por medio de un potenciómetro, que correspondería con la señal entregada por el circuito de recepción asociado al LDR, también se tiene una señal de referencia la cual permite variar el rango de la conversión, ésta señal se ha digitalizado a ocho bits.

Se realizó la programación para mostrar el resultado de la conversión analógica-digital en el LCD en formato decimal, el dato obtenido al ser procesado permitirá obtener el valor de nivel de combustible que corresponda para cada entrada.

El PIC16f877 realiza el manejo del LCD, permitiendo ver los mensajes programados; Los resultados de la simulación y pruebas del programa llevadas a cabo en el software ISIS PROTEUS, las podemos ver en los siguiente gráficos, donde también se observa la disposición de los componentes y el despliegue en LCD de los mensajes de bienvenida y del resultado de la conversión analógica-digital para un valor de voltaje determinado.

Figura 58. Programación del PIC 16f877, despliegue mensaje de bienvenida

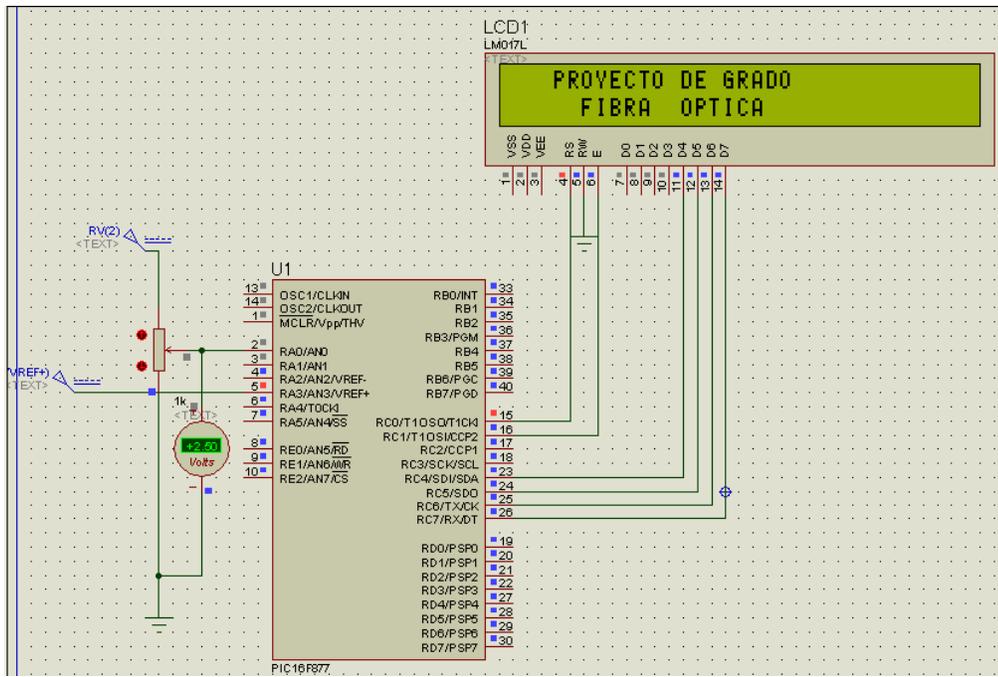
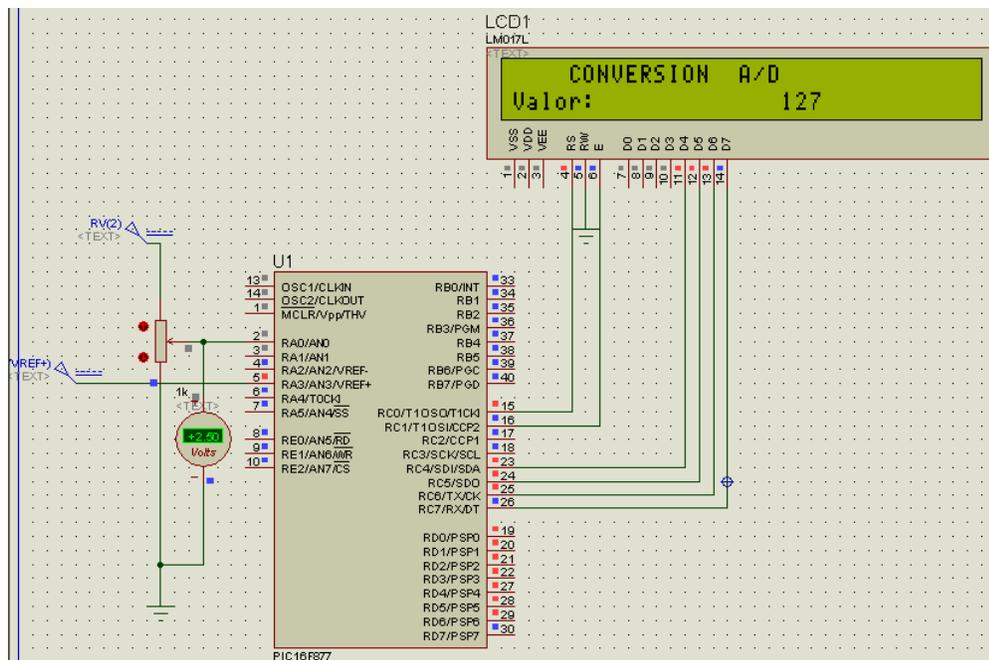


Figura 59. Programación del PIC 16f876, conversión analógica digital



5 RESULTADOS

La medición de datos se efectuó en un ambiente con temperatura promedio de 16° C y una humedad relativa del ambiente entre el 50% y 70%.

Se realizó un circuito de excitación para la fuente óptica (LED R3BSKNT), al cual se le suministra una corriente de 20 mA.

La señal óptica se transmite a través de FOP con un núcleo de diámetro 5mm, coincidiendo con el diámetro del LED.

El cálculo del ángulo crítico y el ángulo de aceptación, permitió hacer incidir la luz para ser transportada por FOP.

Los conectores fuente-fibra, colimador-fibra, y fibra-receptor, se realizaron en material plástico, el cual permite su conexión y desconexión.

La recepción de la señal óptica y su cambio a señal eléctrica, es conseguido con un LDR, al cual se asocia un circuito para estabilizar la señal.

El circuito de adaptación de la señal brindada por el LDR es implementado con el amplificador operacional LM324 el cual realiza resta y posteriormente, le da a la señal una ganancia antes de ser enviada al microprocesador.

La señal eléctrica, brindada por el receptor óptico es procesada por el microcontrolador PIC 16F877 para su posterior despliegue en un display de 2 filas.

Se obtuvo una eficiente proporcionalidad entre el nivel de combustible presente en un depósito, y la atenuación de la señal óptica, los resultados son desplegados en el LCD, allí se ha conseguido obtener ello a través de la fibra óptica y señales de luz (flujo fotónico), en consecuencia los resultados están representados en la variación de la señal óptica a la entrada del foto-detector y en la señal eléctrica obtenida a la salida de este, la cual se adecua para ser ingresada y procesada por el PIC, lo anterior en un sistema portátil que no hace uso de computador y que por eso lo hace portable, todo ello se consiguió colimando la señal óptica a la salida de la fibra y que recorre el depósito de combustible donde es acoplada a otra fibra que la lleva de regreso fuera del depósito, ahí se encuentra el circuito receptor que convierte las variaciones de señal de luz en señales eléctricas. Lo anterior se consiguió con el uso de fibra óptica plástica y un diodo emisor de luz que emite en el espectro visible, además se usó como foto-receptor una resistencia dependiente de la luz (LDR) lo cual no es común en aplicaciones de fibra óptica.

El depósito de combustible en el cual se realizó el trabajo tiene una altura aproximada de 23 cm, así que el rango de medición del sensor implementado va desde 0-13 cm (10 cm del colimador y acople de la segunda fibra), y el microcontrolador se programó para detectar variaciones en rangos cada 1 cm.

6. POBLEMAS ENCONTRADOS Y SOLUCIONES ADOPTADAS

Los cables de fibra óptica y por ende los diferentes suministros para estos sistemas aún no se consiguen en el mercado local.

Las primeras pruebas de transmisión se realizaron con fibra óptica multimodo de sílice, con diámetro de núcleo 65 micrómetros para la cual se realizaron dos “patch cord” de 1.50 metros cuyo desempeño se probó en una transmisión digital para la cual presentaron buen desempeño; El análisis se llevó a cabo en el certificador de patch cord que se aprecia en la siguiente figura.

Figura 60. Certificador de Patch Cords

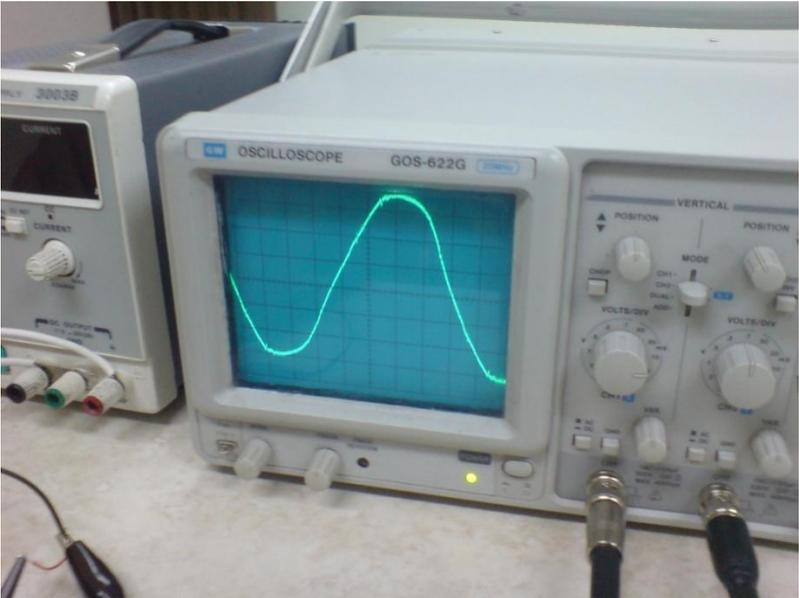


Se pensó en aprovechar las características de rebote de las señales del cercano infrarrojo, la fuente elegida entonces fue un Led cuyo pico de emisión es 940 nm y con ancho espectral de 40 nm (el costo de un LD de los utilizados para sistemas de telecomunicaciones ronda los 1000 dólares), una de las dificultades ésta vez fue la no concordancia de los diámetros fuente óptica (5mm) con fibra óptica (núcleo 65 micrómetros) lo cual redundó en baja potencia óptica transmitida por la dificultad del acople. Se optó por aprovechar las características de rebote de las señales IR, pero las pérdidas intrínsecas por atenuación en la fibra debidas a la presencia de los iones hidroxilo no permite el uso de esta frecuencia, así que se hace necesario el uso de otra frecuencia de la onda electromagnética. adquiriendo para el desarrollo del trabajo FOP, que permite mejor acople con la fuente óptica elegida, Led de 5mm, emitiendo en el espectro visible para evitar así las grandes pérdidas por el pico de atenuación en las señales del IR.

Figura 61. Acople fuente-fibra óptica multimodo, para transmisión de señal IR



Figura 62. Resultado de la transmisión de señal IR, por la Fibra Óptica



Se realizaron pruebas de transmisión por fibra óptica, con diferentes fuentes y receptores para verificar su desempeño; Utilizando la pareja led (fotoemisor), fototransistor (fotoreceptor), utilizados en un sensor de flujo de gases anestésicos, para aprovechar la amplificación brindada por el transistor, sin embargo no se obtuvieron resultados satisfactorios.

Figura 63. Sistema de anestesia, donde se tiene un sensor de flujo que utiliza el principio de transmisión óptica.

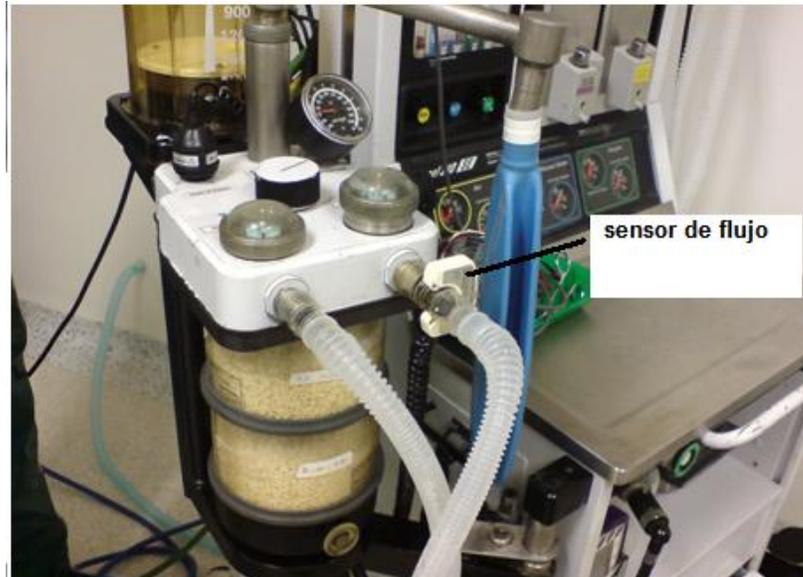


Figura 64. Sensor de Flujo



Se efectuó pruebas con la pareja led rojo fotodetector, del “finger sensor” que hace parte de un sistema de monitoreo de oximetría, sin obtener en este caso resultados concluyentes, que ayudaran al desarrollo del proyecto.

Figura 65. Principio de Deteccion de Oximetria

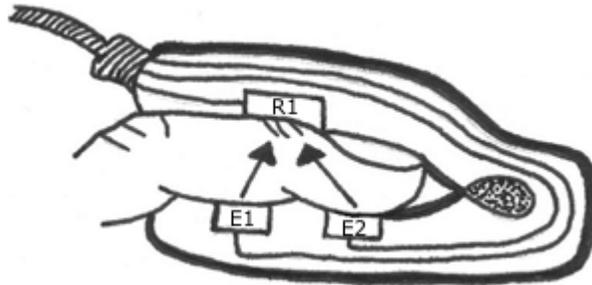


Figura 66. sensor con el cual se efectuó las pruebas

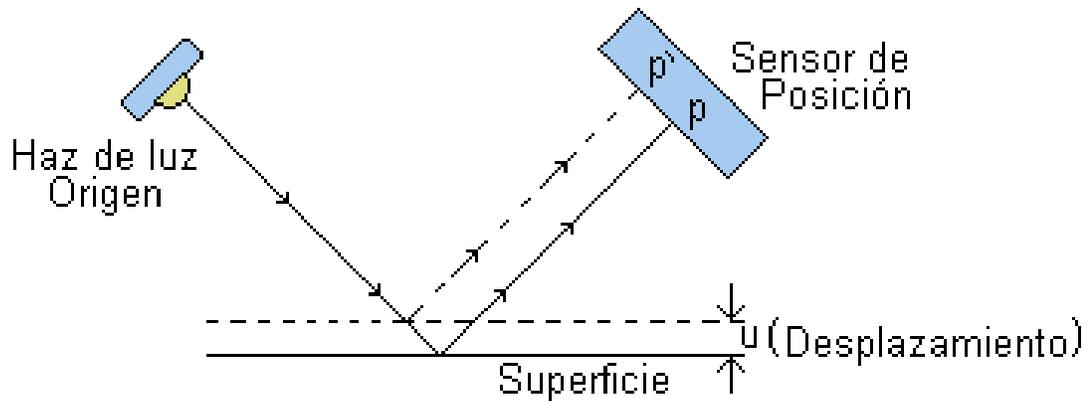


Figura 67. Fuente Óptica Utilizada, LED de 5mm



Los sensores de distancia que utilizan fibra óptica, se basan en el ángulo con el que la luz se refleja en el objeto de estudio, este principio para este caso no nos es útil, porque el objeto (combustible) puede presentar movimiento o perturbaciones que deformen su contorno, además conservar la geometría del sistema en este caso se hace muy difícil, los sensores de distancia por reflexión, requieren de un array de fotodetectores para determinar el ángulo de incidencia de la luz reflejada, y convertirla en un voltaje proporcional, lo que para este caso es inviable.

Figura 68. Sensor Óptico de Distancia por Reflexión



Para colimar la luz de entrada en la segunda fibra, se realizó ensayos con una lente utilizada en tacómetros digitales, pero esta presento un amplio punto focal debido a su fabricación en forma de rectángulo, lo cual no permitió aprovechar sus características para acoplar la señal en la fibra óptica.

Figura 69. Tacómetro Digital

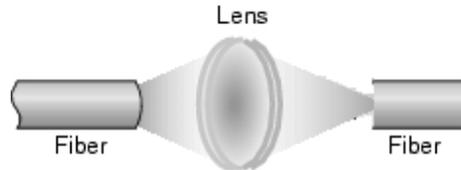


Figura 70. Lente bajo Prueba



Se adquirió una lente plano convexa (positiva) que permitiera la colimación necesaria para hacer incidir la luz en la fibra (debido a su radiancia), esta lente finalmente se pudo conseguir de un sistema binocular de aumento.

Figura 71. Colimación de señal en Transmisiones Ópticas



En el receptor se trabajó con los montajes tradicionales (amplificador de transimpedancia) para sistemas de fibra óptica y así obtener una corriente proporcional a la señal incidente para ser amplificada y transformada, sin obtener respuesta adecuada (debido a las particularidades del sistema), de tal suerte se consideró otro diseño que implica variación en la diferencia de potencial, para ello en el circuito de recepción se utilizó un LDR.

La luz ambiente influye negativamente en la respuesta del LDR, por tal razón los datos iniciales, resultaban poco repetibles, debido a esto, se hizo necesario ubicar el fotoreceptor donde la luz ambiente no tenga influencia.

Figura 72. Sensor LDR, Dentro del Conector Diseñado



Como en cualquier sistema de comunicación electro-óptico el acople de la señal entre los distintos elementos es un factor importante, por esta razón se requiere conectores que conlleven las menores pérdidas de señal posibles, en primera instancia se trabajó con conectores utilizados en salidas digitales de equipos de video, pero con ellos no se consiguió un buen desempeño.

Fue así como se hizo necesario la fabricación de los conectores fibra-fotoemisor, fibra-fotoreceptor, fibra-lente de colimación, estos conectores fueron encargados a un fabricante de tapas para succionadores quirúrgicos, pero en primer instancia fueron mal fabricados ya que no correspondían con las dimensiones solicitadas.

Conservar la linealidad del sistema fue una tarea difícil sabiendo que una leve desviación, afecta considerablemente el acople de la señal óptica en la fibra, por esta razón se requirió la fabricación de una guía de precisión la cual permite el movimiento del flotador en el depósito.

Figura 73. Guía para el Movimiento del Flotador

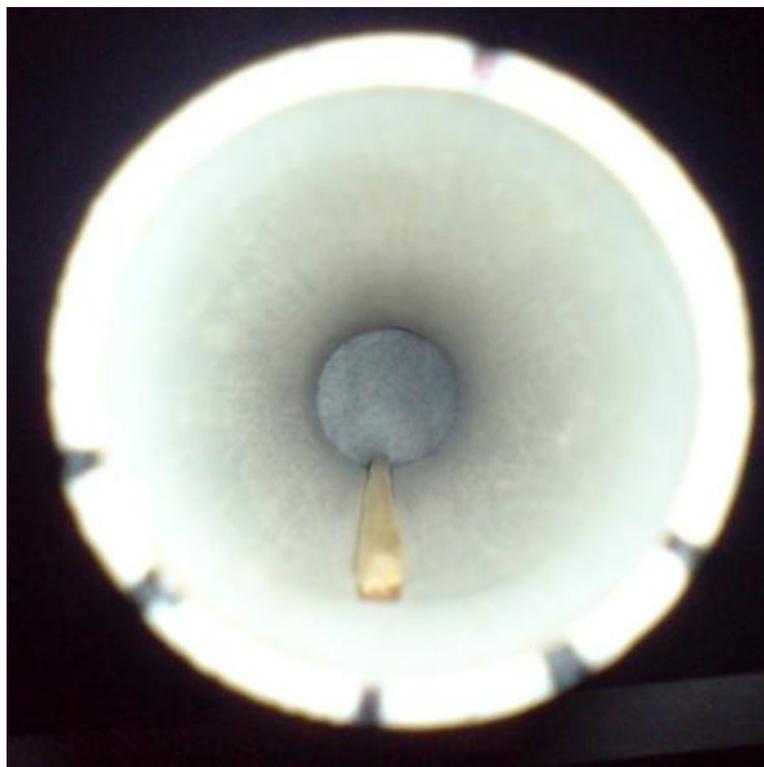


Figura 74. Flotador, donde se observa la pestaña de acople con la guía



En primera instancia los terminales de las fibras, estaban ubicados paralelos, para aprovechar la reflexión de la señal óptica en el combustible, dicha señal se reflejaba en un papel blanco y también se trabajo con un prisma que permitía el retorno de la señal, estos diseños finalmente no fueron implementados, por la dificultad que representa conservar la linealidad y geometría en el sistema.

Figura 75. Terminales de la fibra ubicados paralelos



Se probó con 2 diámetros para el tubo, para los cuales se realizó los adaptadores que vemos en la siguiente figura.

Figura 76. Conectores para diferentes diámetros del tubo



Finalmente la solución adoptada fue hacer la medición por el principio de haz transmitido y no por retro reflexión, este sistema se ve en la próxima figura

Figura 77. Medición por Haz Transmitido



7. CONCLUSIONES

Mediante el uso de FOP es posible la elaboración de un sensor que permite determinar el nivel de combustible en un depósito, este tipo de fibra presenta mayor apertura numérica, lo cual significa mayor potencia óptica acoplada, también permite medir distancias mayores que las conseguidas usando fibra óptica de sílice, ya que con fibra óptica plástica nos permite diseñar los conectores puesto que su implementación es menos compleja y es posible la colimación de la luz para ser acoplada dentro de la fibra

La distancia de detección de un sensor de fibra óptica dependerá directamente del tipo de fibra utilizado y del sistema de colimación.

La distancia alcanzada por una señal dentro de la fibra óptica depende de la frecuencia de la luz, además de la longitud del enlace, estas aproximaciones teóricas se confirman porque para una longitud de onda ubicada en el cercano infrarrojo, no se obtuvo buenos resultados confirmando los altos índices de pérdida de señal para estas longitudes de onda en la FOP.

En la selección de la fuente óptica es esencial considerar la eficiencia de la fuente, de ella dependerá la potencia óptica y a su vez el nivel de señal acoplado a la fibra para ser transmitido.

Los resultados de medición de nivel logrados son de 13 cm, este es el nivel del depósito construido para la implementación del circuito, éste rango se puede aumentar implementando sistemas de colimación de la luz.

Los estudios en las aplicaciones de la tecnología de fibra óptica están extendidos mundialmente dichos estudios son enfocados a lograr detecciones muy precisas muy cortas y de precisión, en este caso se ha optado buscar otro enfoque y ampliar el rango de detección de distancia lo cual se consiguió llegando a medir 13 cm .

La mayoría de los estudios de distancia de detección en sensores recurren al ángulo de reflexión, en este trabajo se hizo analizando la pérdida de señal.

A diferencia de los sistemas de comunicación de datos, el sistema implementado de detección de nivel de combustible es poco susceptible a la dispersión cromática o modal y a la BER (bit error rate) Debido al tiempo de respuesta de los LDR estos no son utilizados en sistemas de comunicación de datos digitales, pero para la presente aplicación el tiempo de respuesta no es un factor determinante, los rangos de detección del sistema de comunicación por fibra para detectar el nivel de combustible en un depósito pueden ser variados fácilmente porque la programación del microcontrolador así lo permite.

Los resultados obtenidos al detectar el nivel de combustible en un depósito evidencian la posibilidad de aplicar este tipo de sensores en mediciones no convencionales, ambientes potencialmente peligrosos por ejemplo donde existen altas concentraciones de oxígeno.

8. RECOMENDACIONES

Continuar la investigación y el trabajo iniciado con la fabricación de un sistema de comunicaciones basado en el flujo fotónico para detectar el nivel de combustible en un depósito para mejorar los rangos de detección y encontrar nuevas aplicaciones, para este sistema.

Desarrollar talleres de comunicación vía fibra óptica que permita la enseñanza practica de esta tecnología.

Elaborar un sistema de multiplexación, donde sea posible el envío y recepción de señales de distinto origen.

Diseñar un sensor óptico con precisión milimétrica que permita determinar el nivel de desgaste en algunos materiales utilizados en equipos industriales.

Apoyar los proyectos que planteen el estudio de la fibra óptica por cuanto esta tecnología está siendo implementada a nivel mundial.

BIBLIOGRAFIA

JARDÓN AGUILAR, Hildeberto, LINARES, Roberto. Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas, México, D.F: Alfaomega, 1995. Cap 6,7 8.

DE LEON GUERRERO, Rubén, Comunicaciones Ópticas. E.T.S.I.T UPM, Madrid 2004-2005

BRADLEY Allen, Sensores Fotoeléctricos. [en línea]. Enero de 2000. Disponible en internet: <[http:// www.ab.com](http://www.ab.com)>

FINN Alonso, Física volumen 2, Campos y Ondas Electromagnéticas, editorial Addison, pg 792

RYER, Alex, Light Measurement Handbook. International light Inc. [en línea]. 1998 Disponible en internet: < <http://www.intl-light.com/handbook/>>

CADAVID, Diana Maria, RODRIGUEZ, Laura. Implementación de un Sistema Didáctico de Transmisión de voz por Fibra Óptica Usando WDM. Universidad del Valle. Cali. 2004.

SANCHEZ DEL SOTO, Mariano, CORBELLE SANCHEZ, José Antonio. Prácticas de electrónica: Transmisión digital a través de fibra óptica. Madrid: McGraw-Hill, 1992, 164p-167p.

URREA, Juan Pablo, Medidas de Atenuación en Fibra Óptica, Grupo de Microelectrónica y Control, Universidad de Antioquia

PAREDES, Omar, Conferencia sobre fibra óptica. San Juan de Pasto, Diciembre 2007

MICROCHIP, PIC16F877, Data Sheet, 28/40 Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers, 2001

WAYNE Tomasi, MATA Gloria, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Cuarta edición, prentice hall, 452p-455p.

ÁNGULO USATEGUI, José María, Microcontroladores PIC, Diseño Practico de Aplicaciones.

PULSE OXIMETER OPERATOR MANUAL, Ver.2.0E

ANEXOS

Anexo B. Hoja de datos PIC16F877



PIC16F87X

28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers

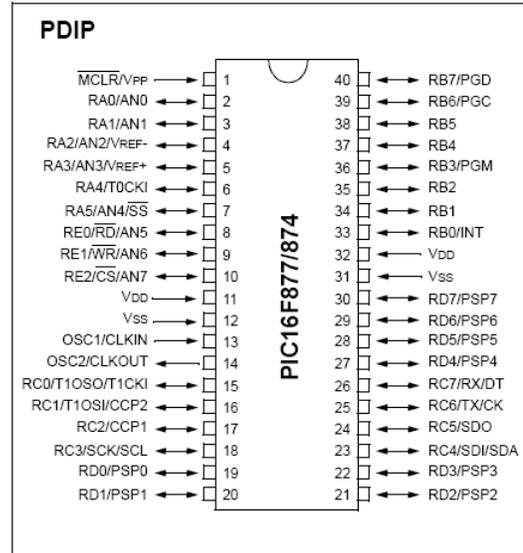
Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873
- PIC16F876
- PIC16F874
- PIC16F877

Microcontroller Core Features:

- High performance RISC CPU
- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input
DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM)
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to the PIC16C73B/74B/76/77
- Interrupt capability (up to 14 sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and
Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low power, high speed CMOS FLASH/EEPROM
technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP) via two
pins
- Single 5V In-Circuit Serial Programming capability
- In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial, Industrial and Extended temperature
ranges
- Low-power consumption:
 - < 0.6 mA typical @ 3V, 4 MHz
 - 20 µA typical @ 3V, 32 kHz
 - < 1 µA typical standby current

Pin Diagram

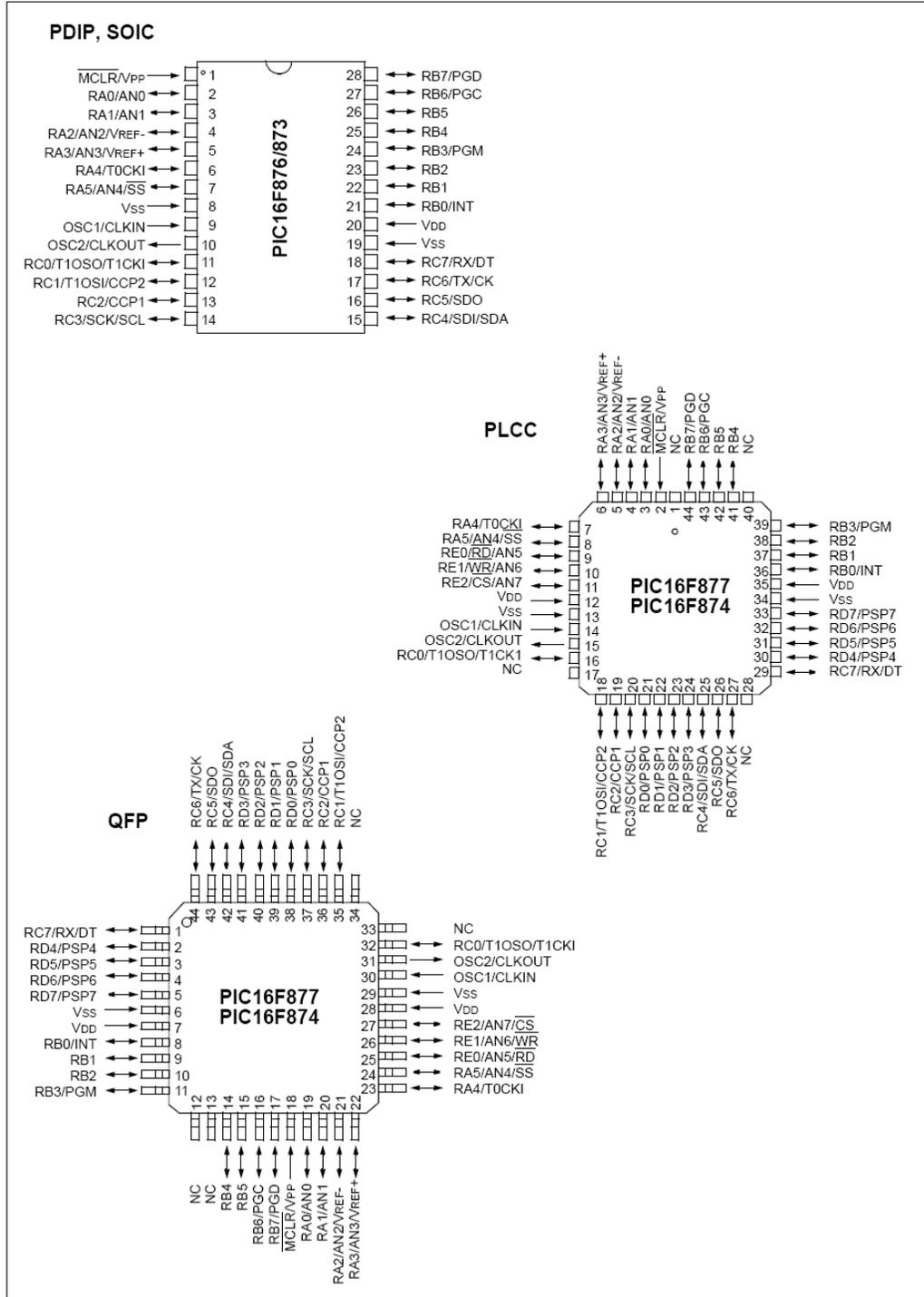


Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,
can be incremented during SLEEP via external
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master
mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address
detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with
external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for
Brown-out Reset (BOR)

PIC16F87X

Pin Diagrams



MAPA DE MEORIA PARA DATOS 16F874/877

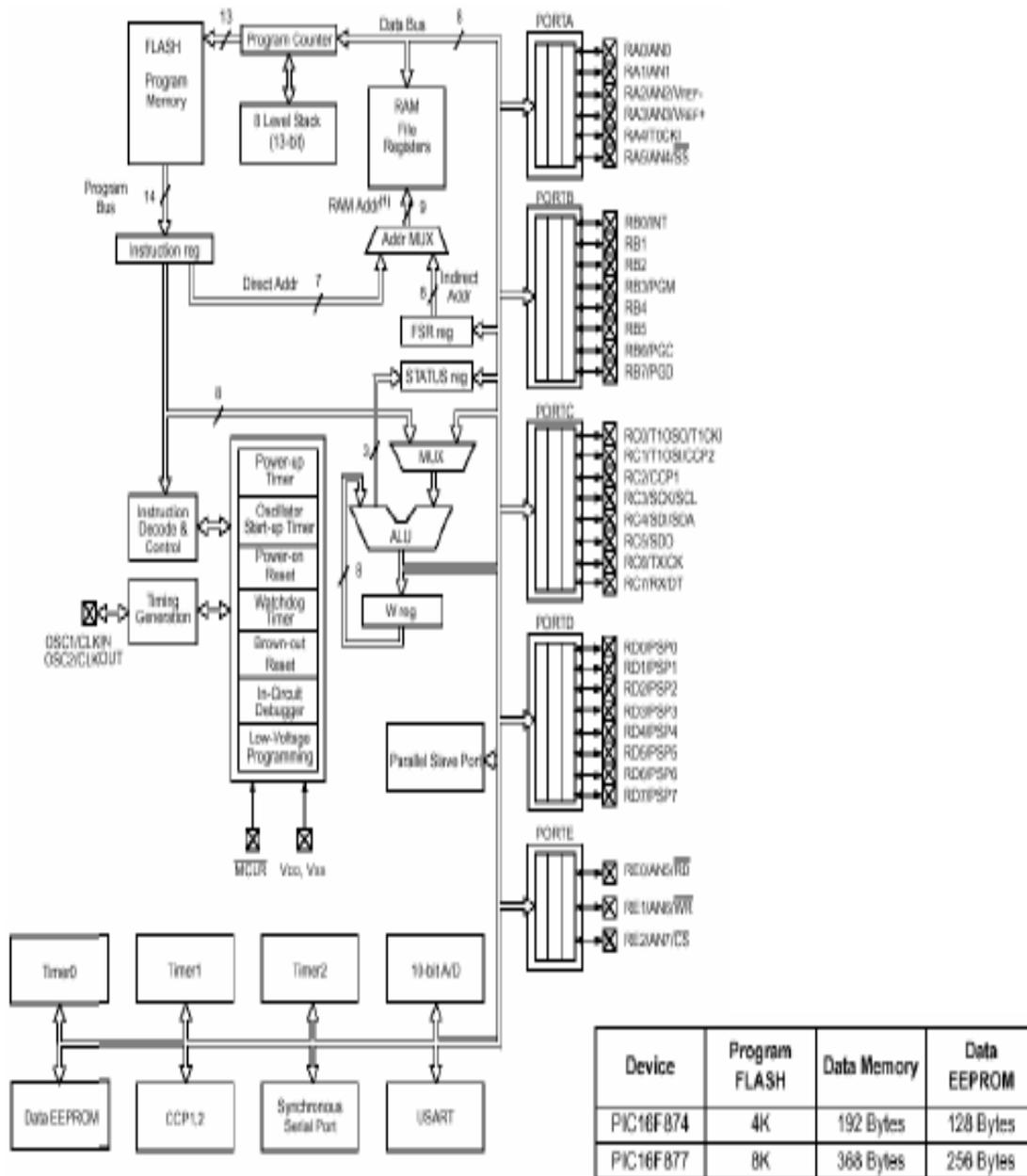
FIGURE 2-3: PIC16F876A/877A REGISTER FILE MAP

File Address	File Address	File Address	File Address
Indirect addr. ⁽¹⁾ 00h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 80h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 100h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 180h
TMR0 01h	OPTION_REG 81h	TMR0 101h	OPTION_REG 181h
PCL 02h	PCL 82h	PCL 102h	PCL 182h
STATUS 03h	STATUS 83h	STATUS 103h	STATUS 183h
FSR 04h	FSR 84h	FSR 104h	FSR 184h
PORTA 05h	TRISA 85h	105h	185h
PORTB 06h	TRISB 86h	PORTB 106h	TRISB 186h
PORTC 07h	TRISC 87h	107h	187h
PORTD ⁽¹⁾ 08h	TRISD ⁽¹⁾ 88h	108h	188h
PORTE ⁽¹⁾ 09h	TRISE ⁽¹⁾ 89h	109h	189h
PCLATH 0Ah	PCLATH 8Ah	PCLATH 10Ah	PCLATH 18Ah
INTCON 0Bh	INTCON 8Bh	INTCON 10Bh	INTCON 18Bh
PIR1 0Ch	PIE1 8Ch	EEDATA 10Ch	EECON1 18Ch
PIR2 0Dh	PIE2 8Dh	EEADR 10Dh	EECON2 18Dh
TMR1L 0Eh	PCON 8Eh	EEDATH 10Eh	Reserved ⁽²⁾ 18Eh
TMR1H 0Fh	8Fh	EEADRH 10Fh	Reserved ⁽²⁾ 18Fh
T1CON 10h	90h	110h	190h
TMR2 11h	SSPCON2 91h	111h	191h
T2CON 12h	PR2 92h	112h	192h
SSPBUF 13h	SSPADD 93h	113h	193h
SSPCON 14h	SSPSTAT 94h	114h	194h
CCPR1L 15h	95h	115h	195h
CCPR1H 16h	96h	116h	196h
CCP1CON 17h	97h	117h	197h
RCSTA 18h	TXSTA 98h	118h	198h
TXREG 19h	SPBRG 99h	119h	199h
RCREG 1Ah	9Ah	11Ah	19Ah
CCPR2L 1Bh	9Bh	11Bh	19Bh
CCPR2H 1Ch	CMCON 9Ch	11Ch	19Ch
CCP2CON 1Dh	CVRCON 9Dh	11Dh	19Dh
ADRESH 1Eh	ADRESL 9Eh	11Eh	19Eh
ADCON0 1Fh	ADCON1 9Fh	11Fh	19Fh
20h	A0h	120h	1A0h
General Purpose Register 96 Bytes	General Purpose Register 80 Bytes	General Purpose Register 80 Bytes	General Purpose Register 80 Bytes
7Fh	EFh	16Fh	1EFh
Bank 0	accesses 70h-7Fh	accesses 70h-7Fh	accesses 70h - 7Fh
	F0h	170h	1F0h
	FFh	17Fh	1FFh
Bank 1	Bank 2	Bank 3	

Unimplemented data memory locations, read as '0'.
¹ Not a physical register.

Note 1: These registers are not implemented on the PIC16F876A.
Note 2: These registers are reserved; maintain these registers clear.

2.2-2 Visión Interna PIC16F874/877.



PIC16F87X

Key Features PICmicro™ Mid-Range Reference Manual (DS33023)	PIC16F873	PIC16F874	PIC16F876	PIC16F877
Operating Frequency	DC - 20 MHz			
RESETS (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
FLASH Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory	128	128	256	256
Interrupts	13	14	13	14
I/O Ports	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E
Timers	3	3	3	3
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	2	2
Serial Communications	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
Parallel Communications	—	PSP	—	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	5 input channels	8 input channels	5 input channels	8 input channels
Instruction Set	35 instructions	35 instructions	35 instructions	35 instructions

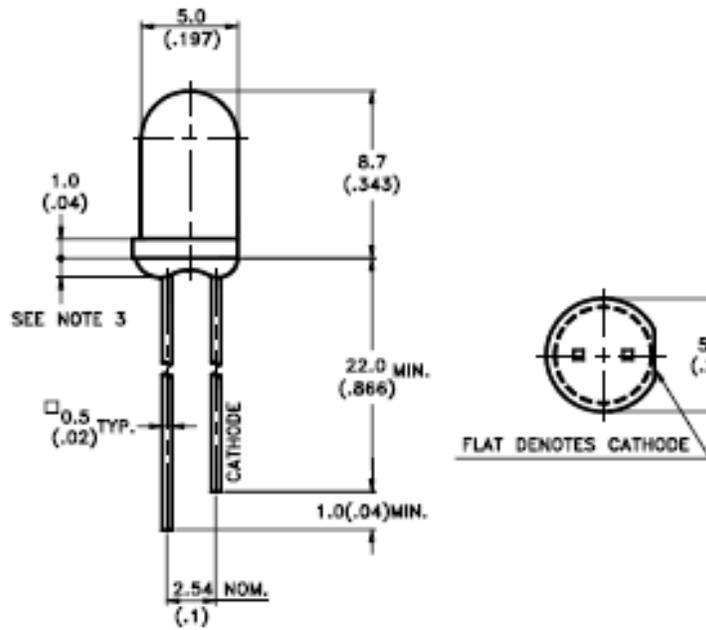
Anexo C. Hoja de Características del LED

LITEON

LITE-ON ELECTRONIC

Property of Lite-On Only

Package Dimensions



Notes:

1. All dimensions are in millimeters (inches).
2. Tolerance is $\pm 0.25\text{mm} (.010")$ unless otherwise noted.
3. Protruded resin under flange is 1.0mm (.04") max.
4. Lead spacing is measured where the leads emerge from the package.

Absolute Maximum Ratings at TA=25°C

Parameter	Super Red	Red	Red Orange	Red Orange	Yellow Orange	Amber Yellow	Yellow	Unit
Power Dissipation	120	120	120	120	120	120	120	mW
Peak Forward Current (1/10 Duty Cycle, 0.1ms Pulse Width)	130	130	90	90	90	90	90	mA
Continuous Forward Current	50	50	50	50	50	50	50	mA
Derating Linear From 70°C	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	mA/°C
Reverse Voltage (IR =100 μA)	5	5	5	5	5	5	5	V
Operating Temperature Range	-40°C to +100°C							
Storage Temperature Range	-55°C to +100°C							
Lead Soldering Temperature [1.6mm(.063") From Body]	260°C for 5 Seconds							

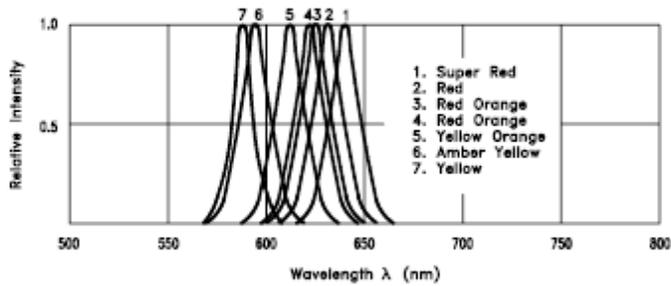


Fig.1 Relative Intensity vs. Wavelength

Electrical / Optical Characteristics at TA=25°C (R Series)

Parameter	Symbol	Part No. (LTL)	Min.	Typ.	Max.	Unit
Luminous Intensity	Iv	2R3VRKNT	520	990		mcd
		2R3VEKNT	680	1200		
		2R3VHKNT	680	1300		
		2R3VAKNT	680	1300		
		2R3VFKNT	680	1300		
		2R3VYKNT	680	1300		
		2R3VSKNT	680	1200		
Viewing Angle	2 θ1/2			30		deg
Peak Emission Wavelength	λP	2R3VRKNT		639		nm
		2R3VEKNT		632		
		2R3VHKNT		624		
		2R3VAKNT		621		
		2R3VFKNT		611		
		2R3VYKNT		595		
		2R3VSKNT		588		
Dominant Wavelength	λd	2R3VRKNT		631		nm
		2R3VEKNT		624		
		2R3VHKNT		618		
		2R3VAKNT		615		
		2R3VFKNT		605		
		2R3VYKNT		592		
		2R3VSKNT		587		
Spectral Line Half-Width	Δλ	2R3VRKNT		20		nm
		2R3VEKNT		20		
		2R3VHKNT		18		
		2R3VAKNT		18		
		2R3VFKNT		17		
		2R3VYKNT		16		
		2R3VSKNT		15		
Forward Voltage	Vf	2R3VRKNT		1.9	2.3	V
		2R3VEKNT		2.0	2.4	
		2R3VHKNT		2.0	2.4	
		2R3VAKNT		2.0	2.4	
		2R3VFKNT		2.0	2.4	
		2R3VYKNT		2.0	2.4	
		2R3VSKNT		2.0	2.4	
Reverse Current	I _r				100	μA
Capacitance	C			40		pF



Typical Electrical / Optical Characteristics Curves

(25°C Ambient Temperature Unless Otherwise Noted)

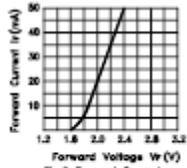


Fig.2 Forward Current vs. Forward Voltage

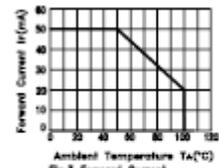


Fig.3 Forward Current Derating Curve

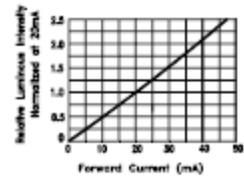


Fig.4 Relative Luminous Intensity vs. Forward Current

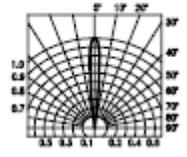


Fig.5-1 Spatial Distribution

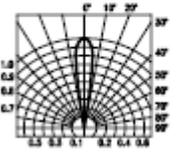


Fig.5-2 Spatial Distribution

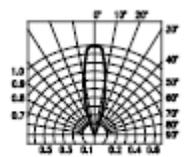


Fig.5-3 Spatial Distribution

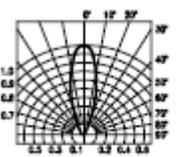


Fig.5-4 Spatial Distribution

Anexo D. Hoja de Características FOP

	FIBRA OPTICA PLASTICA 5MM	C-2870
<small>Transcripción de la información técnica original del fabricante. Los nombres registrados y marcas que se citan son propiedad de sus respectivos titulares.</small>		
Características de la fibra óptica:		Instalación:
Diámetro exterior	5,0 mm	Es necesario cortar los dos extremos de la fibra óptica plástica muy perpendicularmente al eje.
Masa lineal	4 kg/km	
Radio de curvatura dinámico	25 mm	
Radio de curvatura estático	17 mm	
Resistencia a la tracción	6 daN	Aplicaciones:
Resistencia a la temperatura	-40 a 85°C	- transmisión de datos punto a punto.
Vaina exterior de protección	polyetileno	- corta distancia
Índice de refracción (corazón)	1492	- para instalaciones interiores
Índice de refracción de la cubierta	1417	- perfectamente adaptado para ambientes industriales.
Atenuación	<180 dB/km	

Este componente está destinado para su uso por parte de profesionales, o usuarios con un nivel técnico o conocimientos suficientes, que les permita desarrollar por sí mismos los proyectos o aplicaciones deseados. Por este motivo no se facilitará asistencia técnica sobre problemas de implementación del citado componente en las aplicaciones en las que son empleado.
Para cualquier problema relativo al funcionamiento del producto (excluidos los problemas de aplicación), póngase en contacto con nuestro departamento técnico. Fax: 93 432 29 95.
Correo electrónico: cs@fadisel.com. La documentación técnica de este producto responde a una transcripción de la proporcionada por el fabricante.
Los productos de la familia "Componentes" de Cebel disponen de 1 año de garantía a partir de la fecha de compra. Quedan excluidos el trato o manipulación incorrectos.
Disponemos de más productos que pueden interesarle, visítenos en www.fadisel.com ó solicite GRATUITAMENTE nuestro catálogo.

LM124/LM224/LM324/LM2902

Low Power Quad Operational Amplifiers

General Description

The LM124 series consists of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, DC gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM124 series can be directly operated off of the standard +5V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional $\pm 15V$ power supplies.

Unique Characteristics

- n In the linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage
- n The unity gain cross frequency is temperature compensated
- n The input bias current is also temperature compensated

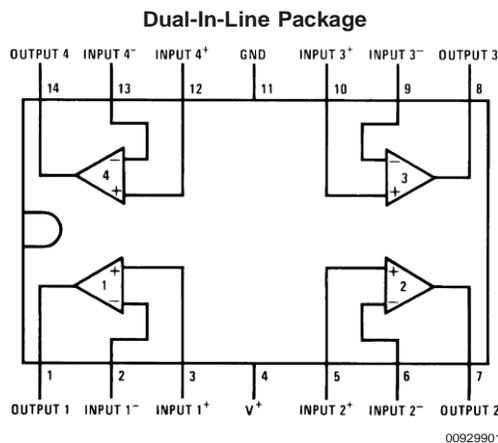
Advantages

- n Eliminates need for dual supplies
- n Four internally compensated op amps in a single package
- n Allows directly sensing near GND and V_{OUT} also goes to GND
- n Compatible with all forms of logic
- n Power drain suitable for battery operation

Features

- n Internally frequency compensated for unity gain
- n Large DC voltage gain 100 dB
- n Wide bandwidth (unity gain) 1 MHz (temperature compensated)
- n Wide power supply range:
Single supply 3V to 32V
or dual supplies $\pm 1.5V$ to $\pm 16V$
- n Very low supply current drain (700 μA)—essentially independent of supply voltage
- n Low input biasing current 45 nA (temperature compensated)
- n Low input offset voltage 2 mV and offset current: 5 nA
- n Input common-mode voltage range includes ground
- n Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- n Large output voltage swing 0V to $V^+ - 1.5V$

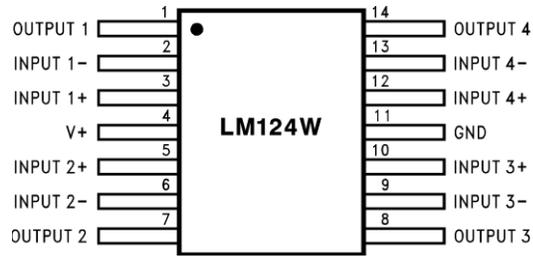
Connection Diagrams



Top View

Order Number LM124J, LM124AJ, LM124J/883 (Note 2), LM124AJ/883 (Note 1), LM224J, LM224AJ, LM324J, LM324M, LM324MX, LM324AM, LM324AMX, LM2902M, LM2902MX, LM324N, LM324AN, LM324MTd, LM324MTX or LM2902N LM124AJRQML and LM124AJRQMLV (Note 3)
See NS Package Number J14A, M14A or N14A

Connection Diagrams (Continued)



00929933

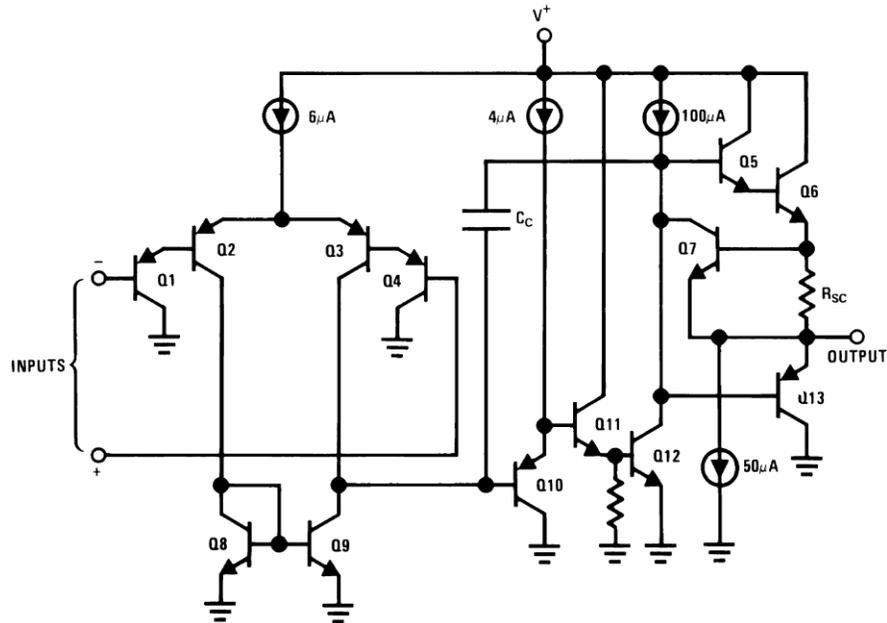
Order Number LM124AW/883, LM124AWG/883, LM124W/883 or LM124WG/883
LM124AWRQML and LM124AWRQMLV(Note 3)
See NS Package Number W14B
LM124AWGRQML and LM124AWGRQMLV(Note 3)
See NS Package Number WG14A

Note 1: LM124A available per JM38510/11006

Note 2: LM124 available per JM38510/11005

Note 3: See STD Mil DWG 5962R99504 for Radiation Tolerant Device

Schematic Diagram (Each Amplifier)



00929902

Absolute Maximum Ratings (Note 12)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/

Distributors for availability and specifications.

	LM124/LM224/LM324 LM124A/LM224A/LM324A	LM2902
Supply Voltage, V ⁺	32V	26V
Differential Input Voltage	32V	26V
Input Voltage	-0.3V to +32V	-0.3V to +26V
Input Current (V _{IN} < -0.3V) (Note 6)	50 mA	50 mA
Power Dissipation (Note 4)		
Molded DIP	1130 mW	1130 mW
Cavity DIP	1260 mW	1260 mW
Small Outline Package	800 mW	800 mW
Output Short-Circuit to GND (One Amplifier) (Note 5) V ⁺ ≤ 15V and T _A = 25°C	Continuous	Continuous
Operating Temperature Range		-40°C to +85°C
LM324/LM324A	0°C to +70°C	
LM224/LM224A	-25°C to +85°C	
LM124/LM124A	-55°C to +125°C	
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	260°C	260°C
Soldering Information		
Dual-In-Line Package		
Soldering (10 seconds)	260°C	260°C
Small Outline Package		
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.		
ESD Tolerance (Note 13)	250V	250V

Electrical Characteristics

V⁺ = +5.0V, (Note 7), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM124A			LM224A			LM324A			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	(Note 8) T _A = 25°C		1	2		1	3		2	3	mV
Input Bias Current (Note 9)	I _{IN(+)} or I _{IN(-)} , V _{CM} = 0V, T _A = 25°C		20	50		40	80		45	100	nA
Input Offset Current	I _{IN(+)} or I _{IN(-)} , V _{CM} = 0V, T _A = 25°C		2	10		2	15		5	30	nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note 10)	V ⁺ = 30V, (LM2902, V ⁺ = 26V), T _A = 25°C		0	V ⁺ -1.5		0	V ⁺ -1.5		0	V ⁺ -1.5	V
Supply Current	Over Full Temperature Range R _L = ∞ On All Op Amps V ⁺ = 30V (LM2902 V ⁺ = 26V) V ⁺ = 5V		1.5	3		1.5	3		1.5	3	mA
			0.7	1.2		0.7	1.2		0.7	1.2	
Large Signal Voltage Gain	V ⁺ = 15V, R ≥ 2kΩ, (V _O = 1V to 11V), T _A = 25°C		50	100		50	100		25	100	V/mV
Common-Mode	DC, V _{CM} = 0V to V ⁺ - 1.5V,		70	85		70	85		65	85	dB

Electrical Characteristics (Continued)

V⁺ = +5.0V, (Note 7), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM124A			LM224A			LM324A			Units	
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
Rejection Ratio	T _A = 25°C											
Power Supply Rejection Ratio	V ⁺ = 5V to 30V (LM2902, V ⁺ = 5V to 26V), T _A = 25°C	65	100		65	100		65	100		dB	
Amplifier-to-Amplifier Coupling (Note 11)	f = 1 kHz to 20 kHz, T _A = 25°C (Input Referred)			-120			-120			-120	dB	
Output Current	Source	V _{IN⁺} = 1V, V _{IN⁻} = 0V, V ⁺ = 15V, V _O = 2V, T _A = 25°C			20	40		20	40		mA	
	Sink	V _{IN⁻} = 1V, V _{IN⁺} = 0V, V ⁺ = 15V, V _O = 2V, T _A = 25°C			10	20		10	20			
		V _{IN⁻} = 1V, V _{IN⁺} = 0V, V ⁺ = 15V, V _O = 200 mV, T _A = 25°C			12	50		12	50		μA	
Short Circuit to Ground	(Note 5) V ⁺ = 15V, T _A = 25°C		40	60		40	60		40	60	mA	
Output Offset Voltage	(Note 8)			4			4			5	mV	
Input Offset Drift	R _S = 0Ω		7	20		7	20		7	30	μV/°C	
Input Offset Current	I _{IN(+)} - I _{IN(-)} , V _{CM} = 0V			30			30			75	nA	
Input Offset Current Drift	R _S = 0Ω		10	200		10	200		10	300	pA/°C	
Input Bias Current	I _{IN(+)} or I _{IN(-)}		40	100		40	100		40	200	nA	
Input Common-Mode Voltage Range (Note 10)	V ⁺ = +30V (LM2902, V ⁺ = 26V)	0		V ⁺ -2	0		V ⁺ -2	0		V ⁺ -2	V	
Large Signal Voltage Gain	V ⁺ = +15V (V _O Swing = 1V to 11V) R _L ≥ 2 kΩ	25			25			15			V/mV	
Output Voltage Swing	V _{OH}	V ⁺ = 30V	R _L = 2 kΩ			26			26			V
		(LM2902, V ⁺ = 26V)	R _L = 10 kΩ			27	28		27	28		
	V _{OL}	V ⁺ = 5V, R _L = 10 kΩ			5	20		5	20		mV	
Output Current	Source	V _O = 2V		V _{IN⁺} = +1V, V _{IN⁻} = 0V, V ⁺ = 15V	10	20		10	20		mA	
	Sink			V _{IN⁻} = +1V, V _{IN⁺} = 0V, V ⁺ = 15V	10	15		5	8			

Electrical Characteristics

V⁺ = +5.0V, (Note 7), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM124/LM224			LM324		LM2902		Units		
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min		Typ	Max
Input Offset Voltage	(Note 8) T _A = 25°C		2	5		2	7		2	7	mV
Input Bias Current (Note 9)	I _{IN(+)} or I _{IN(-)} , V _{CM} = 0V, T _A = 25°C		45	150		45	250		45	250	nA
Input Offset Current	I _{IN(+)} or I _{IN(-)} , V _{CM} = 0V, T _A = 25°C		3	30		5	50		5	50	nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note 10)	V ⁺ = 30V, (LM2902, V ⁺ = 26V), T _A = 25°C	0		V ⁺ -1.5	0		V ⁺ -1.5	0		V ⁺ -1.5	V

Electrical Characteristics (Continued)

$V^+ = +5.0V$, (Note 7), unless otherwise stated

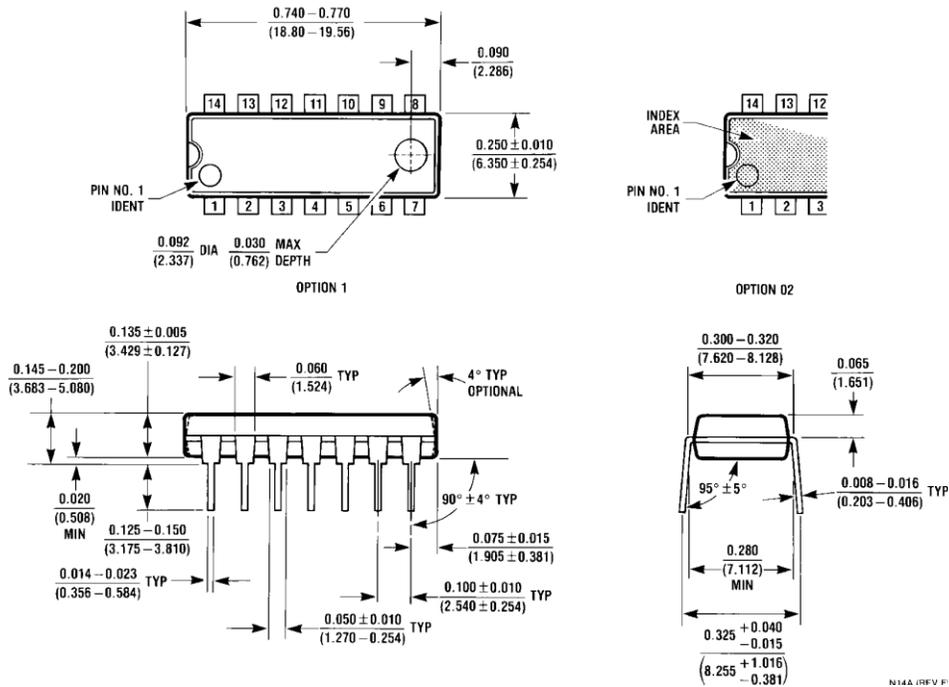
Parameter	Conditions	LM124/LM224			LM324			LM2902			Units		
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max			
Supply Current	Over Full Temperature Range $R_L = \infty$ On All Op Amps $V^+ = 30V$ (LM2902 $V^+ = 26V$) $V^+ = 5V$		1.5	3		1.5	3		1.5	3	mA		
			0.7	1.2		0.7	1.2		0.7	1.2			
Large Signal Voltage Gain	$V^+ = 15V$, $R \geq 2k\Omega$, ($V_O = 1V$ to $11V$), $T_A = 25^\circ C$	50	100		25	100		25	100		V/mV		
Common-Mode Rejection Ratio	DC, $V_{CM} = 0V$ to $V^+ - 1.5V$, $T_A = 25^\circ C$	70	85		65	85		50	70		dB		
Power Supply Rejection Ratio	$V^+ = 5V$ to $30V$ (LM2902, $V^+ = 5V$ to $26V$), $T_A = 25^\circ C$	65	100		65	100		50	100		dB		
Amplifier-to-Amplifier Coupling (Note 11)	$f = 1$ kHz to 20 kHz, $T_A = 25^\circ C$ (Input Referred)		-120			-120			-120		dB		
Output Current	Source	$V_{IN}^+ = 1V$, $V_{IN}^- = 0V$, $V^+ = 15V$, $V_O = 2V$, $T_A = 25^\circ C$		20	40		20	40		20	40	mA	
	Sink	$V_{IN}^- = 1V$, $V_{IN}^+ = 0V$, $V^+ = 15V$, $V_O = 2V$, $T_A = 25^\circ C$		10	20		10	20		10	20		
		$V_{IN}^- = 1V$, $V_{IN}^+ = 0V$, $V^+ = 15V$, $V_O = 200$ mV, $T_A = 25^\circ C$		12	50		12	50		12	50	μA	
Short Circuit to Ground	(Note 5) $V^+ = 15V$, $T_A = 25^\circ C$		40	60		40	60		40	60	mA		
Output Offset Voltage	(Note 8)			7			9			10	mV		
Input Offset Drift	$R_S = 0\Omega$			7			7			7	$\mu V/^\circ C$		
Output Offset Current	$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$, $V_{CM} = 0V$					100			150	45	200	nA	
Input Offset Drift	$R_S = 0\Omega$			10			10			10	$pA/^\circ C$		
Input Bias Current	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$		40	300		40	500		40	500	nA		
Input Common-Mode Voltage Range (Note 10)	$V^+ = +30V$ (LM2902, $V^+ = 26V$)	0		$V^+ - 2$	0		$V^+ - 2$	0		$V^+ - 2$	V		
Large Signal Voltage Gain	$V^+ = +15V$ (V_O Swing = $1V$ to $11V$) $R_L \geq 2$ k Ω		25			15			15		V/mV		
Output Voltage Swing	V_{OH}	$V^+ = 30V$ (LM2902, $V^+ = 26V$)					26			22	V		
	V_{OL}	$V^+ = 5V$, $R_L = 10$ k Ω		5	20		5	20		5		100	
Output Current	Source	$V_O = 2V$	$V_{IN}^+ = +1V$, $V_{IN}^- = 0V$, $V^+ = 15V$		10	20		10	20		10	20	mA
	Sink		$V_{IN}^- = +1V$, $V_{IN}^+ = 0V$, $V^+ = 15V$		5	8		5	8		5	8	

Note 4: For operating at high temperatures, the LM324/LM324A/LM2902 must be derated based on a $+125^\circ C$ maximum junction temperature and a thermal resistance of $88^\circ C/W$ which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM224/LM224A and LM124/LM124A can be derated based on a $+150^\circ C$ maximum junction temperature. The dissipation is the total of all four amplifiers—use external resistors, where possible, to allow the amplifier to saturate of to reduce the power which is dissipated in the integrated circuit.

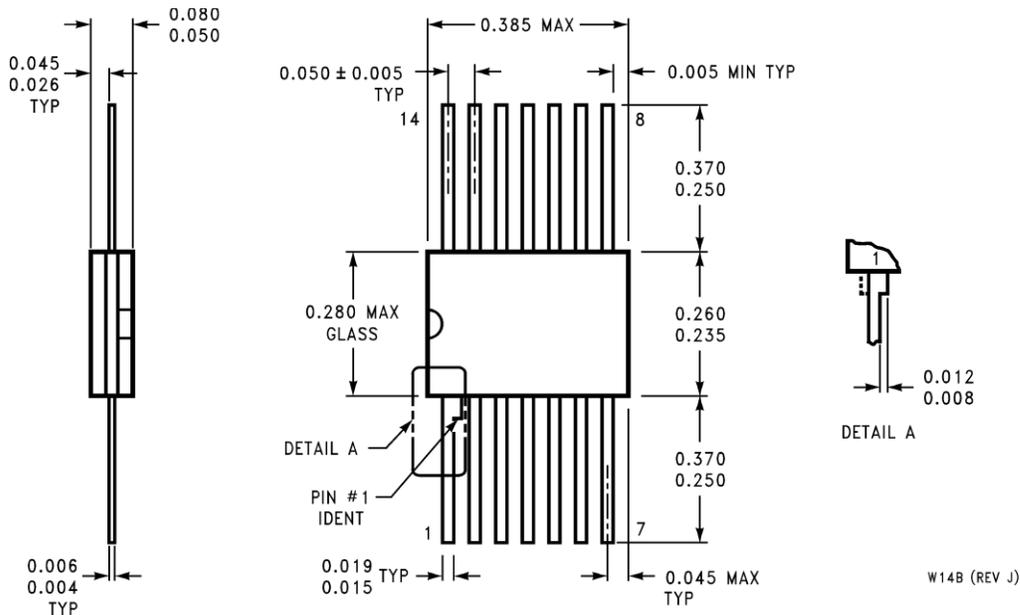
Note 5: Short circuits from the output to V^+ can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V^+ . At values of supply voltage in excess of $+15V$, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

Note 6: This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)

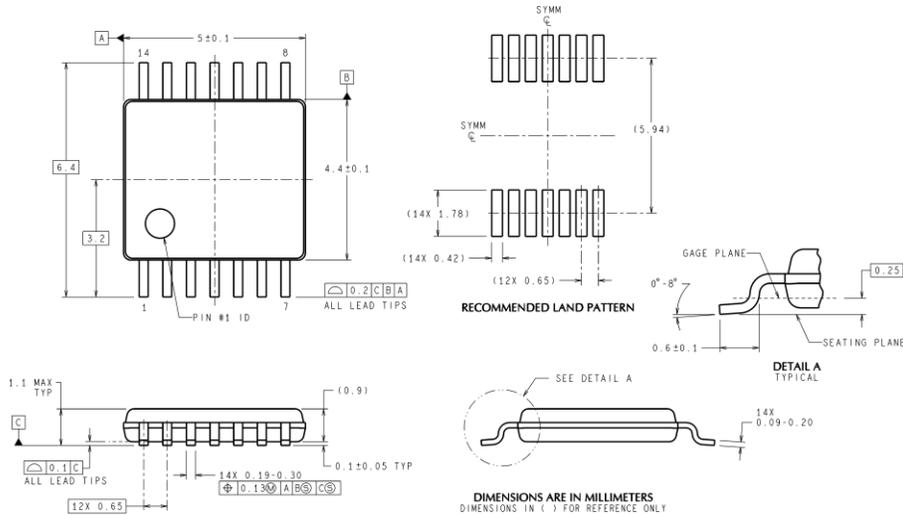


Molded Dual-In-Line Package (N)
Order Number LM324N, LM324AN or LM2902N
NS Package Number N14A



Ceramic Flatpak Package
Order Number JL124ABDA, JL124ABZA, JL124ASDA, JL124BDA, JL124BZA,
JL124SDA, LM124AW/883, LM124AWG/883, LM124W/883 or LM124WG/883
NS Package Number W14B

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



MTC14 (Rev D)

14-Pin TSSOP
Order Number LM324MT or LM324MTX
NS Package Number MTC14

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

BANNED SUBSTANCE COMPLIANCE

National Semiconductor certifies that the products and packing materials meet the provisions of the Customer Products Stewardship Specification (CSP-9-111C2) and the Banned Substances and Materials of Interest Specification (CSP-9-111S2) and contain no "Banned Substances" as defined in CSP-9-111S2.

 **National Semiconductor**
Americas Customer Support Center
 Email: new.feedback@nsc.com
 Tel: 1-800-272-9959

National Semiconductor
Europe Customer Support Center
 Fax: +49 (0) 180-530 85 86
 Email: europe.support@nsc.com
 Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208
 English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171
 Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

National Semiconductor
Asia Pacific Customer Support Center
 Email: ap.support@nsc.com

National Semiconductor
Japan Customer Support Center
 Fax: 81-3-5639-7507
 Email: jpn.feedback@nsc.com
 Tel: 81-3-5639-7560

www.national.com

