

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

“RED INALÁMBRICA DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO”

TESINA DE SEMINARIO

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Presentado por:

César Eduardo Macías Aguiar

Joffre David Marcillo Espinoza

GUAYAQUIL – ECUADOR

2012

AGRADECIMIENTO

Mi más profundo agradecimiento a mi director, Germán Vargas, ejemplo del profesional abnegado, quien con esmero entregase día a día en su noble labor de Ingeniero, maestro y amigo, por lo cual mediante su orientación hizo posible llevar a cabo y a feliz término la realización de este trabajo.

A todos mis maestros que con sus sabias enseñanzas supieron darnos año a año los conocimientos necesarios y básicos en esta difícil carrera.

César Macías Aguiar.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Germán Vargas, por su constante y excelente colaboración e en el desarrollo del presente proyecto de graduación.

A los docentes de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, quienes me han forjado como profesional.

Joffre Marcillo Espinoza.

DEDICATORIA

A mis padres, Clodomiro Macías Castro y Mariana Aguiar de Macías, quienes con cariño, esfuerzo y sacrificio me ayudaron a triunfar y alcanzar mi anhelada meta, y lograron hacer realidad lo que era un sueño.

A mis hermanos y parientes, cuyo apoyo estuvo presente en los momentos difíciles de mi carrera, especialmente a Rita Aguiar de Rivera y Christian Macías Aguiar.

César Macías Aguiar.

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme dar este primer paso en mi vida profesional.

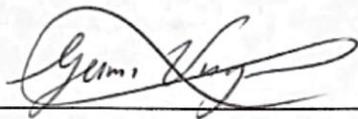
A mis padres, quienes con su apoyo constante, dedicación y confianza, son parte fundamental de mi éxito académico.

A mi esposa e hijos, quienes han estado junto a mí en todo momento de mi vida universitaria, convirtiéndose en la principal motivación para culminar mis estudios de ingeniería.

Joffre Marcillo Espinoza.

DECLARACIÓN EXPRESA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Germán Vargas', written over a horizontal line.

Ing. Germán Vargas.

Profesor del Seminario de Graduación

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos Valdivieso', written over a horizontal line.

Ing. Carlos Valdivieso.

Delegado por la Unidad Académica

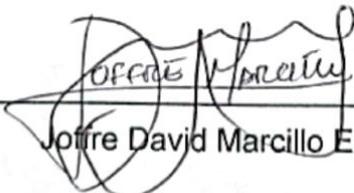
DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesina, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)



César Eduardo Macías Aguiar



Joffre David Marcillo Espinoza

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla la interfaz de un sensor de presencia de líquidos basado en fibra óptica de plástico, teniendo como objetivo principal el análisis de interconexión del sensor a una red inalámbrica que utiliza tecnología Zigbee. La idea principal de este proyecto se centra en el uso de la fibra óptica de plástico que entre sus numerosas ventajas nos permite reducir costos y es de fácil manejo por lo que la hemos escogido como elemento sensible.

La tesina empieza con un breve estudio de los parámetros más importantes de la luz y su comportamiento como energía y como onda electromagnética. También hacemos un repaso de la óptica geométrica para entender mejor la forma en que se propagan las ondas de luz a través de un medio guiado como la fibra óptica.

Se estudiará la fuente óptica que se utilizara en el transmisor así como los mecanismos que emplea para emitir luz. Se observan las características del detector, y los limitantes de su sensibilidad.

Explicaremos las características más relevantes de la tecnología Zigbee y presentaremos una descripción de los elementos que conforman una red inalámbrica basada en esta tecnología.

Definiremos un escenario para la aplicación de nuestra red inalámbrica de sensores de nivel con el fin de dar solución a un problema real. Haremos uso de un programa que desarrollamos en MATLAB para estimar el comportamiento de la luz que se transmite de fibra a fibra y así determinar los niveles del líquido en función de los parámetros de entrada.

Se describirá la implementación del sensor y la red inalámbrica haciendo énfasis en las interfaces entre los elementos que conforman nuestro sistema esto comprende: criterios de diseño, diagramas de bloques esquemas y elementos utilizados en la elaboración de los módulos que conforman el sensor y la red inalámbrica.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimiento	II
Dedicatoria.....	IV
Tribunal de Sustentación	VI
Resumen	VIII
Índice General.....	X
Índice de Figuras	XIII
Índice de Tablas.....	XVI
Introducción	XVII
CAPÍTULO 1	1
LA FÍSICA DE LAS FIBRAS ÓPTICAS	
1.1. Naturaleza dual de la Luz.....	1
1.2. La luz como onda electromagnética	3
1.3. La luz como fotón	4
1.4. La luz como parte del espectro electromagnético	4
1.5. Aspectos importantes de la óptica geométrica	6
1.6. Introducción a los sensores de nivel.....	16
1.7. Introducción a la Fibra Óptica y la propagación de señales.	28

CAPÍTULO 2.....	33
ESTANDAR IEEE 802.15.4	
2.1. Introducción a ZigBee.....	33
2.2. Características de Zigbee.....	34
2.3. Elementos de una red Zigbee.....	36
2.4. Topologías de Redes Zigbee.....	38
2.5. Arquitectura	41
2.6. Tipos de tramas.....	45
2.7. Direccionamiento.....	46
2.8. Formación de la red Zigbee.....	47
2.9. Aplicaciones de Zigbee	49
CAPÍTULO 3.....	51
DESARROLLO DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO	
3.1. Elementos de un transmisor óptico	53
3.2. Elementos de un receptor óptico	55
3.3. Diseño, esquema y dispositivos usados en el transmisor óptico ..	57
3.4. Circuito manejador del LED.....	60
3.5. Interfaz de la Fibra con el transmisor y el receptor.....	65
3.6. Análisis de imágenes con lentes convergentes.....	73
3.7. Diseño, esquema y dispositivos usados en el receptor óptico.....	76
CAPÍTULO 4.....	83
ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA RED ZIGBEE	
4.1. Escenario de aplicación.....	83
4.2. Descripción del prototipo a implementarse.....	85
4.3. Topología de la Red Zigbee y elección de los Módulos Zigbee....	87

4.4. Diseño del hardware del Coordinador	97
4.5. Diseño del hardware de los módulos terminales	106
4.6. Diseño del software del módulo coordinador y módulos terminales	111
CAPÍTULO 5.....	125
SIMULACIONES DEL PROYECTO	
5.1. Análisis y simulación del transmisor de luz.....	125
5.2. Simulación del entorno de transmisión del pulso de luz.	132
5.3. Análisis y simulaciones del receptor de luz.	135
5.4. Procesamiento de los datos en la Red Zigbee.	140
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	144
BIBLIOGRAFÍA.....	148
ANEXOS.....	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Espectro Electromagnético	5
Figura 1.2 Rayo Incidente, Reflejado Y Refractado	10
Figura 1.3 Reflexión Total Interna.....	12
Figura 1.4 Apertura Numérica.....	15
Figura 1.5 Proceso de emisión de Luz.....	22
Figura 1.6 Trayectoria de los rayos de luz a través de la fibra.....	30
Figura 1.7 Modos de propagación de la fibra.....	31
Figura 2.1 Elementos de la red Zigbee	37
Figura 2.2 Topologías de red aplicables a Zigbee	39
Figura 2.3 Topología de red tipo estrella	40
Figura 2.4 Topología de red tipo malla	41
Figura 2.5 Capas del stack Zigbee	42
Figura 2.6 Estructura de Canales	43
Figura 2.7 Aplicaciones definidas por Zigbee Alliance.....	49
Figura 3.1 Acople del LED con la fibra.....	59
Figura 3.2 Circuito manejador del LED	61
Figura 3.3 Sistema Sensor	67

Figura 3.4 Sensor de reflexión de Fibra Óptica	70
Figura 3.5 Distancia focal de una lente convergente	74
Figura 3.6 Esquema básico del receptor	79
Figura 3.7 Esquema mejorado del receptor	80
Figura 4.1 Esquema en vista lateral del entorno.....	84
Figura 4.2 Diagrama de Bloques del Sistema.....	86
Figura 4.3 Esquema generalizado de la red de sensores.....	87
Figura 4.4 Diagrama de pines de los módulos Xbee	90
Figura 4.5 Formato de comando AT	93
Figura 4.6 Formato tramas API.....	95
Figura 4.7 LED Indicador de Alimentación.....	99
Figura 4.8 Alimentación del módulo Xbee	100
Figura 4.9 Conexión entre PIC y Xbee	104
Figura 4.10 Conexión entre PIC y PC.....	105
Figura 4.11 Alimentación del microcontrolador.....	108
Figura 4.12 Conexión sensor – microcontrolador	110
Figura 4.13 Diagrama detallado de Red	114
Figura 4.14 Estructura general del Protocolo.....	115
Figura 4.15 Rutina Principal del Coordinador	119
Figura 4.16 Subrutinas del Coordinador: Inicializar microcontrolador, Leer puerto Serial y Enviar trama al módulo terminal N.....	120
Figura 4.17 Rutina principal del computador central.....	121

Figura 4.18 Rutina principal de los dispositivos terminales.....	122
Figura 4.19 Subrutinas del dispositivo terminal: Inicializar microcontrolador y Leer puerto Serial	123
Figura 4.20 Subrutinas del dispositivo terminal: Conversión A/D y Enviar trama a coordinador.....	124
Figura 5.1 Arreglo para la menor potencia emitida por el LED	126
Figura 5.2 Arreglo para la mayor potencia emitida por el LED	128
Figura 5.3 Potencia Eléctrica vs Re	129
Figura 5.4 Corriente de Diodo vs Re.....	130
Figura 5.5 Potencia Óptica de salida y Potencia Eléctrica vs Re.....	131
Figura 5.6 Trayectoria de la luz en el sistema.....	133
Figura 5.7 Corriente de salida del fotodiodo receptor vs. Distancia de separación fibra-liquido.....	134
Figura 5.8 Fotodiodo acoplado al Amplificador de transimpedancia.....	135
Figura 5.9 Voltaje a la salida del amplificador en función del resistor de retroalimentación	136
Figura 5.10 Relación entre el Voltaje a la salida del amplificador y la corriente del fotodiodo	137
Figura 5.11 Relación Voltaje vs. Distancia para un sensor de nivel basado en un diodo láser	139
Figura 5.12 Diagrama de bloques simplificado del transmisor.....	141
Figura 5.13 Diagrama de bloques simplificado del coordinador	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Índices de Refracción de medios comunes.....	8
Tabla 1.2 Materiales utilizados para elaborar LEDs.....	21
Tabla 2.1 Propiedades del estándar IEE 802.15.4.....	35
Tabla 4.1 Características de los módulos Xbee Series 1.....	89
Tabla 4.2 Descripción de los campos de la Trama coordinador-terminal ...	117
Tabla 4.3 Descripción de los campos de la Trama terminal- coordinador ..	118

INTRODUCCIÓN

Los dispositivos ópticos, donde sólo se utilizan materiales inertes, como las fibras ópticas, constituyen una tecnología intrínsecamente segura para la detección de niveles de líquidos en la industria. Estas fibras ópticas presentan ventajas como la inmunidad frente a las interferencias electromagnéticas (EMI), bajo peso, además no se oxidan y representan un medio de transmisión con bajas pérdidas y gran ancho de banda.

La detección de señales por medio de la fibra óptica y la transmisión de los datos recolectados por los sensores de fibra para este proyecto se realizarán a través de una red inalámbrica basada en ZigBee descrita en el estándar IEEE 802.15.4. ZigBee es un sistema que permite el control de diversos dispositivos mediante redes inalámbricas, pero, además, presenta una ventaja significativa frente a otras comunicaciones inalámbricas, su bajo costo. ZigBee está orientado a aplicaciones que requieran poca velocidad de transmisión y ahorro en el consumo de batería, características apropiadas que aprovecharemos para la red de sensores de nivel.

Analizaremos la implementación de la red de sensores en un escenario real específicamente para monitorear el nivel de líquidos en los tanques de almacenamiento en las industrias. Esto es necesario para la elaboración de productos o bien para almacenar el líquido como producto final donde es de suma importancia el control del nivel de los mismos. Por lo tanto consideramos oportuno plantear una solución alternativa a los sistemas convencionales de detección y control de líquidos. Para ello debemos cumplir los siguientes objetivos:

- Diseñar un sensor basado en fibra óptica de plástico que comprende: transmisor, receptor y un enlace de fibra óptica.
- Presentar el modelo de una red inalámbrica que permita transmitir los datos obtenidos por un conjunto de sensores.
- Establecer la interfaz entre los elementos que conforman el sistema red-sensor.

CAPÍTULO 1

1. LA FÍSICA DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

1.1. Naturaleza dual de la Luz

Es importante conocer los conceptos básicos de la teoría de la luz para poder comprender mejor los principios aplicados al diseño de sistemas basados en fibra óptica. En este capítulo se presenta la teoría detrás de la luz, los aspectos más relevantes de la óptica y los principios a considerar en la propagación de señales ópticas.

La luz es una forma de radiación que proviene del conjunto de ondas que pueden propagarse en el vacío como el calor radiante, las ondas de radio o los rayos X y se denominan Ondas Electromagnéticas. Por lo tanto la luz es un tipo de radiación electromagnética que viaja en línea recta y en diferentes direcciones, a medida que avanza se expande en una superficie cada vez mayor.

Al llegar hasta un objeto es absorbida, reflejada o refractada, por esta condición puede ser percibida sin ningún tipo de problema por el ojo humano. La óptica geométrica es la rama de la física que estudia el comportamiento de la luz, sus características y sus manifestaciones, entre ellas destacan las leyes de reflexión y refracción de la luz en un medio determinado que estudiaremos más adelante.

Cuando se trabaja con fibra óptica se debe tomar en cuenta varios parámetros que se pueden obtener de su interacción con el medio. La luz ilumina los objetos y los hace visibles, desde el punto de vista de la física moderna esta es representada por ondas electromagnéticas o fotones, los físicos consideran ambas representaciones de la luz complementariamente pero no las dos juntas, a lo que llaman la dualidad onda-corpúsculo, también denominada dualidad onda-partícula. Un cuanto de luz es llamado fotón, estos tienen características de partícula ya que son finitas y discretas. Sin embargo la luz presenta a su vez efectos de interferencia y difracción. Esto resulta contradictorio ya que como una partícula es finita y discreta mientras que como onda es infinita y continua.

Con el paso de los años se ha demostrado que la luz puede poseer propiedades de partícula y ondulatorias*.

1.2. La luz como onda electromagnética

Las ondas electromagnéticas presentan una combinación de efectos eléctricos y magnéticos. Una carga estática produce a su alrededor un campo eléctrico y si esta carga se mueve produce también un campo magnético. Estos campos se combinan y crean una perturbación que se propaga en el espacio. Todas las ondas electromagnéticas tienen las siguientes propiedades:

- Son producidas por cargas en movimiento
- Son ondas transversales, en las cuales el campo eléctrico y magnético son perpendiculares el uno al otro y a la dirección de propagación de la onda.
- Todas ellas viajan a la misma velocidad relativa en el espacio libre, la cual es llamada: "Velocidad de la luz".

* Gracias a los trabajos de Max Planck y Albert Einstein se ha llegado a la conclusión de que la luz tiene una naturaleza dual: es onda y partícula al mismo tiempo. Teoría dual de la luz, www.wikipedia.org. Enciclopedia libre

1.3. La luz como fotón

Los fotones son considerados cantidades discretas de energía electromagnética. Planck[†] propuso que la energía es irradiada en ráfagas llamadas "cuantos", donde la cantidad de energía es proporcional a la frecuencia y viene dada por la expresión:

$$E = h \times f \quad (1.1)$$

Donde, E es la energía y está dada en Joules, $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ es la constante de Planck y f es la frecuencia dada en hertz.

1.4. La luz como parte del espectro electromagnético

Como ya es conocido la luz no es la única onda electromagnética, de hecho, se sabe actualmente que el intervalo de frecuencias del espectro electromagnético es muy grande todas las ondas que lo componen viajan a la velocidad de la luz.

La Figura. 1.1 muestra tal espectro, en él se distingue los tipos de radiaciones más importantes:

[†]Max Karl Ernest Ludwig Planck físico alemán considerado como el fundador de la teoría cuántica y galardonado con el Premio Nobel de Física en 1918. Enciclopedia La Fuente. Segunda edición.

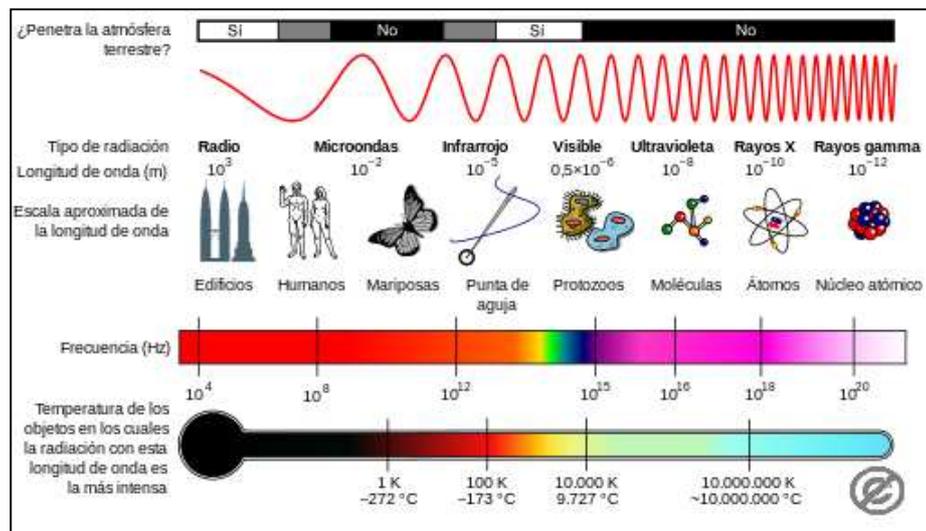


Figura 1.1 Espectro Electromagnético [1].

La luz visible esta en el rango de los 400 a los 780 nanómetros aproximadamente sin embargo algunas de las aplicaciones con fibra óptica utilizan la luz infrarroja que se sitúa en los 850 y los 1550 nanómetros.

A menudo se clasifica la luz por su longitud de onda. La longitud de una onda es el período espacial de la misma, es decir, la distancia que hay de pulso a pulso, dicho de otra manera la distancia que existe entre dos puntos de la onda que están en fase. La longitud de onda λ es inversamente proporcional a la frecuencia. Una longitud de onda más larga corresponde a una frecuencia más baja y viceversa, la relación entre ellas se muestra a continuación:

$$\lambda = c/f \quad (1.2)$$

Donde, λ es la longitud de onda, c es la velocidad de la luz en el vacío y f es la frecuencia.

La luz es considerada una onda transversal, es decir que su desplazamiento es similar a las ondas en el agua.

Dentro de un medio óptico guiado conviene tratar la luz como onda en algunos casos y como partícula en otros. Cuando se transmite luz a través de una fibra óptica se producen algunos fenómenos que pueden analizarse mejor si la tratamos como una onda ya que la mayoría de estos se producen en base a la longitud de onda. Así mismo al momento de detectar la luz o analizar la que proviene de un emisor es más fácil si la tratamos como partícula.

1.5. Aspectos importantes de la óptica geométrica

La luz se propaga como una línea recta y en todas las direcciones a una velocidad aproximada de $3 \cdot 10^8$ m/s[‡]. La naturaleza ondulatoria de la luz puede ser despreciada para esta apreciación debido a que la luz

[‡] La velocidad de la luz en el vacío es por definición una constante universal de valor 299.792.458 m/s pero por facilidad suele aproximarse a $3 \cdot 10^8$ m/s. Wikipedia – La enciclopedia libre

es como una fuente lineal de partículas que pueden colisionar y, dependiendo del medio, se puede conocer cual es su camino a seguir.

La línea recta que representa la dirección y el sentido de propagación de la luz se llama rayo de luz. Para demostrar lo mencionado podemos considerar lo que sucede cuando un objeto se interpone entre la luz y una superficie, observamos que se crea una silueta oscura bien definida del objeto en la superficie, que llamamos sombra.

1.5.1. Índice de refracción

El índice de refracción es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio diferente del vacío. Representa la característica de un medio en particular, por lo tanto nos permite determinar la velocidad con la que se propagaría la luz en dicho medio y viene determinado por la siguiente ecuación:

$$n = c/v \quad (1.3)$$

Donde, n es el índice de refracción del medio, c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el medio.

El índice de refracción es una medida adimensional, cuando es medido con respecto a la rapidez de la luz en el vacío se denomina índice de refracción absoluto y dado que la velocidad de la luz en cualquier medio es menor que la del vacío los índices de refracción son todos mayores a 1.

Es necesario recalcar que este varía con la longitud de onda, la frecuencia e inclusive con la temperatura. El índice de refracción de un medio no es necesariamente el mismo en todas las direcciones, esta condición solo se cumple en materiales no cristalinos como el agua o las lentes donde el índice no depende de la dirección. Particularmente se utiliza la velocidad de la luz en el aire en lugar del vacío, esto introduce un error despreciable de 0.03%, por lo que la mayoría de los valores tabulados y las medidas habituales también se suelen realizar con respecto al aire, aquí los índices de refracción de algunos medios.

Medio	Índices de Refracción
Vacío	1.0
Aire	1.0003 (»1.0)
Agua	1.33
Alcohol etílico	1.36
Fibra de vidrio	1.5-1.9
Silicio	3.4
Galio-arseniuro	3.6

Tabla 1.1 Índices de Refracción de medios comunes

Cuando la luz incide en un medio diferente del vacío, el campo eléctrico de la onda electromagnética polariza las moléculas del medio a la frecuencia de la onda. Producto de esta interacción su propagación se vuelve lenta, mientras más grande sea la interacción entre las moléculas y el medio más lentamente se propagará la onda de luz. El índice de algunos materiales puede ser muy diferente para bajas y altas frecuencias porque otros mecanismos de polarización operan a estas frecuencias.

1.5.2. Ley de Snell

Consideremos un rayo de luz viajando en línea recta a través de un medio cualquiera con índice de refracción n_1 cuando este alcanza el límite de la frontera de otro medio con índice de refracción n_2 diferente a n_1 a un ángulo θ_1 , un rayo reflejado en el medio 1 y un rayo transmitido en el medio 2 aparecen. El rayo transmitido toma el nombre de rayo refractado debido al cambio que experimenta en la dirección de propagación a través del medio 2. Los ángulos θ_1 y θ_2 definen las direcciones de los rayos incidente y refractado respectivamente con respecto a la normal a la frontera.

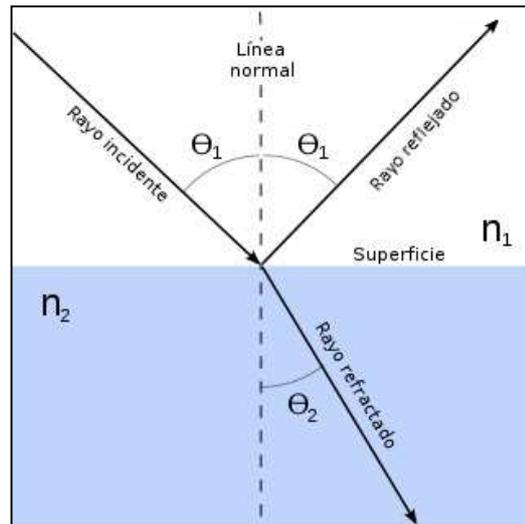


Figura 1.2 Rayo Incidente, Reflejado Y Refractado [2].

De consideraciones geométricas se puede demostrar que el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado, sin embargo los ángulos incidente y refractado no son iguales y su valor puede ser determinado por medio de la Ley de Snell.

$$n_1 \cdot \text{Sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{Sen}(\theta_2) \quad (1.4)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del primer y segundo medio respectivamente, mientras θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia y refractado respectivamente.

La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia y refractado con los índices de refracción del medio. Una acotación importante es que sin importar que valor tomen los índices del medio cuando

un rayo incide de forma normal a la línea de frontera entre dos medios, el rayo refractado es también normal, en otras palabras cuando $\theta_1=0$, $\theta_2=0$.

La simetría de la ley de Snell nos demuestra que las trayectorias de los rayos de luz son reversibles, es decir, si un rayo incide sobre la superficie de separación entre dos medios con un ángulo θ_1 y se refracta con un ángulo θ_2 , entonces un rayo incidente en la dirección opuesta desde el medio 2 con un ángulo de incidencia θ_2 se refractaría sobre el medio 1 con un ángulo de refracción θ_1 .

1.5.3. Angulo Crítico y Reflexión total interna

Bajo ciertas características cuando la luz viaja de un medio a otro parte de ella se refleja y otra parte se refracta. Consideremos el caso de que la luz está viajando de un medio muy denso hacia otro de menor densidad, es decir $n_1 > n_2$, cuando esto sucede el ángulo de refracción es mayor que el ángulo incidente, ahora, si empezamos a incrementar el ángulo de incidencia, el ángulo de refracción también incrementará su valor de acuerdo a la Ley de Snell, llegará un momento en que el rayo refractado será paralelo a la línea de frontera entre ambos medios como se aprecia en la

Figura.1.3., dicho de otra manera el ángulo de refracción será de 90° :

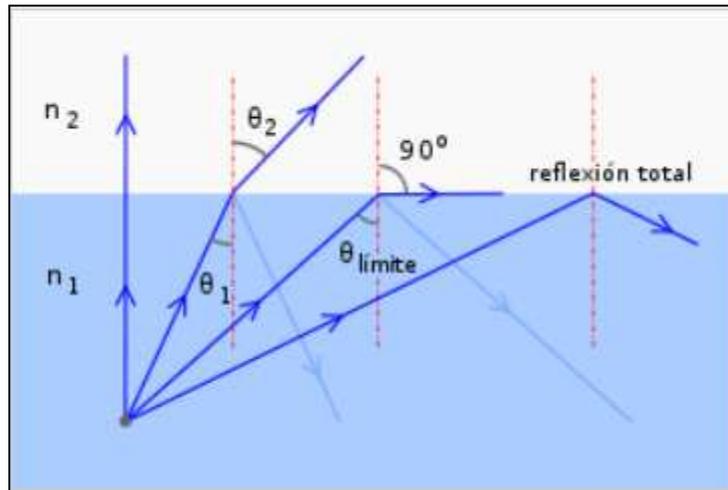


Figura 1.3 Reflexión Total Interna [3].

Cuando esto sucede el ángulo incidente toma el nombre de ángulo crítico θ_c y está dado por:

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}(n_2/n_1) \quad (1.5)$$

Cuando el rayo de luz incide en la frontera de dos medios de modo que el ángulo incidente excede al ángulo crítico ($\theta_i > \theta_c$), el rayo refractado desaparece en el segundo medio y toda la luz es reflejada en el primer medio. A este fenómeno se lo conoce como

Reflexión Total Interna y solo es posible cuando la luz viaja de una sustancia ópticamente más densa a otra ópticamente menos densa. Este principio hace posible que la luz viaje largas distancias al reflejarse sucesivamente dentro de un conductor de plástico o vidrio como las fibras ópticas.

1.5.4. Coeficientes de Fresnel

Aunque la ley de Snell nos permite predecir cuál es el camino que seguirá la luz en cualquier medio del cual se conoce su característica esta no nos muestra la cantidad de luz que se transmite ni la cantidad que se refracta. A menudo es importante determinar la magnitud y fase de las ondas de luz reflejada y transmitida de un medio a otro en función de los parámetros (magnitud, ángulo de incidencia e índices de refracción) de la onda incidente.

Una parte muy importante de este proyecto se basa en el análisis de estos aspectos que pueden ser bien explicados por medio de los coeficientes de Fresnel:

$$r_{\perp} = \frac{\cos\theta_i - [n^2 - \sin^2\theta_i]^{1/2}}{\cos\theta_i + [n^2 - \sin^2\theta_i]^{1/2}} \quad (1.6)$$

$$t_{\parallel} = \frac{2n \cdot \cos\theta_i}{n^2 \cos\theta_i + [n^2 - \sin^2\theta_i]^{1/2}} \quad (1.7)$$

$$r_{\parallel} = \mathbf{1} - n \cdot t_{\parallel} \quad (1.8)$$

$$t_{\perp} = \mathbf{1} + r_{\perp} \quad (1.9)$$

Donde $n=n_2/n_1$ es el índice de refracción relativo y r_{\parallel} , r_{\perp} , t_{\parallel} y t_{\perp} representan los coeficientes de reflexión y transmisión paralelos y tangenciales respectivamente.

Estos coeficientes nos permiten determinar la magnitud de la potencia que se transmite y la que se refleja cuando una onda incide en la frontera de dos medios dieléctricos y fueron determinados por Fresnel[§] tras analizar las reglas que rigen a los campos eléctricos y magnéticos también llamadas condiciones de frontera.

[§]Augustin Jean Fresnel Físico Francés que fue uno de los principales proponentes de la teoría ondulatoria de la luz, hizo numerosas contribuciones a la óptica incluyendo las bien conocidas lentes de Fresnel que fueron usadas en el siglo 19 en faros, convirtió sus ideas de onda de la luz en un teorema matemático[4].

1.5.5. Ángulo de aceptación y Apertura numérica

No todos los tipos de radiaciones pueden ser guiados a través de una fibra óptica, de hecho solo los rayos dentro de un cierto cono de aceptación a la entrada de la fibra pueden propagarse a través de ella. La figura 1.4 muestra un rayo de luz que se propaga en el medio n_0 e incide en el núcleo de la fibra con un ángulo α .

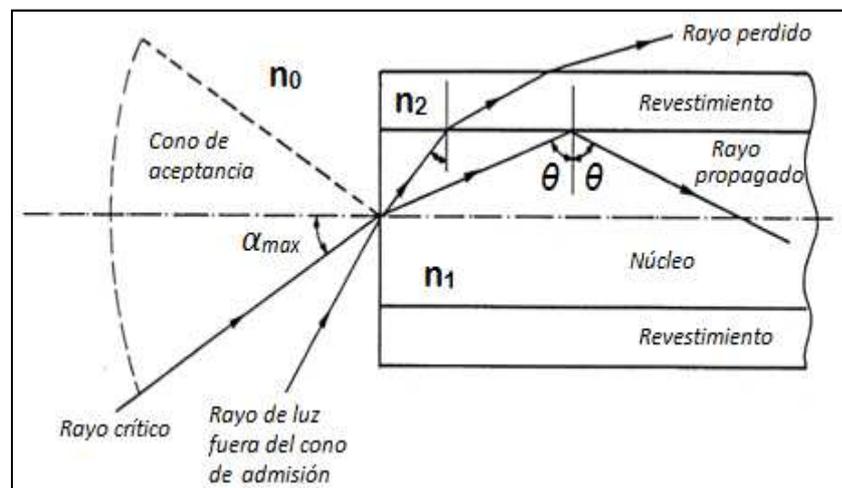


Figura 1.4 Apertura Numérica.

Una vez dentro de la fibra el rayo impacta en la superficie limitada por el revestimiento y el núcleo de la fibra con un ángulo θ , entonces a menos que θ sea mayor que el ángulo crítico θ_c para que exista reflexión total interna (TIR), el rayo escapará a través del revestimiento. Por lo tanto el ángulo α debe ser tal que dentro

de la fibra exista TIR, de este modo el máximo valor que toma el ángulo α es aquel en el cual $\theta=\theta_c$, se denomina Máximo ángulo de aceptación y viene dado por la expresión:

$$\alpha_{max} = \text{Sen}^{-1} \left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \right) \quad (1.10)$$

El seno del ángulo máximo representa la medida en la cual una fibra óptica puede aceptar y propagar rayos a través de ella bajo el principio de reflexión total interna, se denomina Apertura numérica y es un parámetro característico de una fibra óptica.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.11)$$

1.6. Introducción a los sensores de nivel

Un sensor es un dispositivo que detecta magnitudes físicas o químicas, y las transforma en variables eléctricas. A estas variables se las denomina variables de instrumentación y pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. Lo que lo diferencia de un transductor es que este siempre está en contacto con la variable que se va a medir pero actúa como tal ya que es un

dispositivo que convierte una forma de energía en otra (por lo general eléctrica).

La gran mayoría de dispositivos que basan su tecnología en fibra óptica contienen tres elementos fundamentales y el sensor de nivel no es la excepción. Estos elementos son: Transmisor, receptor y enlace de fibra óptica. Podría pensarse que en este sentido no se diferencia de un sistema de comunicaciones ni de otros sistemas que usan fibra óptica, sin embargo la diferencia la marcan otros elementos y la manipulación de cada uno de ellos conforme a la aplicación que se desee llevar a cabo, en este caso el uso de la fibra como elemento sensible es la característica principal.

Para entender mejor como se conectan las etapas que conforman el sensor con la fibra óptica, debemos saber cómo funcionan los transductores presentes en el transmisor (foto emisor) y en el receptor (foto detector), de modo que su análisis empieza a continuación.

1.6.1. Transmisor óptico

El rol principal de un transmisor óptico es convertir las señales eléctricas de entrada en su correspondiente señal óptica y enviarla a través de la fibra sirviendo de este modo como canal de

comunicación entre la entrada y la fibra óptica. El componente más importante de los transmisores ópticos es la fuente óptica.

Las principales fuentes de luz usadas en sistemas que trabajan con fibra óptica son los Diodos Emisores de Luz (LED) y los Diodos de Amplificación de Luz por Radiación Estimulada (LASER). Juntos representan alrededor del 95% de las aplicaciones ópticas. Estos dispositivos son adecuados para el diseño de sensores por las inherentes ventajas que ofrecen.

Algunas de estas ventajas son: tamaño compacto, alta eficacia, fiabilidad, trabajan en diferentes rangos de longitudes de onda, el área de emisión es pequeña y por lo general compatible con las dimensiones del núcleo de la fibra, posibilidad de modulación directa a frecuencias relativamente altas con pequeñas variaciones de la entrada, la potencia del haz de luz producido por ellos es buena lo que les permite superar inconvenientes como la atenuación en un sin número de aplicaciones.

Al momento de escoger una fuente óptica que se acople a la fibra varias características de la misma deben tomarse en cuenta, como por ejemplo su geometría, atenuación, distorsión, etc.

La salida de un láser puede ser acoplada a fibras mono modo y multimodo, los LEDs generalmente son usados con fibras multimodo ya que la potencia óptica no coherente que proviene de los mismos debe ser acoplada en mayores proporciones para ser eficiente.

1.6.2. Diodo emisor de luz (LED)

Es un dispositivo que consiste en una unión PN de semiconductores de estado sólido que emiten luz monocromática no coherente, es decir, que tiene una sola longitud de onda y viaja en diferentes direcciones, cuando se lo polariza en forma directa y pasa a través de él una corriente eléctrica.

Para sistemas ópticos que requieren tasas de aproximadamente 100 a 200 Mbps con fibras ópticas multimodo y potencia a nivel de micro watts, los LEDs son usualmente la mejor fuente de luz.

Entre las ventajas que nos proporciona el uso de los LEDs tenemos las siguientes:

- Responden ante altas velocidades de modulación.
- Son muy resistentes.

- Tienen bajo costo.
- Su tiempo de vida medio satisface casi todo tipo de aplicaciones ópticas.
- Consumen poca potencia.
- Los circuitos manejadores de LEDs son fáciles de diseñar y muy eficientes.

Los LEDs, sólo emiten un color en un estrecho rango de frecuencias. El color emitido por un LED se identifica por su longitud de onda pico (LPK), que se mide en nanómetros. La longitud de onda máxima es una función del material que se utiliza en la fabricación de los semiconductores.

La mayoría de los LED se fabrican con cristales basados en galio que difieren en uno o más materiales adicionales, tales como el fósforo para producir distintos colores. La tecnología usada en la elaboración de LEDs hoy en día permite a los fabricantes producir LEDs que emiten luz en una región específica del espectro visible y reproducir diferentes niveles de intensidad. Por lo tanto, se podría variar el material utilizado en la producción de LEDs con el fin de obtener los resultados deseados.

La Tabla 1.2 describe algunos de los materiales más comunes para la fabricación de LEDs y sus correspondientes longitudes de onda.

Material	Longitud de onda	Color
AsGa	904 nm	Infrarrojo
InGaAsP	1300 nm	Infrarrojo
AsGaAl	750-850 nm	Rojo
AsGaP	590 nm	Amarillo
InGaAlP	560 nm	Verde
CSi	480 nm	Azul

Tabla 1.2 Materiales utilizados para elaborar LEDs[4].

Cuando se polariza un LED se genera corriente eléctrica que fluye a través de él, los electrones pasan por las capas del material semiconductor y son absorbidos en la capa de empobrecimiento del mismo. Cuando esto sucede los átomos que acaban de recibir un electrón quedan en estado inestable producto de ello uno de los electrones orbitando en el átomo se mueve a una capa de mayor valencia. Ahora tanto el átomo como el electrón en la capa

de mayor valencia se encuentran en estado excitado, estos átomos deben volver a su estado normal para ello el electrón desciende a una capa inferior liberando así energía en forma de luz (ver Figura.1.5).

La energía en el fotón emitido es casi igual a la que uso el electrón para pasar del estado normal al estado excitado esto se cumple por la ley de la conservación de la energía.

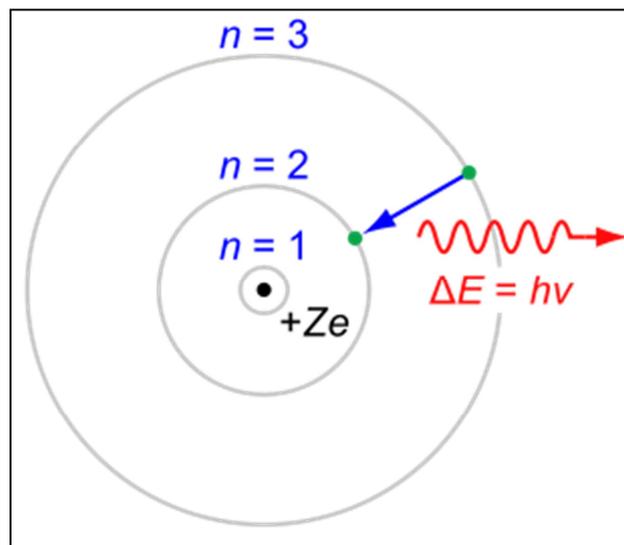


Figura 1.5 Proceso de emisión de Luz [5].

La emisión de luz puede ocurrir a través de dos procesos fundamentales conocidos como emisión espontánea y emisión estimulada. En el caso de la emisión espontánea, los fotones se

emiten en direcciones al azar, sin relación de fase entre ellos. La emisión estimulada, por el contrario, se inicia con un fotón existente. La característica más notable de la emisión estimulada es que el fotón emitido coincide con el fotón original no sólo en la energía, sino también en sus otras características, tales como la dirección de propagación y la frecuencia.

Todos los láseres, incluyendo el láser semiconductor, emiten luz a través del proceso de emisión estimulada y se dice que emiten luz coherente. En contraste, los LED emiten luz a través del proceso de emisión espontánea incoherente.

1.6.3. Características importantes de las fuentes de luz.

Para entender mejor el comportamiento de los emisores de luz debemos destacar ciertas características:

Potencia.- La potencia de la fuente óptica para todo sistema debe ser capaz de cubrir la longitud total de la fibra y suficiente para transmitir tanta luz como requiera el receptor, la potencia en un LED oscila alrededor de los 3mW.

Longitud de onda pico.- Es la longitud de onda en la cual el LED presenta la mayor potencia. Al acoplar un LED a la fibra óptica es aconsejable hacer coincidir esta longitud de onda con la de menor pérdida en la fibra para transmitir eficientemente. Las longitudes de onda más usadas en LEDs son: 660 nm(rojo), 530 nm(verde).

Ancho espectral.- Representa el ancho de banda para el cual la potencia cae al 50% de su valor máximo, para un LED típicamente se encuentra entre los 20 y 60 nm de la longitud de onda pico.

Patrón de emisión.- Este parámetro afecta directamente a la cantidad de luz que ingresa en la fibra y debe ser similar al diámetro del núcleo de la fibra para lograr mayor eficiencia.

Velocidad de respuesta.- Se refiere a los tiempos de subida y bajada de los emisores de luz, estos deben ser lo suficientemente rápidos para cubrir los requerimientos de ancho de banda de un sistema, en los LEDs se ha logrado alcanzar velocidades de hasta 100 MHz,

Linealidad.- Es la característica que relaciona la corriente que pasa a través del LED con la potencia óptica de salida del mismo.

Tiempo de vida.- Representa el tiempo en el cual el elemento trabaja eficientemente. Estos dispositivos son altamente

confiables, su tiempo de vida es muy alto especialmente en los LEDs se estima que trabajen por varios miles de horas.

1.6.4. Receptores Ópticos

Existen muchos elementos que trabajan como receptores ópticos, sin embargo para un sistema que utiliza fibra óptica es indispensable trabajar con elementos que sean rápidos, fáciles de interconectar con circuitos electrónicos, entre otras características.

Por lo tanto los fotodiodos son los dispositivos que hemos escogido para detectar la luz al final de la fibra. El fotodiodo es un diodo semiconductor, construido con una unión PN, como muchos otros diodos que se utilizan en diversas aplicaciones, pero en este caso el semiconductor está expuesto a la luz a través de una cobertura cristalina y a veces en forma de lente, y por su diseño y construcción será especialmente sensible a la incidencia de la luz visible e infrarroja. Todos los semiconductores tienen esta sensibilidad a la luz, pero los fotodiodos son diseñados para poder explotar esta característica de modo que su sensibilidad sea máxima.

A diferencia de las fotorresistencias, el fotodiodo responde a los cambios de oscuridad a iluminación y viceversa con mucha más velocidad, y puede utilizarse en circuitos con tiempo de respuesta más pequeño. Consiste en un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja.

Para que su funcionamiento sea correcto se lo polariza inversamente, con lo que se producirá una circulación de corriente cuando sea excitado por la luz. Cuando el fotodiodo no está en presencia de la luz una corriente eléctrica relativamente pequeña que fluye a través de él. Esta recibe el nombre de corriente de oscuridad.

La corriente de oscuridad se debe a la generación aleatoria de electrones y huecos, que son arrastrados por el campo eléctrico. Su intensidad aumenta con la temperatura en la mayoría de los casos. Cuanto menor sea la corriente de oscuridad, mayor será la sensibilidad del detector.

Para escoger adecuadamente el fotodetector se debe tener presente lo siguiente:

- Que sea compatible en tamaño con la fibra óptica para que se acople eficientemente con la misma.

- Que trabaje en la misma longitud de onda en la cual trabaja el emisor.
- Que tenga un tiempo de respuesta (ancho de banda) adecuado para la aplicación en la que será utilizado.
- Que no contribuya con demasiado ruido al sistema.
- Que su respuesta no varíe de forma significativa ante los cambios ambientales.

Los fotones absorbidos por el material fotosensible desplazan los electrones de los átomos del semiconductor. Estos electrones libres producen un flujo de corriente eléctrica como si un voltaje de polarización fuera aplicado.

Los fotodetectores tienen ventajas y desventajas que varían según la aplicación, a continuación algunos de sus parámetros más representativos:

Responsividad.- Es una medida de la eficiencia de un fotodetector que relaciona la corriente de salida del fotodiodo con su potencia. Para los fotodetectores más eficientes esta oscila alrededor del 83%. Para un fotodiodo PIN es cercana a $0.6 \mu\text{W}/\mu\text{A}$.

Corriente Oscura.- Es la corriente que fluye por el foto detector aun cuando haya ausencia de luz. Es un dato característico de cada foto detector y lo proporciona el fabricante, cambia directamente con los incrementos de temperatura por lo general para los fotodiodos PIN este valor se duplica cuando la temperatura se incrementa en 15°.

Ancho de Banda.- Este parámetro es importante para aplicaciones como sistemas de transmisión, también es un dato que lo provee el fabricante sin embargo el ancho de banda total de un sistema viene dado por la suma de los anchos de banda de todos los sistemas que conectados en cascada lo conforman, para los foto detectores viene dado por los tiempos de subida y bajada de los niveles de voltaje o corriente y es de 1ns para los fotodiodos PIN.

1.7. Introducción a la Fibra Óptica y la propagación de señales.

La fibra óptica conforma el elemento fundamental de nuestro sistema ya que por medio de esta vamos a poder censar el nivel de los líquidos que representa la idea principal de este proyecto. En otras palabras la

fibra óptica es el transductor de este sistema, a través de la fibra viajarán los rayos de luz y su comportamiento en este medio guiado dependerá del material con el que se fabricó la misma y de otras características que afectan a las ondas electromagnéticas en las guías de onda que veremos a continuación.

1.7.1. Transmisión de la luz a través de la fibra.

Existe una gran variedad de cables de fibra óptica, la mayoría de ellos consta al menos de dos capas de materiales transparentes y una que protege a las dos anteriores.

La capa más interna tiene mayor espesor y es por donde viaja la luz, la capa siguiente es llamada recubrimiento y tiene un índice de refracción más bajo que el núcleo para que la reflexión total interna sea posible.

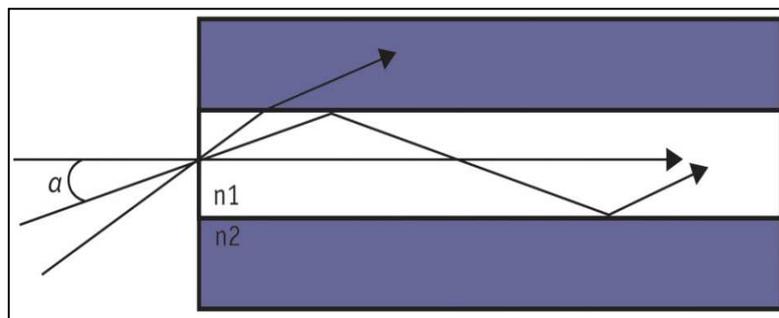


Figura 1.6 Trayectoria de los rayos de luz a través de la fibra.

Los rayos dentro de la fibra viajan en línea recta, rebotando de una frontera a otra tantas veces como sea posible para llegar al otro extremo de la fibra. Para mejorar la transmisión de los rayos en la fibra, se fabrica el recubrimiento de un material opaco para poder disipar los rayos que escapan del núcleo ya que si estos viajaran por el recubrimiento la potencia de salida de la luz se vería seriamente afectada.

En la fibra viajan dos tipos de rayos, aquellos que pasan por el eje central de la fibra se denominan “Rayos meridionales” y los que no se denominan “Rayos sesgados”. Al entrar en la fibra lo hacen con diferentes ángulos y en un pequeño rango de longitudes de onda que viene dado por el ancho espectral.

1.7.2. Tipos o modos de la fibra

Dentro de la fibra, se producen infinitas reflexiones, que producen la superposición de infinitas ondas. A lo largo de la fibra sólo se pueden propagar los pulsos por reflexiones totales sucesivas, aquellas ondas cuyo ángulo de incidencia en las reflexiones sea mayor que el ángulo crítico y cuyos diferentes frentes de onda estén desfasados en un número entero de vueltas viajan a través de la fibra sin interferir entre ellas. Por lo tanto sólo un número discreto de ondas podrán propagarse indefinidamente a lo largo de la fibra sin desaparecer, a este número selecto de trayectorias se les denomina modos de propagación.

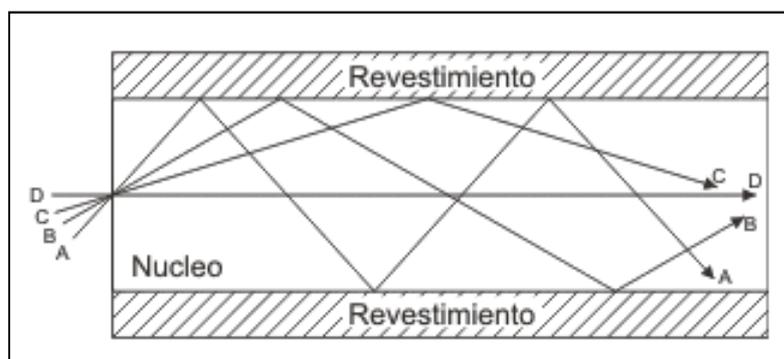


Figura 1.7. Modos de propagación de la fibra [6].

Los rayos de orden más bajo viajan casi paralelos al eje de la fibra es decir están más confinados en ella y a medida que el orden aumenta también aumentan las reflexiones de los rayos dentro de la fibra como se observa en la Figura 1.7, las fibras ópticas pueden manejar desde un modo hasta alrededor de 100000 modos.

1.7.3. Pérdidas en la fibra

Las fibras ópticas permiten enviar gran cantidad de datos a una gran distancia, con velocidades superiores a las de radio o cable, son el medio de transmisión por excelencia al ser inmune a las interferencias electromagnéticas sin embargo no toda la luz se transmite, los parámetros más importantes que se deben controlar los sistemas que emplean fibras ópticas son: Atenuación, Ancho de Banda y Dispersión.

CAPÍTULO 2

2. ESTANDAR IEEE 802.15.4

2.1. Introducción a ZigBee

ZigBee es un protocolo de comunicaciones inalámbricas basado en el estándar IEEE 802.15.4^{**}, y que se presenta como una alternativa frente a otros protocolos ya existentes.

Las características del protocolo que caben destacar son su flexibilidad, su bajo coste y bajo consumo de energía, que a su vez son las características que conforman la idea básica de la que nació ZigBee: dispositivos fáciles de manejar que permiten formar redes inalámbricas de bajo coste, y que, gracias al bajo consumo, permiten una amplia variedad de aplicaciones.

^{**} ZigBee está basado originalmente en el diseño de la alianza HomeRF, quienes intentaron desarrollar un protocolo para intercambio de datos entre dispositivos de una vivienda. Ya para el año 2000 el grupo Zigbee Alliance en conjunto con la IEEE estandarizó la idea de Zigbee, definiéndolo bajo el protocolo IEEE 802.15.4 el cual fue aprobado en mayo del 2003. Wikipedia – La enciclopedia libre.

En general, se puede decir que una de las principales ventajas que presenta el protocolo ZigBee frente a otros, es que reduce el tiempo en el que la comunicación vía radio está activa, y, por tanto, reduce considerablemente el consumo de energía. En el caso de un nodo final, únicamente debe permanecer activo en el instante en el que se produce el envío o recepción de datos o balizas. Desde este punto de vista, se hablará de un consumo asimétrico, ya que algunos dispositivos, como en el caso de los nodos finales, tendrán un consumo muy reducido, mientras que otros, como los coordinadores de la red, deben permanecer siempre activos y, por tanto, consumirán notablemente más que los anteriores.

2.2. Características de Zigbee

El estándar especifica que ZigBee puede trabajar en tres bandas ISM: 868 MHz, 915 MHz, y la banda sin licencia 2,4 GHz. La mayoría de los fabricantes optarán por la última, ya que puede ser usada en todo el mundo, mientras que las dos primeras sólo se pueden usar en Europa y EEUU, respectivamente.

En la tabla 2.1 podemos observar las tasas de transferencia correspondientes a cada banda de frecuencia. El hecho de que están

tasas sean menores en comparación con las de otros protocolos de comunicación inalámbrica simplifica el procesamiento de la señal, y, en consecuencia, reduce el coste de los módulos.

Otra de las características que se destacan de este protocolo es su flexibilidad. Una red ZigBee puede soportar hasta 64000 nodos dependientes de un único coordinador, pero, a la vez, se pueden combinar varios coordinadores de forma que pueden llegar a formarse redes muy extensas.

CARACTERÍSTICA	RANGO
Banda de Frecuencias	868 MHz 915 MHz 2.4 GHz
Alcance	10 - 20 metros
Latencia	< 15ms
Número de canales	868 MHz: 11 canales 915 MHz: 11 canales 2.4 GHz: 16 canales
Tasa de transmisión de datos	868 MHz: 20 Kbps 915 MHz: 40 Kbps 2.4 GHz: 250 Kbps
Direccionamiento	Corto de 8 bits ó IEEE 64 bits
Acceso al medio	CSMA-CA CAMA-CA ranurado
Cantidad máxima de nodos	hasta 65535 distribuidos en subredes de 255 nodos
Temperatura de trabajo	-40° C hasta 85° C

Tabla 2.1 Propiedades del estándar IEEE 802.15.4.

2.3. Elementos de una red Zigbee

Los elementos de una red Zigbee según su papel básicamente la conforman tres tipos de dispositivos. Un único coordinador, dispositivos routers y dispositivos finales.

ZigBee Coordinator o ZC: es único en cada red. Es el encargado de establecer la red y de coordinar a los demás nodos. Una vez formada la red, el coordinador hace las funciones de Router, esto es, participar en el enrutado de paquetes y ser origen y/o destinatario de información. Toda la información que circula en la red va a parar a este dispositivo, que suele estar conectado a un ordenador que recibe y procesa los datos. Este es el único elemento de la red que nunca puede dormirse, ya que podría provocar la pérdida de datos, por lo que siempre se alimentan directamente a la red eléctrica.

ZigBee Router o ZR: es un dispositivo de función completa. Actúa como router en la red para reviar la información y hacer que llegue al coordinador y a los nodos finales. En redes muy simples y de pequeña cobertura, se puede prescindir de ellos.

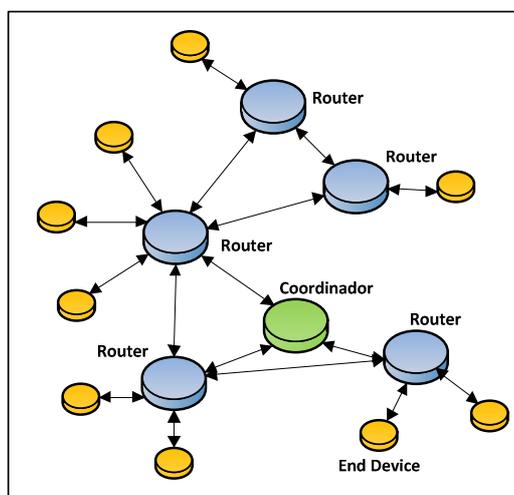


Figura 2.1. Elementos de la red ZigBee

ZigBee End Device o **ZED**: es el nodo final de la red, no tiene capacidad de enrutamiento. Deben interactuar siempre a través de su nodo padre, ya sea este un Coordinador o un Router, es decir, no puede enviar información directamente a otro end device. El consumo es menor al no tener que realizar funciones de enrutamiento.

Basándose en la funcionalidad de cada elemento de la red, se puede establecer una segunda clasificación.

Full Function Device (FFD): Conocido como nodo activo, es capaz de recibir mensajes en formato 802.15.4. Por su memoria adicional y su capacidad de procesamiento, puede funcionar como coordinador ZigBee o como router ZigBee, ó puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interfaz con el usuario.

Reduced Function Device (RFD): Conocido como nodo pasivo. Tiene capacidad y funcionalidad limitadas con el objetivo de reducir el consumo de energía y obtener una gran simplicidad. En este grupo encajan los sensores y actuadores de la red ZigBee.

Cada módulo Zigbee, al igual que ocurre con las direcciones MAC de los dispositivos Ethernet, tiene una dirección única. En el caso de los módulos Zigbee cada uno de ellos tiene una dirección única de 64bits que viene grabada de fábrica. Por otro lado, la red Zigbee, utiliza para sus algoritmos de ruteo direcciones de 16 bits. Cada vez que un dispositivo se asocia a una red Zigbee, el Coordinador al cual se asocia le asigna una dirección única en toda la red de 16bits.

Por eso el número máximo teórico de elementos que puede haber en una red Zigbee es de $2^{16} = 65535$, que es el número máximo de direcciones de red que se pueden asignar.

2.4. Topologías de Redes Zigbee

El estándar IEEE 802.15.4 soporta dos tipos de topologías para su conexión en red, estrella y punto a punto (malla). La elección de la topología depende de la aplicación que se quiere implementar.

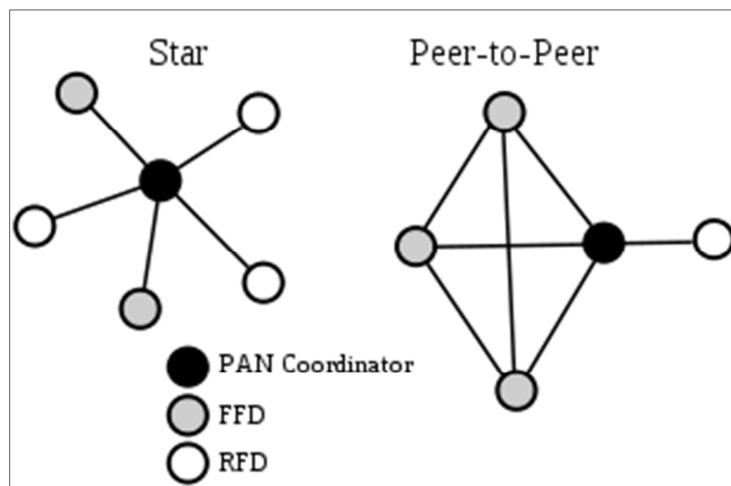


Figura 2.2. Topologías de red aplicables a Zigbee [7].

Para la topología tipo estrella, todos los nodos de la misma red están enlazados al coordinador de red de manera directa, en este arreglo de nodos el ruteador suele omitirse sin afectar a la red. El coordinador se encarga de controlar el acceso al medio, esto lo hace mediante CSMA-CA.

Toda la información que se transmite por los diversos nodos va a parar al nodo central. En ocasiones se pueden encontrar tipologías más amplias (Extended Star) en las que se incluyen unos nodos repetidores que amplían el alcance de la red. La principal ventaja de esta topología es que si uno de los nodos cae, la red no se ve afectada. La tasa de transmisión de datos para esta topología es baja.

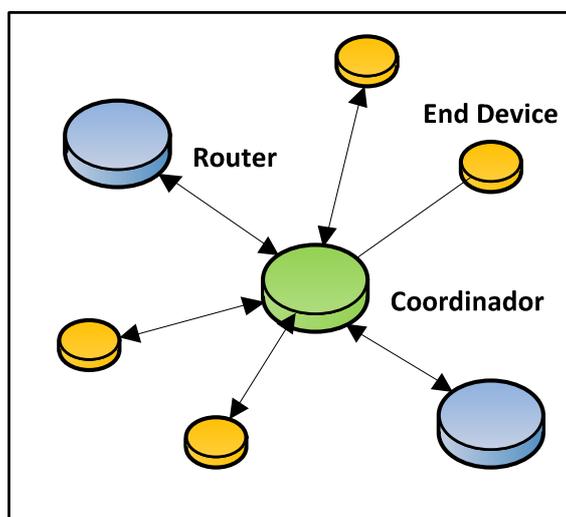


Figura 2.3. Topología de red tipo estrella.

En la topología tipo malla (peer to peer), todos los nodos son FDD (full function device) ya que cada nodo dispone de la misma prioridad para acceder al medio. En este tipo de arreglo existe un coordinador pero su papel es relevante. Difiere de la topología estrella en el sentido de que cualquier nodo puede comunicarse con otro de la misma red sin necesidad de consultar al coordinador. Todos los nodos tienen una conexión entre ellos mediante la combinación de más de una topología.

Esto permite que, en el caso de la caída de uno de los nodos, se busque un camino alternativo para la transmisión de los datos al nodo destino. En contra tenemos el hecho de que cuantos más nodos incluye la red, más complejas son las comunicaciones.

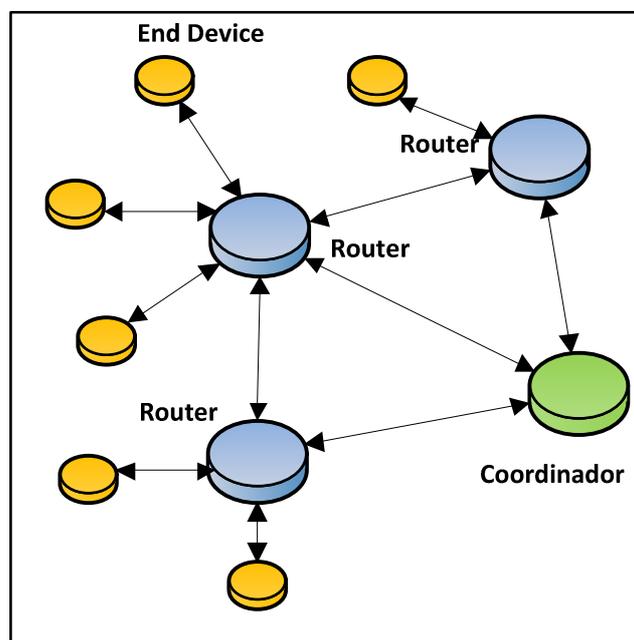


Figura 2.4. Topología de red tipo malla.

2.5. Arquitectura

ZigBee es una pila de protocolos, que de manera similar al modelo OSI está constituido por diferentes capas, las cuales son independientes una de la otra. En la Figura 2.5 se muestran las diferentes capas que conforman la pila de protocolos para ZigBee.

La capa de más bajo nivel es la capa física (PHY), que en conjunto con la capa de acceso al medio (MAC), brindan los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas están descritas en el estándar IEEE 802.15.4.

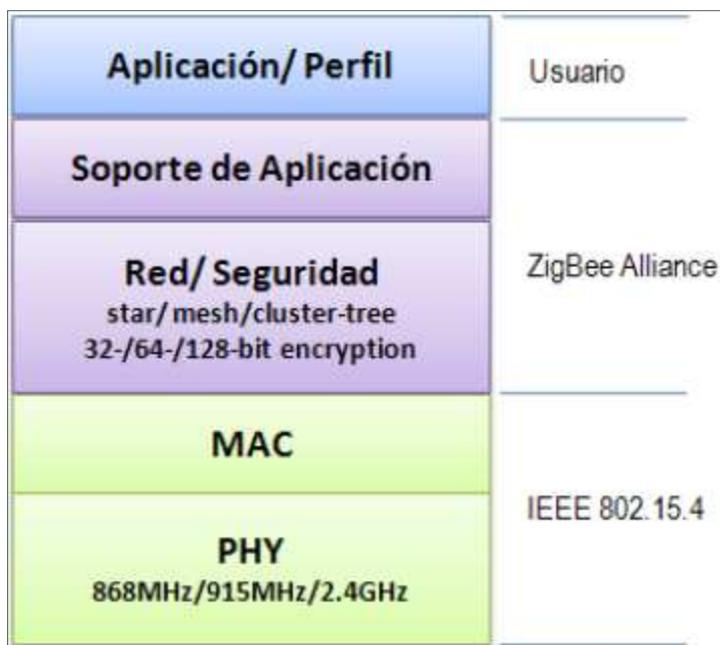


Figura 2.5. Capas de la pila de protocolos Zigbee [8].

En el estándar se definen 27 canales de frecuencia entre las tres bandas numerados desde 0 a 26. La PHY 868/915 MHz especifica un solo canal (Canal 0) entre 868 y los 868.6 MHz y diez canales (Canales 1-10) entre los 902.0 y 928.0 MHz separados 2 MHz entre frecuencia central de cada canal. Debido a la cercanía entre las bandas de frecuencia se puede utilizar el mismo hardware para ambas bandas

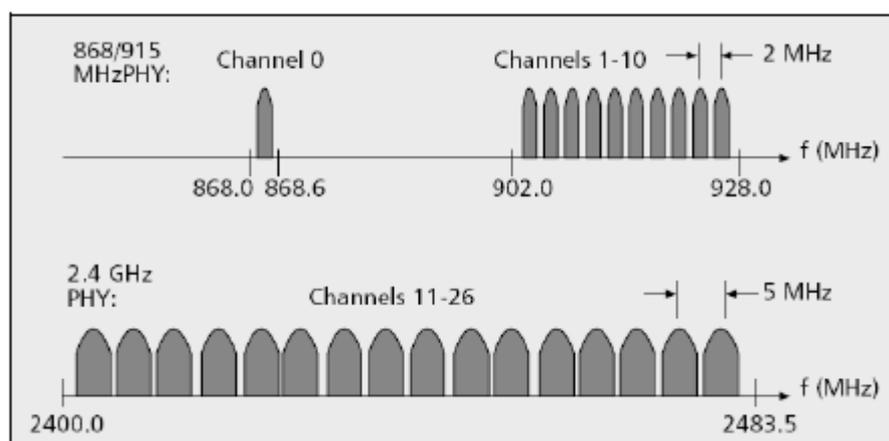


Figura 2.6. Estructura de Canales [9].

La PHY 2.4 GHz soporta 16 canales (Canales 11 – 26) cada uno con un ancho de banda de 2 MHz con un amplio espacio entre canales (5 MHz), esto con el objetivo de facilitar el filtrado en la transmisión y recepción. Se utilizan radios con un espectro de dispersión de secuencia directa, lográndose tasas de transmisión en el aire de hasta 250 Kbps en rangos que oscilan entre los 10 y 75 m, los cuales dependen bastante del entorno.

La capa de red (NWK) tiene como objetivo principal permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz adecuada para su uso por parte de la capa de aplicación. En esta capa se brindan los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la

entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos. Cuando esta capa se encuentra cumpliendo la función de unir o separar dispositivos a través del controlador de red, implementa seguridad, y encamina tramas a sus respectivos destinos; además, la capa de red del controlador de red es responsable de crear una nueva red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma. Es en esta capa en donde se implementan las distintas topologías de red que ZigBee soporta (árbol, estrella y malla).

La siguiente es la capa de soporte a la aplicación (APS), responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red. La capa de Red y de soporte a la aplicación están definidas por la ZigBee Alliance.

En el nivel conceptual más alto se encuentra la capa de aplicación que no es otra cosa que la aplicación misma y de la que se encargan los fabricantes.

Cada capa se comunica con sus capas subyacentes a través de una interface de datos y otra de control, las capas superiores solicitan servicios a las capas inferiores, y éstas reportan sus resultados a las superiores.

2.6. Tipos de tramas

En ZigBee se distinguen cuatro tipos diferentes de tramas básicas:

La trama de datos tiene una carga de datos de hasta 104 bytes. La trama esta numerada para asegurar que todos sus bytes llegan a su destino. Un campo nos asegura que la trama se ha recibido sin errores. Esta estructura aumenta la fiabilidad en condiciones complicadas de transmisión.

La estructura de la trama ACK, llamada también trama de reconocimiento, es dónde se realiza una realimentación desde el receptor al emisor, de esta manera se confirma que la trama se ha recibido sin errores. Se puede incluir un tiempo de silencio entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete.

La trama de comandos y configuración, se utiliza para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos. Una red centralizada utiliza este tipo de tramas para configurar la red a distancia.

La trama baliza (beacon) se encarga de “despertar” los dispositivos que “escuchan” y luego vuelven a “dormirse” si no reciben nada más. Estas tramas son importantes para mantener todos los dispositivos y los

nodos sincronizados, sin tener que gastar una gran cantidad de batería estando todo el tiempo encendidos.

2.7. Direccionamiento

Los dispositivos se direccionan empleando 64-bits y un direccionamiento corto opcional de 16 bits. El campo de dirección incluido en MAC puede contener información de direccionamiento de ambos orígenes y destinos (necesarios para operar punto a punto). Este doble direccionamiento es usado para prevenir un fallo dentro de la red.

Zigbee dispone de técnicas de enrutamiento propias. Estas técnicas sirven para crear dispositivos que renvían aquellos mensajes que no van dirigidos a sí mismos, de esta manera se puede entablar comunicación entre los distintos nodos de la red.

Los routers Zigbee no pueden entrar en modo “*sleep*” a diferencia de los dispositivos finales, ya que deben ser capaces de retransmitir los mensajes lo antes posible. Por la misma razón, escuchan el tráfico de manera constante. Estos dispositivos deben mantener tablas de enrutamiento con las rutas descubiertas y funcionalidad para participar

o iniciar el descubrimiento de nuevas o mejores rutas; también deben ser capaces de detectar y corregir errores.

Las tablas contienen información sobre el costo de cada ruta, el costo determina cual es la mejor ruta en un momento dado. La función que elige el coste de una ruta se determina a la hora de crear la implementación de la pila. Se puede basar en la latencia del recorrido de los mensajes, pero es recomendable que se tenga en consideración la carga media de la batería de los dispositivos que participan en la ruta.

En las tablas de enrutado pueden aparecer direcciones de cualquier dispositivo, pero sólo los routers pueden participar en los métodos de enrutado. Si un mensaje llega a un dispositivo FFD que no es un router, comprueba la dirección de destino y solo lo renvía si pertenece a alguno de sus hijos, es decir, pertenece a alguno de los RFD que están asociados a él. Si el mensaje está destinado para él, lo pasa a la capa superior, en otro caso de descarta.

2.8. Formación de la red Zigbee

Una nueva red ZigBee es establecida por un coordinador. Al inicializarse, el coordinador busca otros coordinadores en sus canales permitidos. Basado en la energía del canal y el número de redes

encontradas en sus canales, establece su propia red y selecciona un identificador PAN único de 16 bits. Una vez que la nueva red ha sido establecida, los ruteadores y terminales son habilitados a unirse a red.

En caso de conflictos por PAN ID repetidos en diferentes coordinadores, se efectúa un procedimiento de resolución que cambiará en uno de los coordinadores su identificador.

Los distintos dispositivos guardan información acerca de otros nodos de la red, en un área no volátil de memoria llamada tabla de vecindades. Al inicializarse, si un dispositivo determina a través de la tabla que fue parte de una red, puede ejecutar un procedimiento de notificación para localizarla.

Los dispositivos (coordinadores o ruteadores) que reciban la notificación, verificarán sus tablas para cerciorarse de que el nuevo dispositivo pertenecía a su red. Si la notificación falla o el dispositivo no se encuentra en las tablas de vecindad del resto, tratará de unirse a una de las redes como un nuevo dispositivo.

Una vez en la red, un dispositivo puede desasociarse ya sea por pedido del coordinador o router (dispositivos padres) o por sí mismo.

2.9. Aplicaciones de Zigbee

Los protocolos ZigBee están definidos para su uso en aplicaciones embebidas con requerimientos muy bajos de transmisión de datos y consumo energético.

Se pretende su uso en aplicaciones de propósito general con características auto organizativas y bajo coste (redes en malla, en concreto). Puede utilizarse para realizar control industrial, albergar sensores empotrados, recolectar datos médicos, ejercer labores de detección de humo o intrusos o domótica.

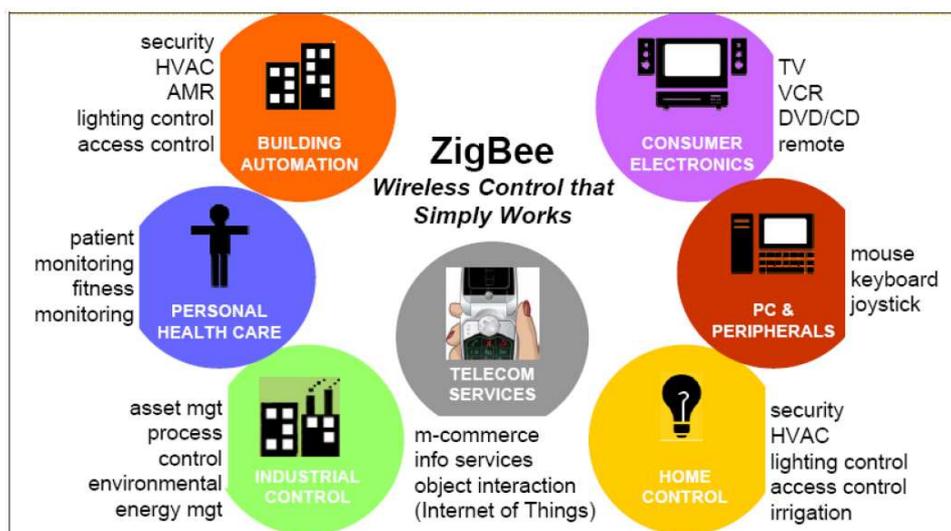


Figura 2.7. Aplicaciones definidas por Zigbee Alliance [10].

La red en su conjunto utilizará una cantidad muy pequeña de energía de forma que cada dispositivo individual pueda tener una autonomía de hasta 5 años antes de necesitar un recambio en su sistema de alimentación.

Los circuitos integrados para el diseño en ZigBee buscan ser económicos, sencillos y además brindar escalabilidad con el fin de facilitar la comercialización de productos a gran escala.

CAPÍTULO 3

3. DESARROLLO DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO

Ya hemos estudiado por separado las características de los elementos que conforman el sensor de nivel a excepción de los lentes que representan un rol importante en el diseño que vamos a realizar, a continuación intentaremos explicar en lo posible como se conectan los mismos, su funcionamiento como sistema y haremos una estimación de las señales que se esperan recibir en función de algunos parámetros de entrada al sistema, sin descuidar las partes mecánicas que se utilizan para poder interconectar esos elementos.

Para seleccionar los elementos que utilizaremos en la red de sensores es necesario realizar un análisis del escenario al que va a ser aplicada la red ya que así podremos determinar si el sistema satisface los requerimientos de la aplicación.

Debemos ir de lo general a lo particular para entender mejor el sistema de modo que vamos a analizar primero el comportamiento de los elementos que

conforman el sensor y luego a la red. Usualmente el cálculo del presupuesto de potencia nos da una buena apreciación de los límites de voltaje y el ancho de banda con el que se deben transmitir datos a través de la fibra óptica pero esto se aplica a sistemas que utilizan largos tramos de fibra, un sensor no está exento de pérdidas pero la finalidad es usar la fibra como medio sensible y no como enlace de transmisión, los tramos de fibra utilizados en el sensor no suman más de un metro y el sensor que utilizaremos es extrínseco^{††}, por lo tanto, para esta aplicación las pérdidas en la fibra son despreciables en comparación a la cantidad de luz que se perderá en el medio. Otra característica que es importante señalar es que resulta difícil tener un sistema que trabaje con señales analógicas y digitales, de modo que nos inclinaremos por una de ellas, por facilidad de diseño, robustez ante el ruido y simplicidad de los circuitos que controlan la emisión y recepción de luz hemos escogido trabajar con señales analógicas. El diseño de un sensor envuelve muchas variables que se deben describir para entender en totalidad su funcionamiento, pero las más importantes son:

- La cantidad de luz que se transmite y la que se recibe.
- Los voltajes de alimentación y de salida del amplificador de transimpedancia.
- El tipo y material de fibra que se empleará.

^{††} Existen sensores extrínsecos e intrínsecos siendo los primeros aquellos que no entran en contacto con el líquido del cual se desea hacer la medición.

- El diámetro del núcleo y la apertura numérica.
- El rango de operación en longitud de onda.
- El tipo de fuente óptica.
- La potencia de Transmisión.
- La sensibilidad del receptor.
- Conectores y costo.

El ancho de banda y la relación señal a ruido no son parámetros muy importantes para esta aplicación, porque no se intenta detectar la calidad de la señal transmitida sino la cantidad.

El modelo del sensor que vamos a diseñar se compone de tres partes esenciales: Transmisor, Receptor y la parte sensible. Nos conviene analizar la estructura de cada etapa y los elementos que las componen.

3.1. Elementos de un transmisor óptico

En un transmisor óptico la parte más importante es la fuente de luz, pero depende de la configuración de los demás elementos el correcto desempeño de la misma. Una carcasa que evite el exceso de pérdidas y permita acoplar la fuente de luz con la siguiente etapa, es decir la fibra, debe seleccionarse de acuerdo a las dimensiones del elemento que emitirá luz. Por otro lado la entrada del sensor requiere de un

circuito electrónico que permita disminuir la intensidad de la señal que alimentara a la fuente de luz. Los transmisores ópticos más sencillos constan de los elementos que nombraremos a continuación:

Carcasa.- Es la cubierta del circuito electrónico que debe ser fija, de ser posible con tornillos para proteger al circuito y a la fuente de luz de golpes, humedad y otros factores. Debe contener también orificios del tamaño adecuado para ventilar los elementos que se calientan por la disipación de potencia, pero sin descuidar el confinamiento de la fuente de luz para disminuir las pérdidas.

Interfaz Eléctrica.- En el exterior de la carcasa se deben mostrar con claridad los voltajes y corrientes que maneja el circuito, así como las entradas y salidas del mismo que pueden resultar en cables, pines, conectores, borneras, etc. Estos elementos al igual que las fuentes de voltaje, las etapas retroalimentadas que dan control al circuito, las etapas de amplificación y otros, corresponden las interfaces del dispositivo.

Circuito Manejador.- Dependiendo de la aplicación se pueden usar distintos tipos de manejo de las fuente de luz. Los diodos emisores de luz tienen un mejor desempeño cuando son manejados por fuentes de corriente. El diseño correcto del circuito manejador permitirá explotar las

características de la fuente de luz aun cuando no fuera el elemento más sofisticado.

Fuente de Luz.- Las fuentes más comunes son los LEDs, dependiendo de la aplicación se pueden escoger diferentes características para la fuente de luz como potencia, velocidad, etc.

Interfaz óptica.- Hoy en día existen varios modelos de conectores en el mercado que acoplan la fibra y la fuente de luz minimizando las pérdidas. Estos elementos se pueden ensamblar en la parte exterior de la carcasa del sistema con mucha precisión.

3.2. Elementos de un receptor óptico

Si bien un transmisor convierte las señales eléctricas en ópticas, el receptor tiene una función igual de importante y es la de interpretar los estímulos de las señales de entrada a partir de la señal óptica proveniente de la fibra. El diseño de un receptor depende puramente del tipo de aplicación y los requerimientos del sistema, puede ser mucho más variado que el transmisor, desde un foto detector debidamente energizado hasta sistemas de alta complejidad que reconstruyen la señal al pasar por varios procesos de filtrado, ganancia, decisión y otros. El receptor tiene al igual que el transmisor carcasa,

interfaz óptica e interfaz electrónica, y se aplican de igual manera tanto en transmisores como en receptores. Algunos aspectos ya fueron mencionados por lo tanto solo nos resta describir los amplificadores.

Preamplificador.- Este elemento se encarga de amplificar la señal que proviene del foto detector introduciendo una cantidad despreciable de ruido al sistema, su salida tiene dimensiones de voltios por amperio debido a los transceptores ópticos cuya salida es en parámetros de corriente, por lo tanto reciben el nombre de amplificadores de transimpedancia.

Amplificador Principal.- Este elemento se encarga de amplificar la señal que proviene del preamplificador a niveles mucho más altos. Su función principal es suministrar potencia a la señal de modo que pueda ser procesada y un nivel de amplificación que permita analizar parámetros como el ruido, fidelidad, ancho de banda, etc.

Ahora ya hemos revisado los principales componentes del sensor con detalle: transmisor, receptor y a la fibra misma en el capítulo uno. Sin embargo hay que hacer una elección de toda la gama de componentes para combinarlos eficientemente y lograr el sensor que nos hemos propuesto realizar. Para esto debemos enfocarnos en los requerimientos del sistema, las principales interrogantes son: ¿Cuál es el rango de separación entre la fibra y el líquido en el que trabajara el

sensor?, ¿Qué configuración se adoptará en el transmisor y el receptor?

Al responder estas preguntas ya podemos tomar decisiones de los elementos que conformaran cada subsistema, entre ellas:

- Tipo de fuente de voltaje y fuente de luz.
- Potencia de transmisión.
- Tipo y material de la fibra.
- Diámetro del núcleo y apertura numérica.
- Tipo de detector.
- Sensibilidad del receptor.

3.3. Diseño, esquema y dispositivos usados en el transmisor óptico

Las fuentes de luz estudiadas en el capítulo uno son usadas en diferentes aplicaciones, los diodos emisores de luz son confiables de bajo costo, su tiempo de vida es largo y son elementos robustos, presentan mayor linealidad que los láseres, por esta razón son preferidos en aplicaciones con fibras multimodo de distancias cortas.

Ya que solo la luz que se inyecta en la fibra es útil, la fuente de luz debe poseer un patrón de emisión que se acople eficientemente con la fibra, este patrón es finito y oscila alrededor de la longitud de onda central de emisión, es decir que aun cuando se intente inyectar luz de un solo color (longitud de onda) algunos modos estarán presentes. La potencia de emisión de un LED es proporcional a la corriente que lo polariza, sin embargo esta potencia se ve ligeramente disminuida por la atenuación presente a lo largo de la fibra, las pérdidas de acople a la entrada y reflexión al final de la misma.

Es importante resaltar que los LEDs poseen una impedancia dinámica que hace posible el utilizar nada mas una etapa de amplificación de corriente para modular la fuente óptica, de modo que un transistor de alta velocidad es suficiente para obtener una respuesta rápida y confiable.

La fuente que utilizaremos será un LED rojo IF-E96 de la compañía Industrial Fiber Optics Inc, este trabaja en la longitud de onda de 660nm que corresponde a la de menor atenuación según veremos más adelante cuando escojamos el tipo de fibra.

Para disminuir las pérdidas por acople y lograr inyectar la mayor cantidad de luz en la fibra, la uniremos con el LED por medio de un empaquetamiento que protege a ambos de agentes externos y posee

un alojamiento de precisión moldeado a la fuente de luz con un ensamble mecánico que permite acoplar la fibra.

El empaque que aloja al LED y la fibra esta hecho de PBT^{‡‡}, la fibra en el interior toca un micro lente que sirve como colimador^{§§} para que la mayor parte de la luz emitida por el LED sea inyectada en la fibra como se aprecia en la siguiente figura.

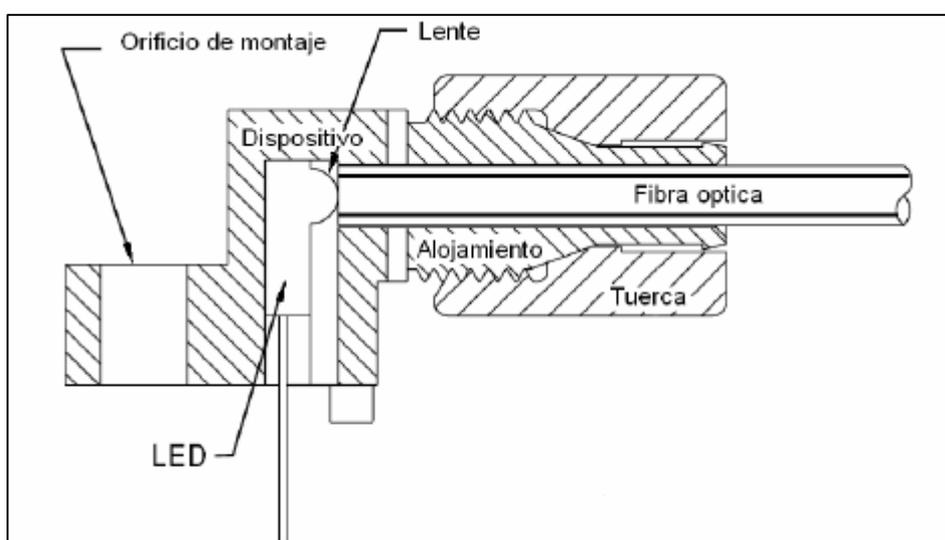


Figura 3.1 Acople del LED con la fibra ^{*}.**

La corriente máxima que soporta el IF-E96 es de 35mA, su tiempo de subida y bajada es de 0.1 μ s y la temperatura a la que opera normalmente esta entre -40°C y 85°C. Con este breve análisis y los

^{‡‡} Politereftalato de Butileno (polybutylene terephthalate-PBT)

^{§§} Colimador es un dispositivo óptico que permite obtener un haz de rayos luminosos paralelos.

^{***} Tomado del datasheet Diodo IF-E96. Ver la sección de anexos.

datos que hemos obtenido del datasheet ya podemos empezar con nuestro diseño.

3.4. Circuito manejador del LED

El LED debe ser polarizado por una fuente de corriente, un diseño sencillo que presenta buena linealidad esta basado en un amplificador clase A. La fuente que suministra corriente debe ser limitada para no exceder la capacidad del LED, así que debe llegar a un máximo de 34mA y tener un mínimo de 1.8mA para al menos encender el LED. Para poder modular la corriente en este rango usaremos un transistor BJT del tipo PNP 2N3904 (Amplificador de propósito general) en configuración H, porque es un elemento fácil de conseguir y funciona muy bien no solo como amplificador, también actúa como un buen conmutador y sus características exceden las necesidades que requerimos para este diseño. Una resistencia a tierra estará presente en el emisor para establecer el valor de corriente que atraviesa al LED, un divisor de voltaje fijara un valor DC en la base. La fuente de luz será ubicada en el colector que actúa como fuente de corriente modulada, el diagrama del circuito lo podemos observar en la siguiente figura:

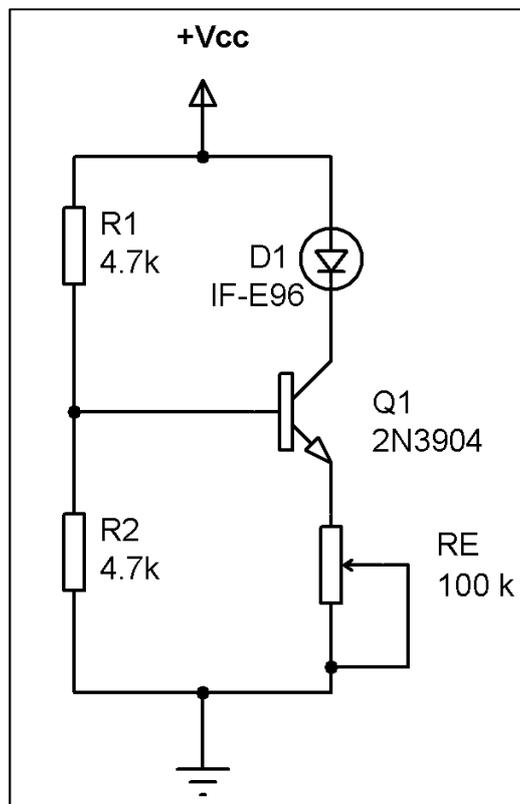


Figura 3.2 Circuito manejador del LED.

La alimentación será de 5V y en la base debemos establecer la mitad de este voltaje para obtener la excursión máxima de la señal AC sin recortes en caso de establecer un tipo de modulación, para lograrlo las resistencias que conforman el divisor en la base deben ser de igual valor, hemos escogido $4,7k\Omega$ por ser un valor que proporciona estabilidad al circuito.

Para establecer el valor de la corriente que polariza al LED, debemos fijar el valor de la resistencia presente en el emisor y hacer un poco de análisis de la red de carga del transistor, donde tenemos lo siguiente:

$$V_{cc} = V_{LED} + V_{ce} + V_e$$

$$5 = V_{LED} + V_{ce} + I_e R_e \quad (3.1)$$

Del datasheet del IF-E96 encontraremos que el voltaje mínimo que enciende el LED es de 1.8 voltios, y por la característica del transistor podemos aproximar las corrientes de emisor y colector, es decir:

$$I_e \approx I_c \quad (3.2)$$

Si reemplazamos estas dos características en la ecuación 2.2 tenemos lo siguiente:

$$5[v] = +1,8[v] + V_{ce} + I_c R_e$$

Ahora debemos dimensionar la resistencia del emisor para poder graficar la recta de carga del transistor, para ello podemos apoyarnos en las condiciones críticas del transistor, es decir cuando entra en corte y saturación. La condición de corte no es muy útil para este análisis ya que el valor mínimo de corriente en la línea de carga del transistor vendría dado por la que enciende al LED y es de 1mA lo que garantiza que el transistor no entrará en estado de corte, esto lo analizaremos

mas adelante, sin embargo la condición de saturación si nos es de utilidad. El valor del resistor en el emisor debe ser tal que cuando el transistor se sature, la corriente en la línea de carga no exceda la corriente máxima del LED (35mA), así que podemos considerar el valor máximo de corriente como un limitante para escoger el valor del resistor cuando el transistor se satura, es decir cuando el circuito trabaja en las peores condiciones y la corriente que polariza al LED es máxima. Aplicando estas condiciones al análisis anterior tenemos:

$$5v = +1,8v + V_{ce} \leftrightarrow 0 + (35mA)R_e \quad (3.3)$$

$$3,2v = (35mA)R_e$$

$$R_e = \frac{3,2v}{35mA}$$

$$R_e = 91.4\Omega$$

Este valor no existe comercialmente de modo que debemos aproximarlo al inmediato superior para disminuir el valor de la corriente máxima que polarizara al LED y evitar que el transistor entre en estado de saturación, con un potenciómetro podemos establecer un valor que garantice el funcionamiento correcto del transistor, por ejemplo 100Ω.

Ahora que hemos dimensionado la resistencia en el emisor podemos determinar ciertos parámetros a partir de la recta de carga, que queda de la siguiente manera:

$$V_{ce} = 3,2 - 100I_c \quad (3.4)$$

Por ejemplo, la corriente máxima que polarizara al LED cuando el transistor se satura ($V_{ce} = 0$), es de 32mA y el voltaje colector-emisor cuando el transistor esta a punto de llegar al corte ($I_c = 0$), es de 3,2v. Hemos garantizado la polarización del LED y del transistor, ya que para los valores establecidos los valores de corriente y voltaje permiten que el transistor trabaje en zona lineal. Nos resta calcular la potencia que proviene de esta polarización cuando se acopla el LED al tramo de fibra. Ya que el LED actúa como un transductor al convertir energía eléctrica en energía óptica debemos recurrir a la relación de eficiencia de este transductor, la “Eficiencia externa” relaciona la potencia óptica emitida por un LED y a los parámetros de polarización del mismo, viene dada por la siguiente expresión [11]:

$$\eta_{ext} = \frac{P_{out(optica)}}{I \cdot V} \quad (3.5)$$

Donde P_{out} representa la potencia óptica de salida, I , V , la corriente y el voltaje de polarización del diodo respectivamente y η_{ext} representa la eficiencia externa que va del 5% al 20% para el Arseniuro de Galio y

Aluminio (AlGaAs) del cual está fabricado el IF-E96 bajo las siguientes condiciones:

- La corriente que polariza al diodo sea mayor de 20mA
- El núcleo de la fibra a la que se acoplara el LED debe ser de 1mm de diámetro.
- La distancia entre la lente colimadora y la fibra debe ser menor o igual a 0.1mm.

En la medida que se cumplan estas condiciones se puede considerar hasta el 20% de la eficiencia externa. Con este análisis hemos determinado los aspectos más importantes del transmisor.

3.5. Interfaz de la Fibra con el transmisor y el receptor.

La fibra óptica de plástico ha venido tomando fuerza en los últimos años por las múltiples ventajas que presenta, a pesar de que posee gran atenuación comparada con la fibra de vidrio presenta muchas ventajas entre las cuales tenemos:

- Son fácilmente manejables.
- Pueden doblarse sin romperse o astillarse.
- Se acoplan fácilmente a los dispositivos ópticos.

- Pueden pulirse con facilidad.
- Son de bajo costo.

El campo de aplicación que hemos escogido se remite a las industrias de alimentos, los tres elementos que conforman el sensor fueron escogidos en base a la longitud de onda que mejor se acopla a esta aplicación y fue definida en el diseño del transmisor con el IF-E96, de modo que la fibra debe tener la menor atenuación en la longitud de onda de trabajo de este elemento.

Dos tramos de fibra son necesarios para llevar a cabo esta aplicación, un tramo acoplado al diodo emisor y otro acoplado al fotodetector, dado que el sensor es extrínseco se usaran fibras ópticas de plástico del tipo OC-2134 Luceat. Este par de fibras constituyen la parte más sensitiva del sistema.

Las fibras poseen diámetros de núcleo y revestimiento de 980 μm y 1000 μm respectivamente, no debemos escoger una fibra muy gruesa porque luz no proveniente de la fibra transmisora podría ingresar en el tramo de la fibra receptora y producir así un dato falso de la cantidad de luz que se esta reflejando.

Para entender mejor el trayecto que toma la luz que escapa del emisor y analizar las pérdidas que existen en el camino que lleva al receptor

nos basamos en la figura del sistema completo que vemos a continuación:

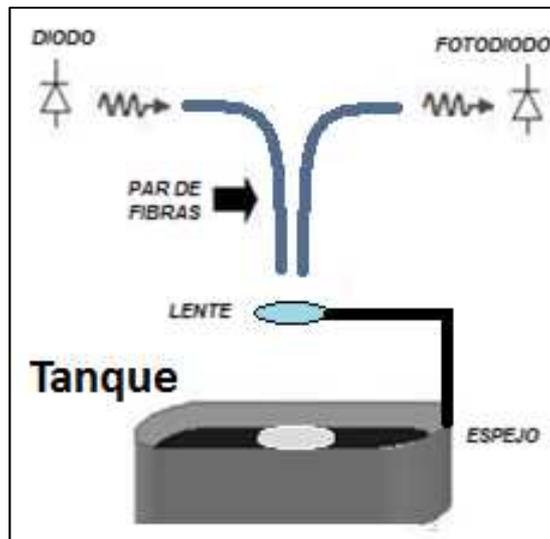


Figura 3.3 Sistema Sensor.

La luz que emite el diodo es acoplada a la fibra y cuando abandona la misma se desplaza en el aire hasta encontrarse con una lente donde la luz es colimada, (más adelante se demostrara que el uso de esta lente mejora significativamente el rango dinámico del sistema), luego alcanza la superficie del líquido donde se encuentra ubicado un espejo con la finalidad de aumentar la intensidad de luz reflejada ya que es una superficie perfectamente reflejante, entonces los rayos reflejados atraviesan nuevamente la lente y entran en la fibra receptora donde finalmente inciden en el foto-detector.

Ahora estimaremos el presupuesto de pérdidas en la fibra y cuanta luz se espera recibir en base a la potencia acoplada desde el transmisor.

Las fibras que estamos utilizando tienen una atenuación aproximada de 0.15 dB/m, los tramos de fibra suman una distancia menor que 1m así que tendríamos una pérdida aproximada 0.15 dB/m en las fibras, aunque en el modelo teórico consideramos estas pérdidas insignificantes.

Existen dos acoples uno en el transmisor y otro en el receptor, las pérdidas por acoples suman aproximadamente 1dB, esta cantidad se puede reducir si se realiza un pulido de las fibras y si se ajusta bien la fibra en el empaquetado que ya hemos presentado, además debido a la micro lente interna que presenta se produce un mejor acople de la luz, de modo que también pueden considerarse despreciables las pérdidas por acoples.

Al final de la fibra transmisora y al inicio de la fibra receptora existe transmisión entre dos medios diferentes, la luz que se refleja puede ser calculada usando las ecuaciones de los coeficientes de Fresnel (ver Cap. 1) si consideramos incidencia normal y con los índices de refracción obtenidos del datasheet: $n_F=1.492$ para las fibras y $n_A=1$ para el aire tendríamos:

$$r_{\parallel} = r_{\perp} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad \text{y} \quad Re = r_{\parallel}^2$$

Donde “Re” es la intensidad de luz reflejada, n_1 y n_2 son los índices de refracción del medio 1 y el medio 2 y r_{\perp} y r_{\parallel} son los coeficientes de reflexión de Fresnel. Remplazando $n_F = n_1$ y $n_A = n_2$ y tenemos $R_{FA} = 3.89\%$, es decir que se pierde aproximadamente el 3.89% de la intensidad luminosa por reflexión cuando la luz abandona la fibra transmisora. Para el caso en el que la luz ingresa a la fibra receptora también se producen pérdidas por reflexión pero debe hacerse un ajuste por el ángulo con el que la luz ingresa y lo veremos más adelante.

Finalmente la mayor cantidad de pérdidas se da en el trayecto que nos falta analizar y es aquel cuando la luz abandona la fibra transmisora para reflejarse en el espejo e incidir en la fibra receptora, para esto hacemos uso del análisis realizado en la elaboración de un sensor que determina el índice de refracción de algunas sustancias y está basado en el principio de operación de un sensor de desplazamiento [12], donde tenemos el siguiente análisis:

El espejo será ubicado a una distancia “h” desde el extremo de las fibras, la luz transmitida abandona la fibra con un ángulo máximo que viene dado por(ver Cap. 1, ecuación 1.10):

$$\theta_{NA} = \text{Sen}^{-1} \left(\frac{NA}{n_0} \right)$$

Donde “NA” es la apertura numérica de la fibra y “n₀” el índice de refracción del aire.

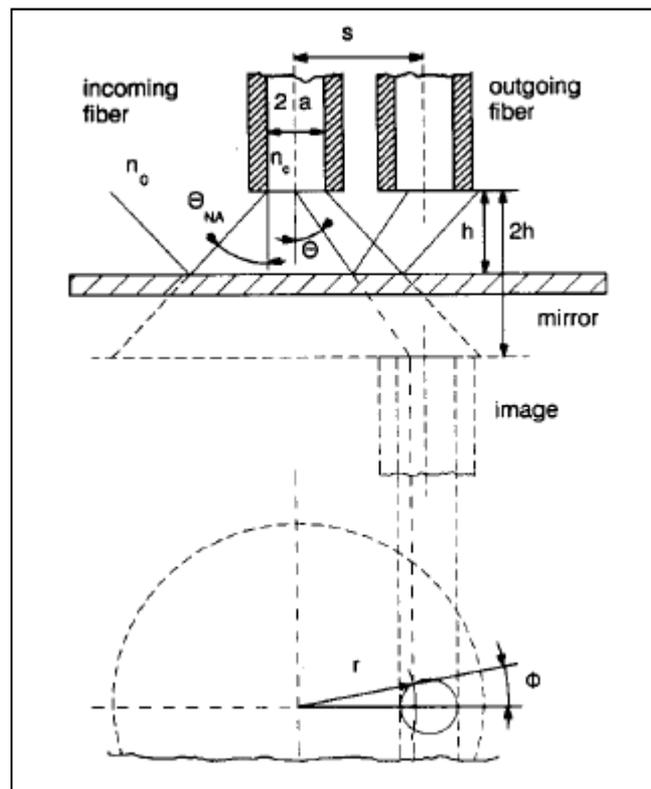


Figura 3.4 Sensor de reflexión de Fibra Óptica [12].

La potencia en la fibra receptora puede calcularse como la suma de la intensidad $I(r,2h)$ en el plano de la superficie a una distancia $2h$ de las fibras como se muestra en la Fig. 3.4 ya que si prolongamos los rayos reflejados podemos realizar el análisis como si la luz fuera atrapada por la imagen de la fibra receptora producida por el espejo, así la potencia queda definida por la siguiente expresión:

$$P(i) = \int_0^R \int_0^{2\pi} I(r, 2h) \cdot r \, d\phi \, dr \quad (3.6)$$

Donde r es la distancia desde el centro de la fibra transmisora ϕ es el ángulo azimut, R es el radio del cono de luz a la distancia $2h$:

$$R = a + 2h \cdot \tan \theta \quad (3.7)$$

Donde “ a ” representa el radio del núcleo de la fibra†††, la distribución de intensidad “ $I(r,2h)$ ” no depende del ángulo azimut “ ϕ ” y viene dada por la siguiente expresión:

$$I(r, 2h) = \frac{2P_i}{\pi R^2(h)} \left(1 - \frac{r^2}{R^2(h)} \right) \quad (3.8)$$

††† Todas estas especificaciones hacen referencia a los parámetros de la Figura 3.5

El factor de eficiencia “ $\eta(2h, n_o)$ ” es determinado como la relación entre la potencia de luz capturada por la fibra receptora “ $P_o(2h, n_o)$ ” y la potencia acoplada a la fibra transmisora “ P_t ”:

$$\eta(2h, n_o) = \frac{P_o(2h, n_o)}{P_t} \quad (3.9)$$

$$\eta(2h, n_o) = \int_{R1}^{R2} \int_0^{\varphi_c} R_m \cdot T_i(n_o) \cdot T_o(r, 2h, n_o) \cdot I(r, 2h) \cdot r \, d\varphi \, dr$$

$$y \, \varphi_c = \arccos((s^2 + r^2 - a^2)/2as) \quad (3.10)$$

Donde “s” representa la distancia entre los ejes de las fibras y “ R_m ” la reflectividad del espejo. La potencia capturada por la fibra receptora se ve reducida por el coeficiente de transmitancia de Fresnel “ $T_o(r, 2h, n_o)$ ” debido a la reflexión producida al final de la fibra receptora, el coeficiente de transmitancia producido en la fibra de la cual proviene la luz puede ser expresado por la aproximación de un rayo con incidencia normal, mientras que el coeficiente en la fibra receptora incluye una corrección debido al ángulo de inclinación con el cual inciden los rayos en dicha fibra, estos coeficientes vienen dados por las siguientes expresiones:

$$T_i(n_o) = \frac{4n_o n_c}{(n_c + n_o)^2}$$

$$T_o(\mathbf{r}, 2\mathbf{h}, \mathbf{n}_o) = \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(2U)\text{sen}(2V)}{\text{sen}^2(U+V)\cos^2(U-V)} + \frac{\text{sen}(2U)\text{sen}(2V)}{\text{sen}^2(U+V)} \quad (3.11)$$

$$U = \arctan\left(\frac{r}{2h}\right) \quad ; \quad V = \arcsen\left(\frac{n_o \text{sen}(U)}{n_c}\right)$$

Los límites de integración varían con la distancia entre las fibras y el espejo ya que a medida que el espejo avanza los rayos que inciden en la fibra receptora dividen los límites en tres regiones:

- $R1=0$ y $R2=0$ cuando $R \leq s-a$
- $R1=s-a$ y $R2=R$ cuando $s-a < R \leq s+a$
- $R1=s-a$ y $R2=s+a$ cuando $R > s+a$

Así hemos analizado el presupuesto de pérdidas en el tramo en que la luz viaja desde el diodo emisor hasta el fotodetector, solo resta analizar la cantidad de luz que se recupera en el fotodiodo en base a la potencia que hasta ahora hemos determinado.

3.6. Análisis de imágenes con lentes convergentes

En nuestro sistema usamos lentes en varias etapas, ya sea en los acoples donde existe una lente interna que permite que una mayor cantidad de luz ingrese en la fibra y en el fotodetector, o en la etapa de transmisión de una fibra a otra donde colocar una lente nos permitirá

optimizar significativamente el rango dinámico del sistema. Una lente óptica se hace con un material transparente que puede ser vidrio, cristal, etc. Estos elementos poseen propiedades especiales ya que tienen un índice de refracción tal que la luz que la atraviesa se refracta en su interior, es decir se desvía de su trayectoria original. Existen varios tipos de lentes, pero solo analizaremos aquella que es parte de nuestro sistema.

Las lentes biconvexas o también llamadas convergentes poseen dos caras esféricas, cada una con su propio radio de curvatura, centro de curvatura, distancia focal y foco, entiéndase por centro de curvatura y foco dos puntos separados a una distancia igual al radio de curvatura y distancia focal respectivamente del centro de la lente, una descripción mejor se puede apreciar en la siguiente figura:

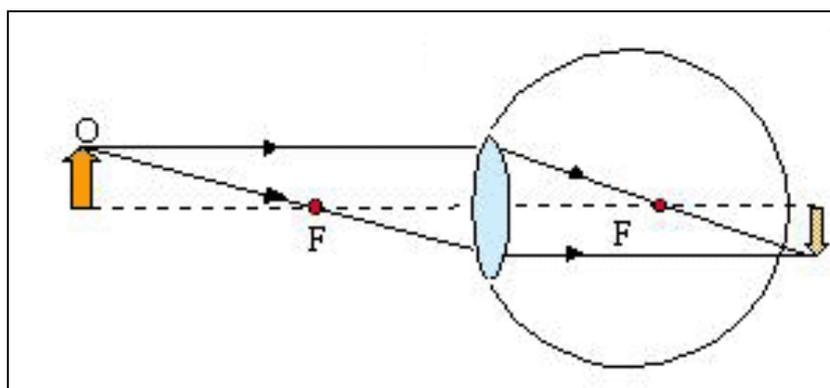


Figura 3.5 Distancia focal de una lente convergente.

El análisis de lentes es sencillo y se puede resumir con la siguiente ecuación llamada ecuación de lentes delgadas⁺⁺⁺ que relaciona la distancia del objeto(d_o) con respecto a la lente, la distancia de la imagen(d_i) con respecto a la lente y la distancia focal de la lente(f):

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad (3.12)$$

Para una lente convergente la distancia focal es positiva siempre, y la distancia imagen es positiva siempre y cuando la imagen se forme del lado opuesto al del objeto (imagen real) de lo contrario es negativa (imagen virtual).

El rango dinámico de nuestro sistema es de aproximadamente 1m, esto quiere decir que en ausencia de lentes, un metro será la distancia máxima que se puede medir, si queremos aumentar esta distancia a 4m con una lente que posee 10cm de distancia focal debemos colocar la lente a una distancia de:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{400} = \frac{1}{10} \quad \rightarrow \quad d_o = 10.25 \text{ cm}$$

Es decir que la lente debe colocarse a una distancia de aproximadamente 10.25cm de las fibras, para que el rango dinámico del

⁺⁺⁺ Una lente delgada es aquella en la que se supone que su espesor es despreciable, en comparación con su distancia focal.

sensor se incremente a 4m aproximadamente, note que este valor cae dentro del rango antes mencionado de modo que la luz que proviene de las fibras con seguridad atravesaría la lente aumentando así el rango dinámico del sistema.

Puede suponerse que este incremento significativo de la distancia es un valor ideal y que no es posible lograrlo por el desgaste de potencia que ya hemos analizado, sin embargo en esta apreciación no tomamos en cuenta los niveles de potencia óptica que salen de la fibra sino mas bien la capacidad que tienen los rayos de luz para viajar enormes distancias.

3.7. Diseño, esquema y dispositivos usados en el receptor óptico.

El receptor, tan importante como la fibra o el transmisor juega un papel fundamental en este sistema y es el de medir la cantidad de luz que se ha recuperado desde su emisión en el transmisor. La señal que se piensa medir debe incidir sobre un elemento sensible a la luz llamado fotodetector. El fotodetector convierte la potencia óptica incidente en corriente eléctrica, pero en una proporción muy débil para ser procesada o peor aún alimentar un carga por lo que el sistema que

recupera las señales debe estar acompañado de al menos un amplificador como ya veremos a continuación.

Para que el fotodetector tenga un desempeño óptimo debe cumplir con las siguientes características:

- Debe poder acoplarse con la fibra en la misma longitud de onda de operación.
- La cantidad de ruido con la que aporte al sistema debe ser mínima o en rangos que se consideren despreciables.
- Su tamaño tiene que ser compatible con la fibra para recibir la mayor cantidad de luz.
- Debe presentar buena resistencia a los factores ambientales.

El receptor presenta un circuito más sencillo que el transmisor ya que no es necesario medir parámetros como la temperatura o determinar la forma de la señal, ni tampoco intentar reconstruirla con bloques de decisión, por lo que utilizaremos el receptor más simple que consiste en un fotodiodo y una resistencia.

Utilizaremos un fotodiodo PIN IF-D91 de la compañía Industrial Fiber Optics Inc. que puede reconocer señales que se encuentran en el rango de los 400nm a los 1100nm, un fotodiodo avalancha produciría una amplificación de la señal recibida pero requiere de voltajes más

elevados de polarización y al entregar mayor potencia también aumenta su temperatura que es un factor no deseable, el fotodiodo PIN posee características suficientes para satisfacer las necesidades de este sistema.

El empaquetamiento que utilizaremos para acoplar la fibra con el fotodiodo es el mismo usado en el transmisor, así podemos proteger a la fibra y al fotodetector de factores ambientales, lograr un acople fijo, disminuir pérdidas de Luz y montar este acople fácilmente en la placa del circuito.

En el datasheet del fotodiodo IF-D91 podemos encontrar que presenta una respuesta de $0.2 \mu\text{A}/\mu\text{W}$ en la longitud de onda central que oscila alrededor de los 632nm, su corriente de oscuridad es de 60 nA.

La respuesta del fotodiodo viene dada en términos de corriente, pero la mayoría de señales analógicas se encuentran en términos de voltajes, por lo tanto es necesario introducir al circuito un elemento que transforme corriente en voltaje, a los dispositivos que permiten lograr este cambio se los llama dispositivos de transimpedancia.

El circuito más sencillo, es aquel que utilizaremos para este diseño y se muestra en la siguiente figura.

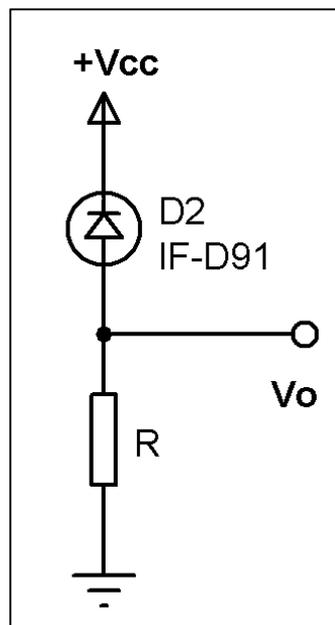


Figura 3.6 Esquema básico del receptor.

Del circuito de la figura podemos apreciar que el voltaje V_o viene dado por:

$$V_o = P_i \cdot R_x \cdot \mathcal{R} \quad (3.13)$$

Donde “ P_i ” representa la potencia óptica incidente en el fotodiodo, “ \mathcal{R} ” la responsividad del fotodetector y “ R_x ” el valor del resistor en ohmios. Las principales desventajas de este circuito por su simplicidad es que la impedancia de la carga debe ser alta comparada con “ R_x ” ya que de otro modo la ganancia del sistema se vería afectada. La solución a este problema es poner un amplificador operacional a la salida con el fin de

aislar la carga del circuito detector, podemos observar el diseño que incluye un amplificador operacional en la siguiente figura.

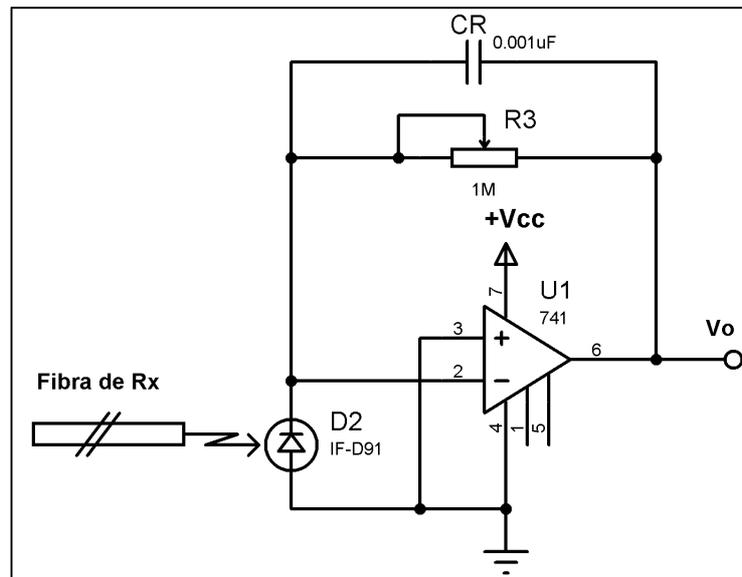


Figura 3.7 Esquema mejorado del receptor

La corriente mínima que entrega el IF-D91 es de 60nA cuando se encuentra inactivo, mas cuando recibe luz podemos calcular la corriente que entrega el fotodetector con la siguiente ecuación:

$$I_{pd} = P_i \cdot \mathcal{R} \quad (3.14)$$

Donde I_{pd} es la corriente generada por el fotodetector, P_i es la potencia óptica proveniente de la fibra y \mathcal{R} es la responsividad del fotodetector.

Con estos datos y el circuito de la figura anterior podemos empezar nuestro análisis, partiendo desde el acople de la fibra con el fotodetector. El IF-D91 puede asumir dos estados de comportamiento que a su vez afectan el comportamiento del Opamp, cuando no recibe luz, solo circula por el la corriente de oscuridad, la cual es muy pequeña, de modo que puede considerarse al fotodetector como circuito abierto, en este estado el Opamp actúa como un seguidor de emisor ya que es como si el fotodetector fuera extraído del circuito. Por otro lado cuando el fotodiodo recibe luz se comporta como una fuente de corriente inversamente polarizada con gran impedancia y de baja corriente^{sss} que es proporcional a la intensidad de luz proveniente de la fibra (Eq 3.14), para este caso el Opamp actúa como un dispositivo de transimpedancia.

Al observar la figura anterior notamos que el voltaje en el pin + del Opamp es 0 ya que esta conectado a tierra y por la gran impedancia de entrada que posee se puede demostrar que:

$$V^+ = V^- = 0$$

Donde V^+ y V^- representan los voltajes de los pines de entrada del Opamp, si asumimos que inicialmente el fotodiodo no recibe luz, el

^{sssss} Por lo general esta corriente se encuentra en el rango de los microamperios

voltaje de salida sería aproximadamente 0 ya que la corriente oscura es la única que pasa a través del resistor R3, la cual es despreciable y no produce un voltaje significativo en el resistor R3.

Ahora cuando el fotodetector si recibe luz a través de él se genera una fotocorriente que lo atraviesa en sentido inverso es decir del cátodo al ánodo. Por la gran impedancia de entrada que posee el Opamp sabemos que esta corriente no puede ingresar por los pines de entrada del mismo, así que el único camino que puede tomar esta corriente es a través resistor R3 de modo que la salida queda expresada de la siguiente manera:

$$V_o = I_{pd} \cdot R_3 \quad (3.15)$$

Así que podemos cambiar la ganancia de la salida variando el valor del resistor R3.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA RED ZIGBEE

4.1. Escenario de aplicación.

Para el desarrollo del proyecto hemos elegido un entorno industrial, específicamente con líquidos no corrosivos y a temperaturas ambientales debido al tipo de fibra óptica que se utilizara, fibra óptica de plástico.

Realizando un análisis de las características comunes de los contenedores industriales de fluidos, se bosquejo el diseño de un conjunto de seis cilindros almacenadores de una empresa dedicada a la elaboración de refrescos. Estos contenedores tienen agua carbonatada, la cual cumple con los requisitos detallados previamente.

Cabe recalcar que nuestro sistema de sensores es escalable y realizando modificaciones de los elementos que forman parte del

sensor POF se puede inclusive realizar mediciones a altas temperaturas.

En la figura 4.1 se describe de manera gráfica el entorno de aplicación para la red de sensores. Se especifican las dimensiones facilitadas por los operadores encargados de monitorear los niveles de líquido en los tanques de almacenamiento.

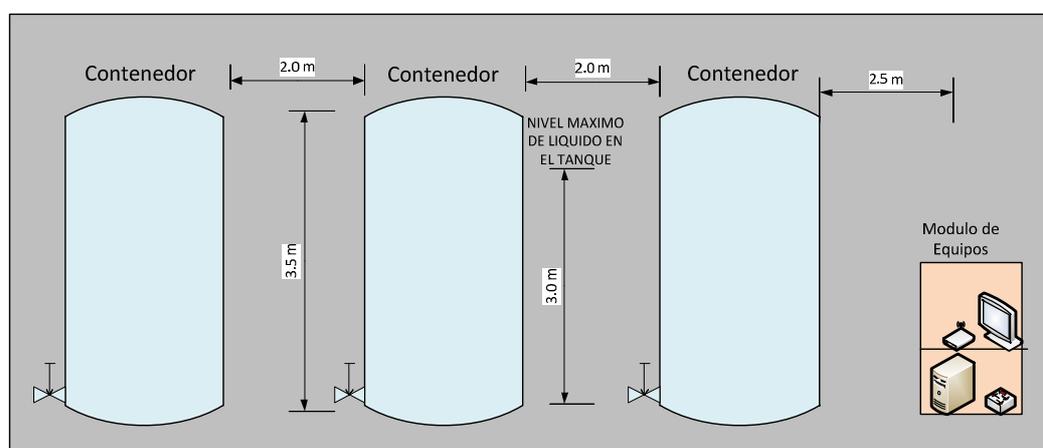


Figura 4.1. Esquema en vista lateral del entorno

Los tanques tienen una altura de tres metros y medio, pero el líquido no debe llenar por completo el espacio físico dentro de los cilindros. Las normas internas de la empresa recomiendan una altura máxima del líquido de dos metros y tres decímetros, es decir dejar 0.5 metros de guarda entre el límite superior del tanque y la superficie del agua.

Debido al dimensionamiento de los tanques y el espacio entre ellos se tiene una distancia máxima entre el sensor y el coordinador de 7 metros aproximadamente. Esta distancia está dentro del rango de alcance de Zigbee en interiores, 30 metros.

En base a lo expuesto, diseñaremos la red de sensores como una solución a la medición del nivel de líquidos basados en sensores de fibra óptica y una red ZigBee para la transportación de los datos registrados por los sensores hacia un módulo de central de procesamiento, presentación y almacenamiento de los datos obtenidos

4.2. Descripción del prototipo a implementarse

Describiremos el proceso de selección y diseño de los dispositivos, y los componentes requeridos para el funcionamiento de la red Zigbee que soporta el prototipo de adquisición de datos.

Nuestra red básicamente está conformada por dispositivos terminales y un único coordinador encargado de la recolección de los datos registrados por los sensores.

En la figura 4.2 se describe el diagrama de bloques general para el coordinador y el módulo terminal.

De manera resumida nuestro hardware deberá cumplir con las siguientes responsabilidades:

- Incluir dispositivos para la transmisión y recepción de datos formando una red inalámbrica bajo en estándar Zigbee.
- Permitir la interacción de los terminales Zigbee con los sensores de nivel de fibra óptica.
- Permitir la comunicación serial entre un computador y el coordinador Zigbee.
- Realizar las acciones necesarias en base a los datos adquiridos.
- Suministrar la energía eléctrica requerida para el funcionamiento de los distintos módulos a utilizarse en nuestra red.

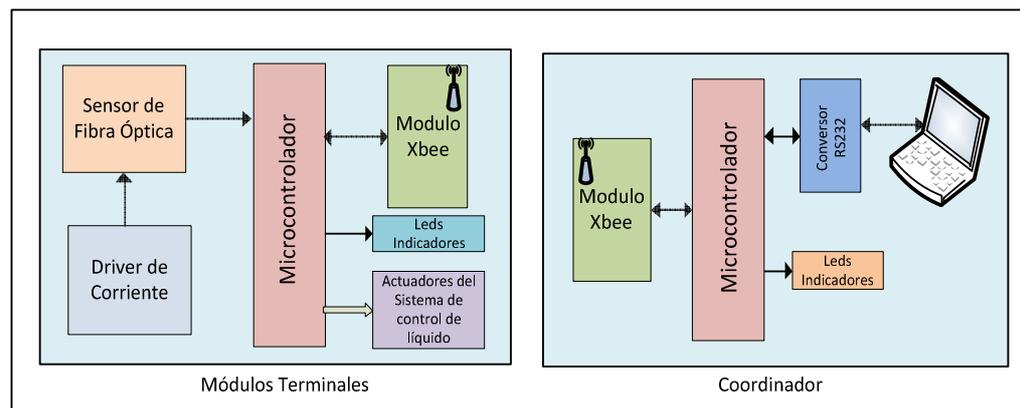


Figura 4.2 Diagrama de Bloques del Sistema

4.3. Topología de la Red Zigbee y elección de los Módulos Zigbee

La red Zigbee planteada para un conjunto de sensores será de tipo estrella, es decir punto a multipunto, donde solo el coordinador de red puede empezar la comunicación, se maneja el modelo master-slave. Se escogió este modelo dado su facilidad de implementación y la manera en que se procesaran los datos, estos son procesados por un micro controlador en el módulo terminal donde se tomaran todas las decisiones acorde a la variable medida.

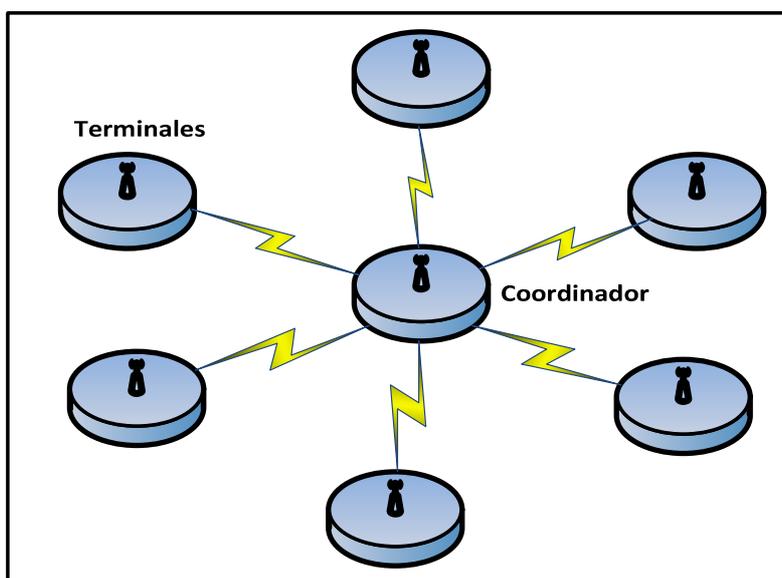


Figura 4.3 Esquema generalizado de la red de sensores.

Se necesitarán un ZED (dispositivo final Zigbee) por cada sensor y un solo ZC (coordinador Zigbee), el cual estará ubicado en el mismo espacio físico de la computadora central donde se visualizarán y almacenarán los datos provenientes de cada sensor de fibra óptica. La figura 4.3 bosqueja un modelo básico de red estrella con seis sensores, uno para cada tanque a monitorear.

Este tipo de red es escalable, se podría adicionar más sensores acorde a las necesidades del usuario final, esto involucra el desarrollo de redes con topologías más complejas. Sin embargo, se requerirá de mejores módulos que necesitan mayores capacidades de memoria para almacenar la información sobre la red.

Para la transmisión de los datos usaremos los módulos XBee de la serie 1, que son módulos de radio frecuencia que trabajan en la banda de los 2.4 GHz.

Para la elección del módulo ZigBee a usar se han tenido que tener en cuenta varios factores, entre ellos el consumo de potencia. Al utilizar los dispositivos finales alimentados con baterías se debe escoger un ZigBee que cumpla las necesidades pero consuma lo menos posible para alargar la vida de las baterías.

En segundo lugar la topología usada para la red, como se ha comentado con anterioridad se usa una conexión en estrella, así no es necesario usar un módulo Pro ni Series 2, abaratando de forma considerable el precio del módulo.

Teniendo en cuenta estos aspectos el módulo XBee elegido es el modelo Series 1 el cual a modo de resumen dispone de las siguientes características.

Modelo Xbee:	Series 1 (XB24-DM) Modulo Zigbee / 802.15.4
Tipo de Antena	Chip
Alcance interiores	30 m
Alcance exteriores	100 m
Potencia de salida	1mW (0 dBm)
Corriente hibernación	< 10 μ A
Frecuencia de Trabajo	2,4 GHz
Consumo Tx	45 mA (3,3V)
Consumo Rx	50 mA (3,3V)

Tabla 4.1 Características de los módulos Xbee Series 1

4.3.1. Descripción de los módulos Xbee

Los módulos Xbee y Xbee Pro, fueron diseñados para soportar el estándar IEEE 802.15.4, operan en la banda ISM a 2.4Ghz y son compatibles pin a pin entre ellos. Proveen una confiable entrega de datos entre los dispositivos, lo que ha permitido que sean aplicados para redes inalámbricas de sensores, de bajo costo y baja potencia.

El módulo Xbee^{****} seleccionado para la realización del proyecto es el modelo Series 1 (como se verá más adelante), en la siguiente figura se puede observar su apariencia física.

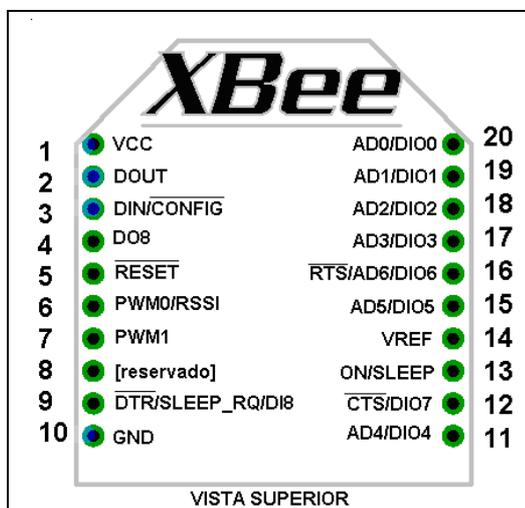


Figura 4.4 Diagrama de pines de los módulos Xbee [13].

En los anexos del presente estudio se encontrará información técnica adicional sobre los módulos Xbee.

4.3.2. Modos de operación de los módulos

Los módulos Xbee, pueden operar en los siguientes 5 modos:

Modo Recibir / Transmitir: Se encuentra en estos modos cuando el módulo recibe algún paquete RF a través de la antena (modo Receive) o cuando se envía información serial al buffer del pin 3 (UART Data in) que luego será transmitida (modo Transmit).

La información transmitida puede ser Directa o Indirecta. En el modo directo la información se envía inmediatamente a la dirección de destino. En el modo Indirecto la información es retenida por el módulo durante un período de tiempo y es enviada sólo cuando la dirección de destino la solicita.

Además es posible enviar información por dos formas diferentes. Unicast y Broadcast.

Por la primera, la comunicación es desde un punto a otro, y es el único modo que permite respuesta de quien recibe el paquete RF, es decir, quien recibe debe enviar un ACK (paquete llamado así, y que indica que recibió el paquete, el usuario no puede verlo, es interno de los módulos) a la dirección de origen. Quien envió el paquete, espera recibir un ACK, en caso de que no le llegue, reenviará el paquete hasta 3 veces o hasta que reciba el ACK.

Después de los 3 intentos se incrementa el registro de fallas ACK en uno.

Para ver el conteo se utiliza el comando EA (ATEA en el Modo de Comandos– ACK Failures), el cual se satura hasta 0xFFFF (65535decimal). Para resetear el registro se debe ingresar ATEA0. En el modo Broadcast la comunicación es entre un nodo y a todos los nodos de la red. En este modo, no hay confirmación por ACK.

Modo de bajo consumo: El modo de Bajo Consumo o modo Sleep, ocurre cuando el módulo entra en un estado de bajo consumo de energía, cuando no está en uso. Para que entre en este estado se debe dar lo siguiente:

- Sleep_RQ (pin 9) debe estar en alto.
- El módulo debe estar sin recibir ni transmitir por el tiempo definido en el parámetro ST (Time before sleep).

El modo de bajo consumo también se puede adicionar diversas opciones para “despertar”, esto se define con comandos adicionales en la configuración del modo bajo consumo. Estas opciones no son de interés para nuestro proyecto, motivo por el cual no se describirán en el presente capítulo. Mas detalles sobre este modo se encontrará en los anexos del proyecto.

Modo de Comando: Este modo permite ingresar comandos AT al módulo Xbee, para configurar, ajustar o modificar parámetros. Permite ajustar parámetros como la dirección propia o la de destino, así como su modo de operación entre otras cosas. Para poder ingresar los comandos AT es necesario utilizar el Hyperterminal de Windows, el programa X-CTU4⁺⁺⁺ o algún micro controlador que maneje UART y tenga los comandos guardados en memoria o los adquiera de alguna otra forma. Para este desarrollo se recomienda el uso del software XCTU por su facilidad de uso.

En la figura 4.5 se observa la sintaxis de un comando AT. Luego de ingresar a este modo, se debe ingresar el comando deseado para ajustar los parámetros del módulo XBee. La lista de comandos de encuentra en la sección de anexos.

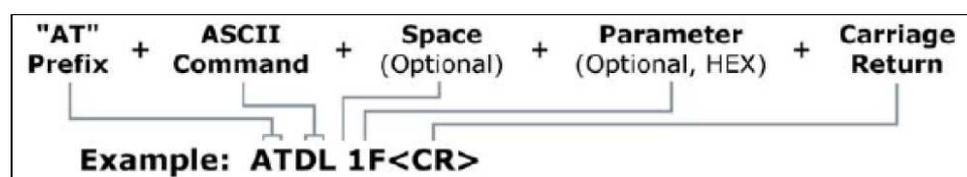


Figura 4.5 Formato de comando AT [13].

⁺⁺⁺X-CTU, es un software desarrollado por los creadores de Xbee, el cual permite realizar operaciones de configuración y pruebas en los módulos Zigbee de manera más natural, fácil y rápida que a través de comandos AT, aunque también permite la configuración vía comandos.

Modo transparente: En este modo todo lo que ingresa por el pin 3 (Data in), es guardado en el buffer de entrada y luego transmitido y todo lo que ingresa como paquete RF, es guardado en el buffer de salida y luego enviado por el pin 2 (Data out). El modo Transparente viene por defecto en los módulos Xbee.

Este modo está destinado principalmente a la comunicación punto a punto, donde no es necesario ningún tipo de control. También se usa para reemplazar alguna conexión serial por cable, ya que es la configuración más sencilla posible y no requiere una mayor configuración.

Modo API: Este modo es más complejo, pero permite el uso de tramas con cabeceras que aseguran la transmisión de los datos, al estilo TCP. Extiende el nivel en el cual la aplicación del cliente, puede interactuar con las capacidades de red del módulo.

Cuando el módulo Xbee se encuentra en este modo, toda la información que entra y sale, es empaquetada en tramas, que definen operaciones y eventos dentro del módulo. Así, una trama de Transmisión de Información (información recibida por el pin 3 o DIN) incluye:

- Trama de información RF transmitida.

- Trama de comandos (equivalente a comandos AT).

Mientras que una trama de recepción de Información incluye:

- Trama de información RF recibida.
- Comando de respuesta.
- Notificaciones de eventos como Reset, Disassociate, etc.

Esta API, provee alternativas para la configuración del módulo y ruteo de la información en la capa de aplicación del cliente. Un cliente puede enviar información al módulo Xbee. Estos datos serán contenidos en una trama cuya cabecera tendrá información útil referente el módulo.



Figura 4.6 Formato tramas API [13].

Esta información además se podrá configurar, esto es, en vez de estar usando el modo de comandos para modificar las direcciones, la API lo realiza automáticamente.

El módulo así enviará paquetes de datos contenidos en tramas a otros módulos de destino, con información a sus respectivas aplicaciones, conteniendo paquetes de estado, así como el origen, RSSI (potencia de la señal de recepción) e información de la carga útil de los paquetes recibidos.

Entre las opciones que permite la API, se tienen:

- Transmitir información a múltiples destinatarios, sin entrar al modo de Comandos.
- Recibir estado de éxito/falla de cada paquete RF transmitido.
- Identificar la dirección de origen de cada paquete recibido.

Entre las posibilidades que permite la API, es la posibilidad de cambiar parámetros a través de comandos AT⁺⁺⁺ enviándolos al módulo de destino. Así, desde un módulo, es posible configurar otro utilizando el modo API. También es posible consultar sobre el estado de algún parámetro en otro módulo. Además se puede consultar sobre el estado del módem, como saber si está asociado a un coordinador, o si el módulo es o no un coordinador.

⁺⁺⁺Una lista de los comandos AT para configuración de los módulos Xbee se encuentra en los anexos del presente trabajo.

Modo Idle: Cuando el módulo no se está en ninguno de los otros modos, se encuentra en éste. Es decir, si no está ni transmitiendo ni recibiendo, ni ahorrando energía ni en el modo de comandos, entonces se dice que se encuentra en un estado al que se le llama IDLE.

4.4. Diseño del hardware del Coordinador

El Módulo Coordinador será el encargado de mantener e iniciar la red Zigbee, de recibir y procesar los datos provenientes de los módulos XBee que hacen de dispositivo final además de poder realizar configuraciones sobre los módulos Xbee para la transmisión de los datos. Los datos obtenidos por los sensores serán procesados por el microcontrolador, y serán transferidos al computador de manera serial para su almacenamiento y visualización.

Para el diseño de nuestro coordinador, tomando en consideración la cantidad de entradas y salidas a utilizar, así como la compleja funcionalidad del controlador de la red (lo que se traduce en gran cantidad de código y procesamiento) hemos elegido el microcontrolador PIC 16F876A. Este microcontrolador posee 8k de memoria flash, suficiente para almacenar el código que necesitamos implementar. Dispone de módulo de transmisión UART necesario para

nuestra comunicación serial con el módulo Xbee, cabe resaltar que se necesitara hacer doble transmisión serial: microcontrolador -Xbee se realizará por hardware (RX y TX), propio del PIC que utilizamos; y, entre el microcontrolador - PC se implementará comunicación serial por software (RB1 y RB2), se deberá realizar una rutina que emulara UART en dos pines diferentes de RX y TX del microcontrolador.

El computador dispondrá de un software captura y ordenamiento de los datos adquiridos, en el presente desarrollo se presentara un diagrama de flujo para la posterior elaboración del código en el lenguaje de programación a convenir.

Para la realización del Hardware coordinador se han tenido que tener en cuenta los siguientes aspectos:

4.4.1. Alimentación del Coordinador

La alimentación del Hardware coordinador debe ser constante debido a la importancia del coordinador Zigbee en la red. El micro controlador16F876A tiene un rango de tensión de alimentación de 2 a 5.5V, por lo cual la alimentación que utilizaremos será de 5 V, para ello utilizaremos un cargador DC de 5V con conector USB. Para ver fácilmente si la placa recibe tensión de nuestra fuente se

ha implementado un LED, el cual permitirá ver que la placa está recibiendo alimentación.

Como se puede ver en la figura 4.7 se ha dispuesto un condensador C6 de 100nF conectado desde Vcc hasta Gnd. Este condensador tiene la función de proteger al micro controlador de posibles ruidos e interferencias electromagnéticas que podrían ocasionar el mal funcionamiento del micro controlador.

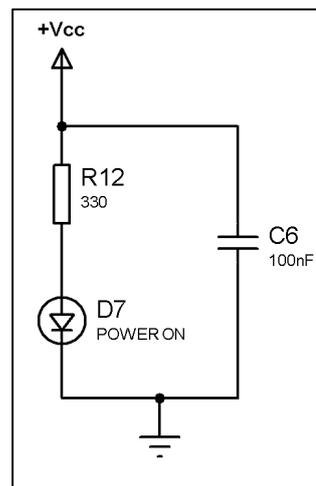


Figura 4.7 LED Indicador de Alimentación

Los cálculos de la resistencia R12 se observan a continuación.

$$R12 = \frac{+V_{cc}}{I_{led}} = \frac{5V}{15mA} = 333.33 \Omega \approx 330 \Omega \quad (1)$$

4.4.2. Alimentación del Xbee

La alimentación del módulo XBee tiene un rango de 2,8V a 3,4V. Se debe tener en cuenta que los módulos XBee son muy sensibles a la fluctuación de la tensión de alimentación, es por ello que debe utilizarse un estabilizador de tensión para asegurarse de no superar los 3,4V bajo ningún concepto. De lo contrario el módulo XBee quedaría completamente inservible [14].

En el diseño se ha utilizado el regulador de tensión LM317 para poder ajustar la tensión de alimentación deseada como se puede observar en la siguiente figura.

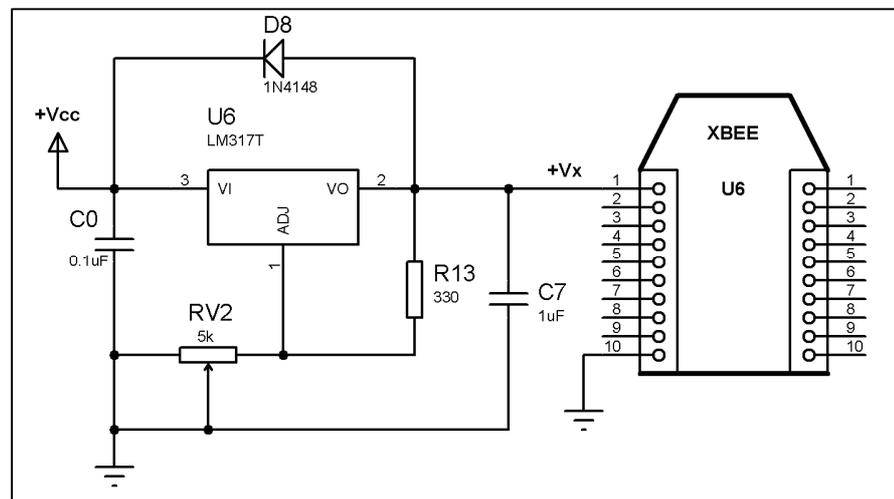


Figura 4.8 Alimentación del módulo Xbee

Cuando se usa el regulador de tensión ajustable LM317 la entrada de tensión tiene que ser de un valor entre 1,2 y 1,25 V por encima de la tensión de salida deseada. Esto es debido a que la tensión en la entrada (ADJ) se compara internamente con una tensión de referencia (V_{ref}) que tiene ese valor. La tensión de referencia siempre existe en los extremos de la resistencia R13. Esta junto a la resistencia RV2 determinan la corriente que va a pasar por el terminal ADJ.

El voltaje de salida viene determinado por la siguiente ecuación:

$$V_x = V_{ref} \left[1 + \frac{RV2}{R13} \right] + (i_{adj})(RV2) \quad (2)$$

Una de las precauciones que se deben tener es fijar el valor de la R13 para proteger al XBee del modulo LM317, esto es debido a que cuando el XBee entre en modo "sleep" el limite mínimo de carga del LM317 es de 10mA, lo cual crearía un aumento de la tensión de alimentación y el XBee quedaría dañado de forma permanente.

Como se sabe que la tensión de alimentación del XBee es 3,3V entonces:

$$I_{in} = \frac{V_{XBEE}}{R2} \rightarrow R13 = \frac{V_{XBEE}}{I_{in\ min}} = \frac{3.3\ V}{10\ mA} = 330\ \Omega \quad (3)$$

Sabiendo el valor de R13 y reemplazando en (1) podemos determinar el valor de RV1:

$$RV1 = \frac{R2 (V_{out} - V_{ref})}{V_{ref}} = \frac{330\Omega (3.3 V - 1.25 V)}{1.25 V} = 541.2 \Omega \quad (4)$$

Para disponer de una mayor precisión y libertad en el ajuste de la tensión de alimentación del XBee, se opta por colocar un potenciómetro de 5k Ω .

Se pueden adicionar capacitores para una mejor estabilidad de la salida del regulador, esto también implica la adición de diodos de protección para el integrado LM317 para prevenir descargas de estos capacitores a través de puntos de baja corriente en el regulador pudiendo ocasionar daños a este.

4.4.3. Conexión entre el microcontrolador y el Xbee

Para el conexionado con el PIC, es necesario un divisor de voltaje en el pin TX del microcontrolador, ya que este pone en 5V al pin en estado alto, lo que quemaría al módulo Xbee, ya que es muy sensible.

Las resistencias utilizadas fueron calculadas en base a la corriente que soporta el módulo y la corriente que es capaz de entregar el

microcontrolador, considerando además si es una entrada para el módulo o una salida del módulo [15].

Para una salida: Tomando en cuenta que la corriente de salida del módulo Xbee es $I_{OUT} = 2\text{mA}$,

$$\frac{(5V-3.3V)}{R5} < 2\text{ mA} \quad (5)$$

De donde 5V es el voltaje del PIC, 3.3V es el voltaje del módulo y R5 la resistencia a calcular.

Despejando R se tiene que $R5 > 850\Omega$. Se escogió una resistencia de 10k entre la línea de recepción del PIC y transmisión del Xbee.

Para una entrada: Tomando en cuenta que la corriente de entrada del módulo es $I_{IN} = 0.025\mu\text{A}$ y la corriente que entrega el pin del microcontrolador es 20mA se calculó el valor de las resistencias utilizadas. Teniendo un voltaje de 5 V (voltaje del microcontrolador) se puede calcular RT para los dos casos:

$$RT = \frac{5V}{20\text{ mA}} = 250\ \Omega \quad ; \text{ y } (6)$$

$$RT = \frac{5V}{0.025\ \mu\text{A}} = 200\ \text{M}\Omega \quad (7)$$

Donde R_T es la resistencia equivalente de las dos resistencias en serie que se utilizan en el módulo. Por lo tanto se debe cumplir:

$$250\Omega < R_T < 200M\Omega \quad (8)$$

Se escogió resistencias estándar $R_{17} = 22k\Omega$ con lo que se obtuvo $R_{16} = 15k\Omega$. De aquí tenemos que el voltaje en la entrada VDI del Xbee es:

$$VDI = 5V \frac{22 K\Omega}{22 k\Omega + 15 k\Omega} = 2.98 V \quad (9)$$

Que se encuentra dentro del rango de trabajo de 2.8 a 3.3V. La figura 4.9 describe la conexión entre el microcontrolador y el módulo Xbee.

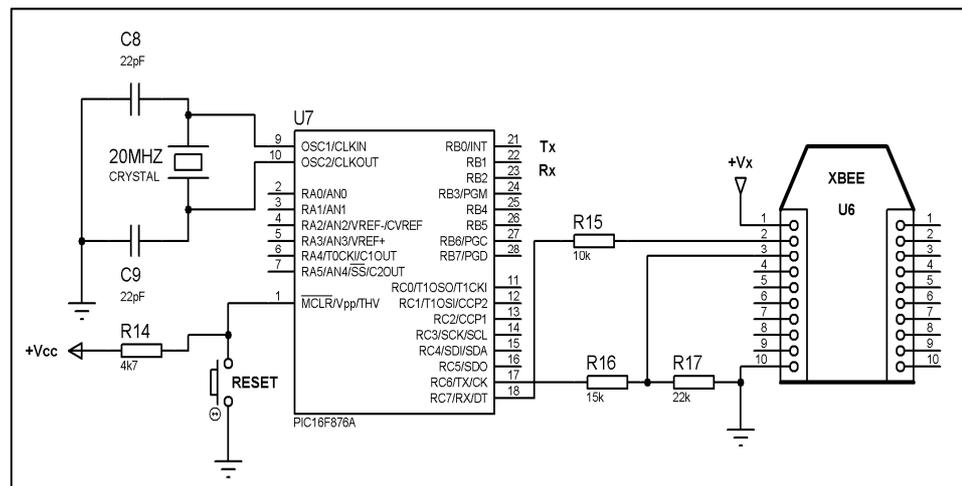


Figura 4.9 Conexión entre PIC y Xbee

4.4.4. Conexión entre el microcontrolador y el computador.

Para la comunicación serial se utiliza un conversor MAX232 para lograr la comunicación entre el computador personal y el microcontrolador. Este dispositivo transforma las señales digitales de voltajes TTL a valores aceptados por la interfaz serial del computador.

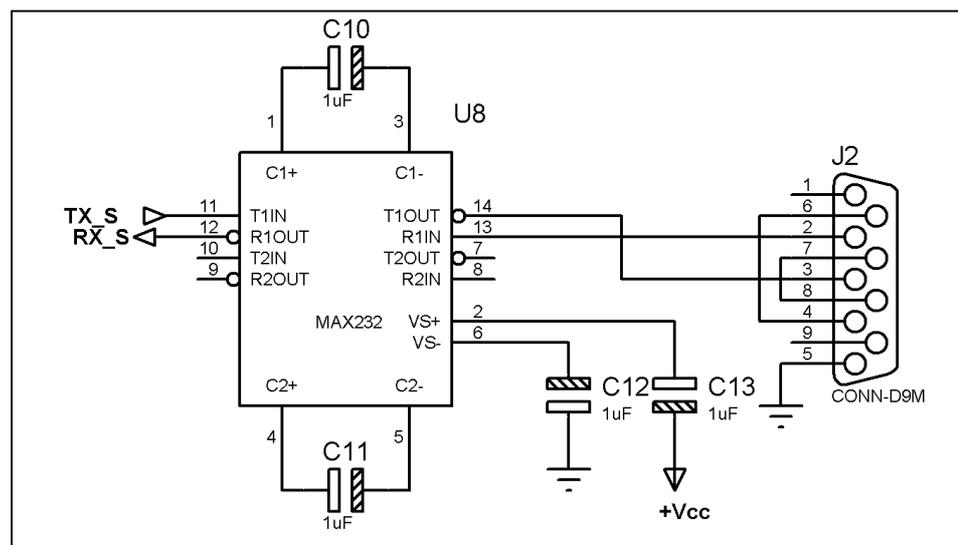


Figura 4.10 Conexión entre PIC y PC

Los pines de TX_S y RX_S para esta conexión estarán configurados por software, esto es, dentro del código creado para el microcontrolador se deberá desarrollar una subrutina que

implemente comunicación serial a través de los pines RB1 (TX_S) y RB2 (RX_S) del microcontrolador.

Los capacitores C10, C11, C12, C13 son colocados por recomendación del fabricante del integrado para su óptimo funcionamiento.

4.5. Diseño del hardware de los módulos terminales

El modulo terminal será el encargado de la recolección de datos del nivel de líquido provenientes del sensor de fibra óptica descrito en el capítulo 3. Este sensor a su vez enviara la señal a un microcontrolador par la conversión analógica a digital, para posteriormente enviar los datos al coordinador a través de la red Zigbee.

El microcontrolador cumple las funciones de programar al módulo Zigbee y de ejecutar las acciones necesarias para los diversos escenarios presentes en relación a la variable de nivel que estamos midiendo. A su vez se encargara de recibir la señal analógica proveniente de los sensores de nivel, convertirlas a señal digital y empaquetarlas de manera correcta para su posterior envío al módulo Zigbee y transmisión al coordinador de la red.

De la misma manera que en el coordinador de red, se necesita tomar ciertas consideraciones en el modelamiento del hardware del módulo terminal.

4.5.1. Alimentación del módulo terminal

La alimentación de los dispositivos finales es más delicada que la alimentación del Hardware coordinador. En el caso del Hardware coordinador, la alimentación procede directamente de una fuente de alimentación constante de 5V y no se tienen limitaciones de energía.

En el caso de los dispositivos inalámbricos no se dispone de dicha facilidad debido a que son dispositivos inalámbricos que no pueden recibir energía de otros dispositivos.

Se utilizan baterías de 9V. Como se ha comentado con anterioridad el microcontrolador funciona a 5V y el módulo XBee a 3,3V por lo cual deberán utilizarse circuitos para adaptar las tensiones.

4.5.2. Alimentación del microcontrolador

Para adaptar la tensión de las baterías a la tensión de 5V se utiliza un regulador de tensión LM7805. Como se alimentan los circuitos con una tensión continua pura no es necesario colocar electrónica para estabilizar ni rectificar la tensión de entrada. En la siguiente figura se puede observar el circuito de alimentación de 5V.

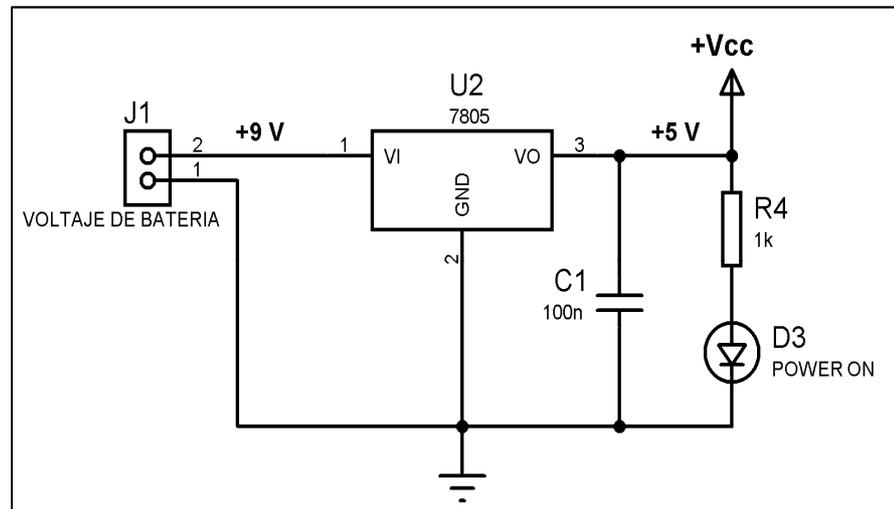


Figura 4.11 Alimentación del microcontrolador

Se adicionó un capacitor de 100 nF para regular los posibles picos de voltaje que se puedan generar en la salida del integrado LM7805. Se incluye un LED indicador de actividad eléctrica a la salida del regulador, se realizará un consumo mínimo de corriente debido a la alta resistencia colocada en serie al mismo.

4.5.3. Alimentación del Xbee

El circuito de alimentación del módulo XBee es el mismo que se utilizará en el hardware coordinador. Se pueden consultar las características y los cálculos realizados en el apartado 4.3.2 Alimentación Xbee y las conexiones eléctricas en la figura 4.8 del presente estudio.

4.5.4. Conexión entre microcontrolador y Xbee

El circuito de conexión entre el microcontrolador y el XBee es el mismo que se ha utilizado en el hardware coordinador. Se pueden consultar las características y los cálculos realizados en el apartado 4.3.3 conexión entre el microcontrolador y el XBee del presente desarrollo.

4.5.5. Conexión entre sensor y microcontrolador

Necesitamos convertir la señal analógica proveniente del sensor de fibra a un formato digital, para ello haremos uso del módulo de conversión analógico-digital que viene integrado al microcontrolador del dispositivo terminal.

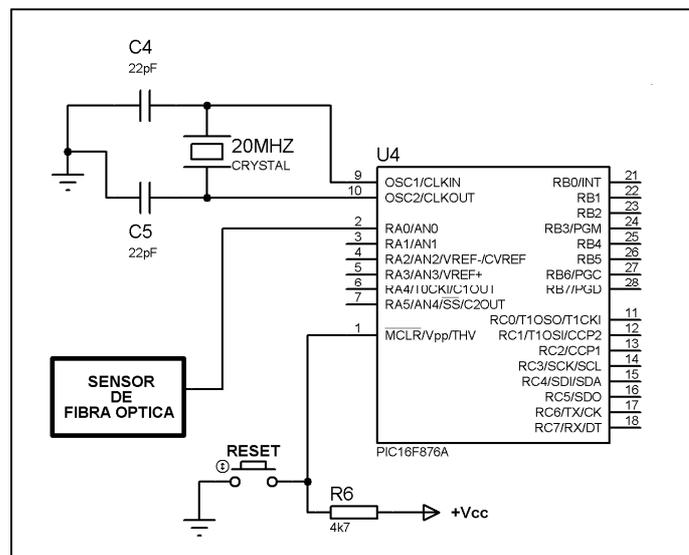


Figura 4.12 Conexión sensor - microcontrolador

La figura 4.12 describe la conexión entre el sensor de fibra óptica diseñado en el capítulo 3 y el microcontrolador. Utilizaremos el canal analógico 0 (RA0/AN0) configurado en el pin 2 del PIC16F876A el cual será sesteado como entrada analógica para nuestro caso.

El ADC del microcontrolador tiene una resolución de 10 bits, dando lugar a 1024 valores binarios que representan la tensión en la entrada analógica del microcontrolador, valor suficiente para nuestro propósito.

Se necesita voltajes de referencia (V_{ref+} y V_{ref-}) que determinan los valores de máxima y mínima escala respectivamente, para nuestro análisis se ha establecido en $V_{ref+} = 5V$ y $V_{ref-} = 0V$, correspondientes a los valores de alimentación del micro, estos valores se seleccionan internamente en la configuración de los registros del integrado.

Cabe mencionar que los niveles de tensión del sensor de fibra óptica han sido establecidos para que no sobrepasen los 5Vdc o sean menos de 0Vdc, que se permite en la entrada de los canales analógicos del microcontrolador para evitar daños del integrado.

Una vez digitalizado el valor presente en la entrada analógica se empaquetara esta información acorde al formato establecido y se la enviara en tramas al Xbee para su transmisión al coordinador.

4.6. Diseño del software del módulo coordinador y módulos terminales

El software a desarrollar debe cumplir con los siguientes objetivos:

El software principal del módulo coordinador residirá en el microcontrolador y a través del puerto serial por defecto manejará la

configuración del Xbee coordinador para establecer comunicación con el módulo terminal. El circuito del coordinador se conecta al PC a través del puerto serial virtual configurado en código dentro del microcontrolador.

La aplicación en el PC permitirá al usuario visualizar ordenadamente los datos obtenidos de los sensores en los módulos terminales, plenamente identificados dentro de la red. Además proveerá de almacenamiento de los datos obtenidos.

El módulo coordinador solicitará (inalámbricamente) datos al módulo terminal desplegando el nivel de líquido por pantalla. Los datos adquiridos serán en tiempo real, indicando las equivalencias de los valores capturados (por ejemplo: Terminal 1 – 50 cm para llegar al límite permitido). Incluiremos indicadores visuales en los terminales y el coordinador que se activen cuando la cantidad de líquido es la adecuada, basándonos en los datos del sensor.

El terminal deberá estar gobernado principalmente por el microcontrolador, cuya tarea principal es la de procesar las ordenes enviadas por el coordinador y realizar la conversión analógico-digital de la señal proveniente del sensor de fibra.

Para la comunicación entre los Xbee se necesita especificar el origen/destino de los datos, es decir identificando de que sensor dentro de la red se están tomando los datos y hacia cual sensor necesita comunicarse el coordinador en un momento específico.

4.6.1. Configuración de los Xbee

Los Xbee soportan un modo de transferencia de tramas de datos, el modo API, de gran utilidad cuando la comunicación es punto a multipunto ya que se pueden realizar consultas específicas a cada módulo logrando identificar el origen de los datos; además de poder realizar configuraciones remotas sobre los mismos Xbee, por tanto este modo se adoptara para la transferencia de datos entre Xbee del coordinador y Xbee de los terminales.

Todos los módulos Xbee previamente serán configurados para poder formar la red. Para que se pueda establecer comunicación entre los módulos, terminales y coordinador, deberán tener configurado el mismo PAN ID, esto establece la red sobre la cual estarán los módulos; y operar sobre el mismo Canal de comunicaciones.

Utilizaremos direcciones de 16 bits en todos los Xbee, esto se selecciona automáticamente colocando una dirección menor a 0xFFFFE en cada Xbee. El parámetro MY en los Xbee identifica la dirección de red propia de cada módulo, mientras el par de bytes DH: DL indica la dirección de destino, como se trabajara con direccionamiento de 16 bits implica que DH=0x0000 en todos los elementos de la red.

Los parámetros a configurar de manera general son PANID: 0X3332; Canal =CH 0X10; Tasa de transferencia de datos seriales = 9600bps. Todos estos parámetros y muchos más se pueden configurar de una manera sencilla mediante el software X-CTU.

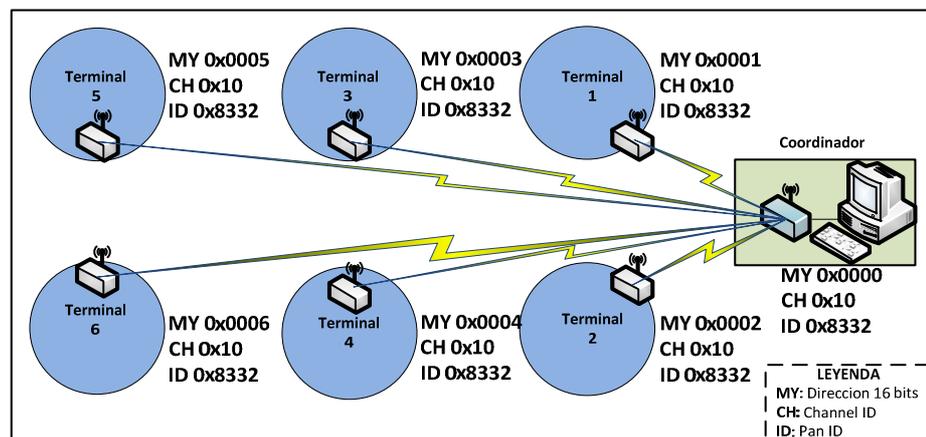


Figura 4.13 Diagrama detallado de Red

4.6.2. Protocolo de Comunicación

Para la red, considerando que la comunicación será punto a multipunto, utilizaremos los módulos Xbee en el modo API. Este modo extiende el nivel en el cual la aplicación del cliente, puede interactuar con las capacidades de red del módulo. Por tanto necesitamos establecer un protocolo de comunicación entre los dispositivos Xbee dentro de nuestra red.

Para la comunicación entre los dispositivos del prototipo se estableció un protocolo de comunicación, el cual permitirá interpretar los datos enviados y recibidos por cada módulo respectivamente. El protocolo consta de 6 bytes como se muestra en la Figura 4.14.

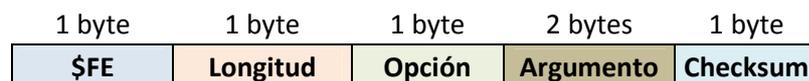


Figura 4.14 Estructura general del Protocolo

Para el prototipo el control de errores se realiza mediante software, esto es comparando el checksum recibido y el checksum calculado del protocolo de comunicación a utilizarse.

La comunicación entre el coordinador y el terminal se implementa mediante un ciclo de envío y recepción. El coordinador es el único que puede iniciar la comunicación mediante el envío de la trama. El esclavo ejecuta una acción solicitada por el coordinador y emite una respuesta con otra trama distinta.

A continuación se describirá los campos para cada trama:

Trama Coordinador: La trama de información que va del coordinador al módulo terminal está formada por una cadena de 6 bytes. Esta trama es armada por el microcontrolador del coordinador.

El primer byte indica el principio de la cadena, el segundo la longitud de la trama, los 3 bytes siguientes se utilizan para la información y el último indica el final de la trama. A continuación se describe cada byte utilizado en la trama:

\$FE	Byte de inicio de trama
Longitud	Cantidad de bytes totales de la trama.
Opción	VMT=1 Solicita al módulo terminal el nivel de liquido actual.
Argumento	Conjunto de 2 bytes que corresponden a la dirección del módulo terminal con el cual el coordinador se desea comunicar
Checksum	Byte de verificación de errores.

Tabla 4.2 Descripción de los campos de la Trama coordinador-terminal

Trama módulo terminal: El dispositivo que se encarga de generar la información a enviarse al coordinador es el microcontrolador, la trama de información utilizada consta de 6 bytes, al igual que la trama de PC a módulo. A continuación se describe cada byte utilizado en la trama:

\$FE	Byte de inicio de trama
Longitud	Cantidad de bytes totales de la trama
Opción	Nmax = 1 Indica al coordinador cuando el nivel del tanque es el máximo permitido.
Argumento	Conjunto de 2 bytes para transmitir la información de la lectura del modulo terminal.
Checksum	Byte de verificación de errores.

Tabla 4.3 Descripción de los campos de la Trama terminal-coordinador

A continuación se describirá los diagramas de flujo de los microcontroladores y los las subrutinas respectivas.

4.6.3. Diagrama de flujo del Coordinador.

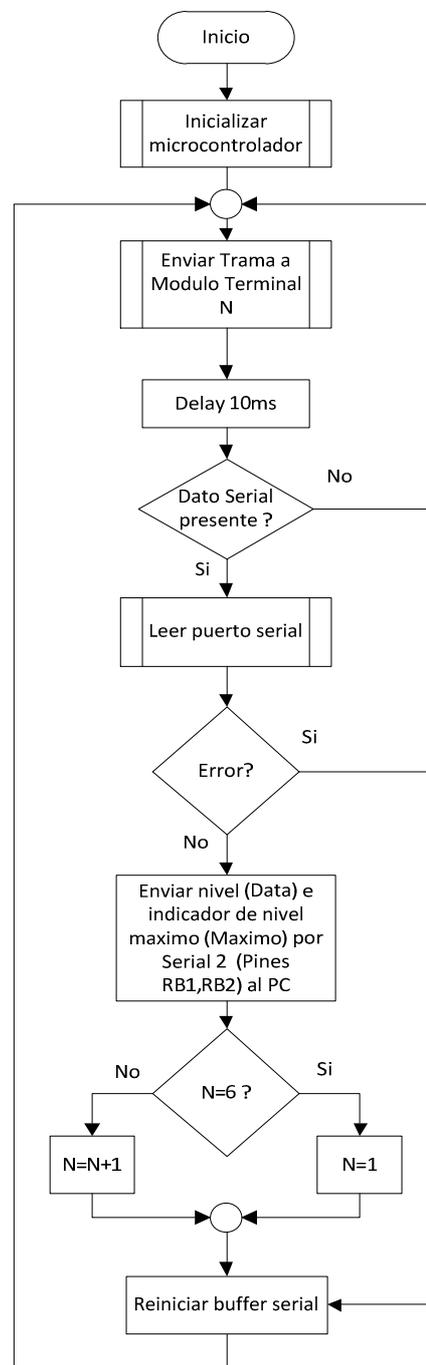


Figura 4.15 Rutina Principal del Coordinador

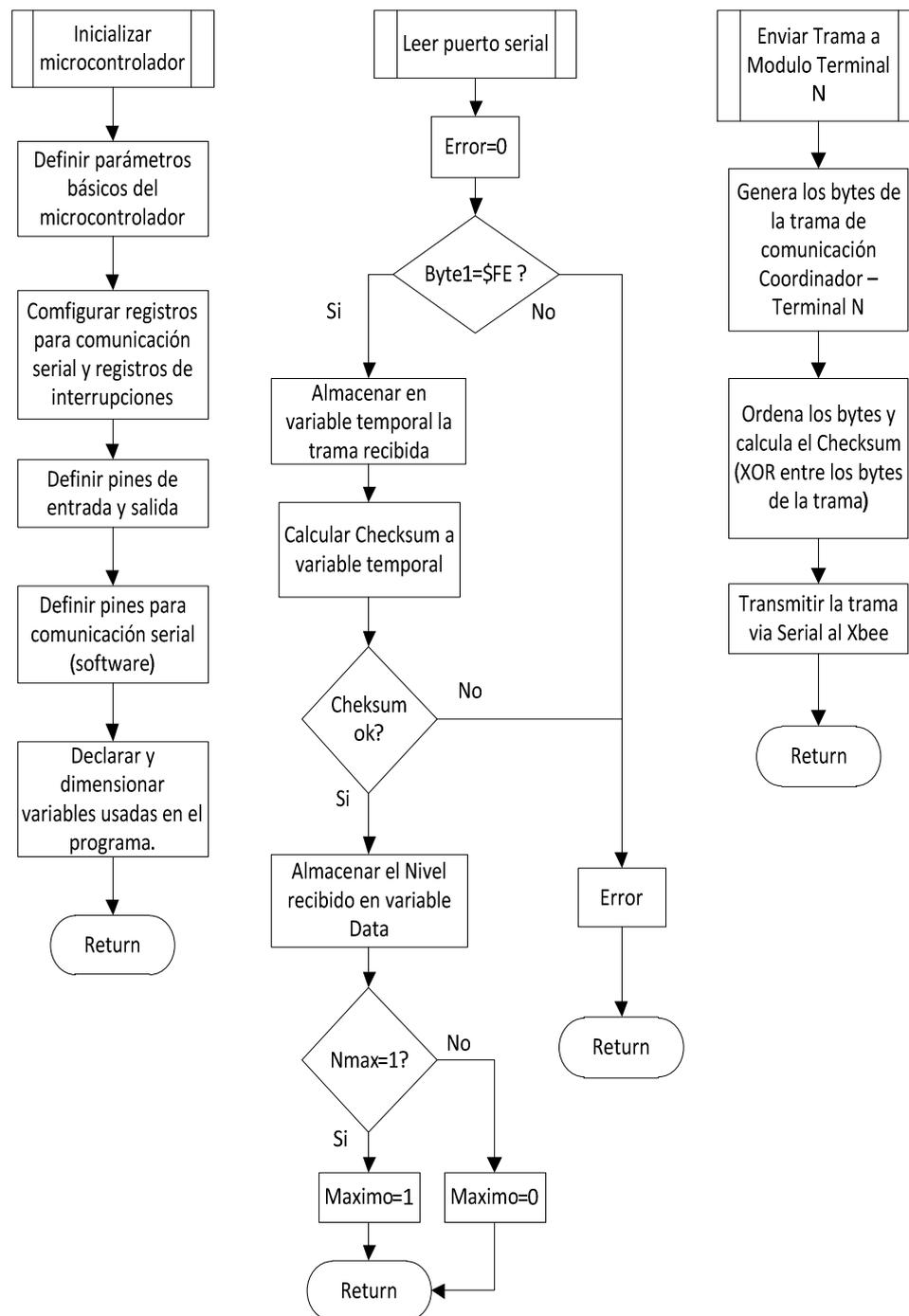


Figura 4.16 Subrutinas del Coordinador: Inicializar microcontrolador, Leer puerto Serial y Enviar trama al módulo terminal N.

Para la presentación de los niveles y el almacenamiento de los mismos se plantea el siguiente diagrama de flujo, el cual será ejecutado por el computador principal.

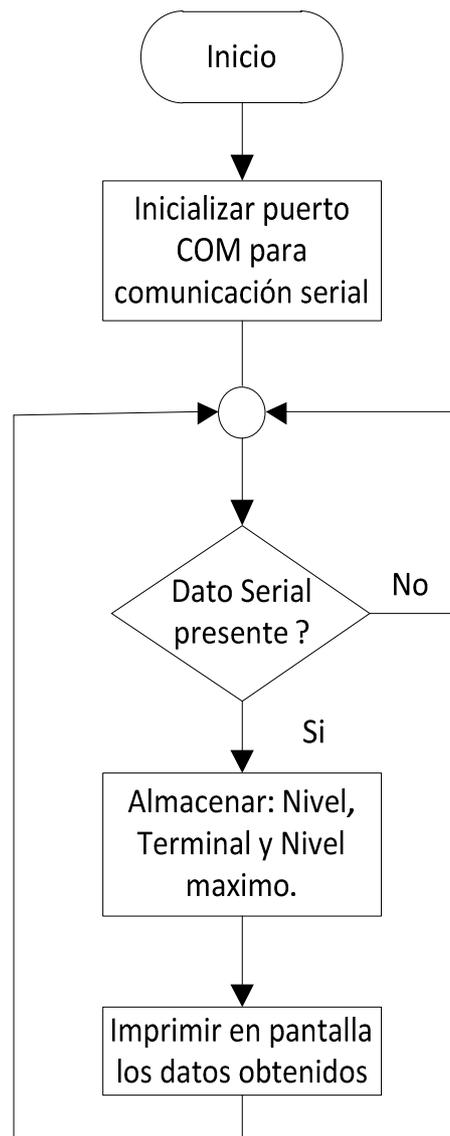


Figura 4.17 Rutina principal del computador central.

4.6.4. Diagrama de flujo de los módulos terminales.

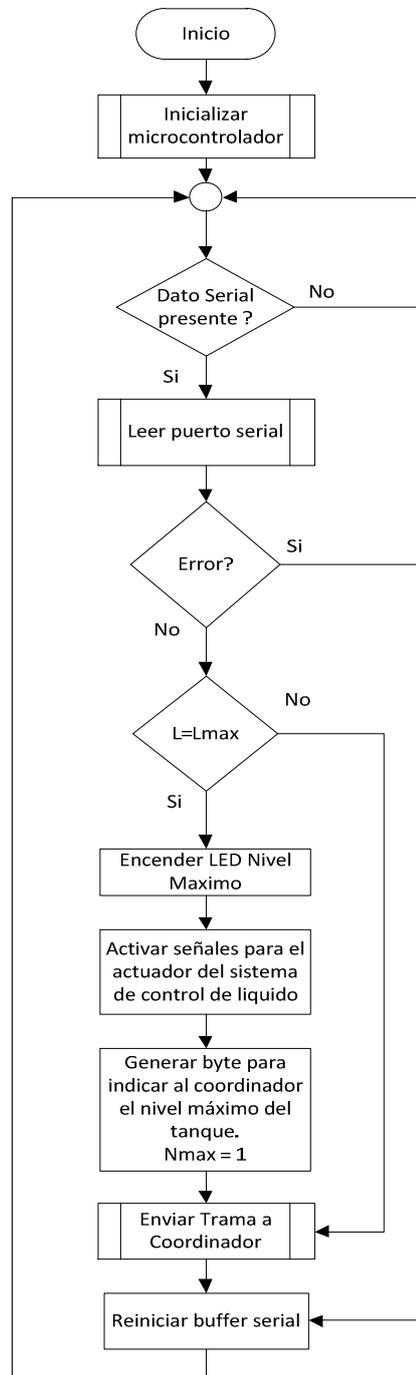


Figura 4.18 Rutina principal de los dispositivos terminales

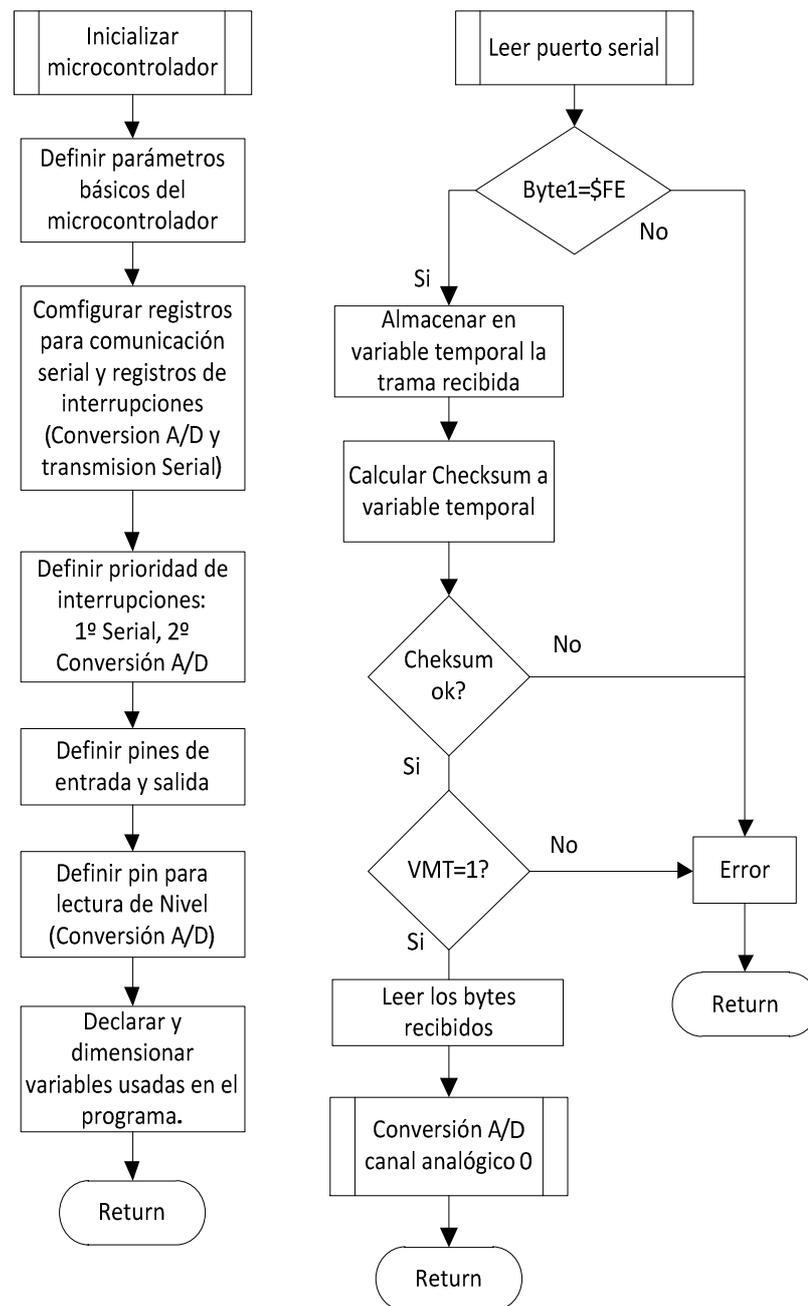


Figura 4.19 Subrutinas del dispositivo terminal: Inicializar microcontrolador y Leer puerto Serial.

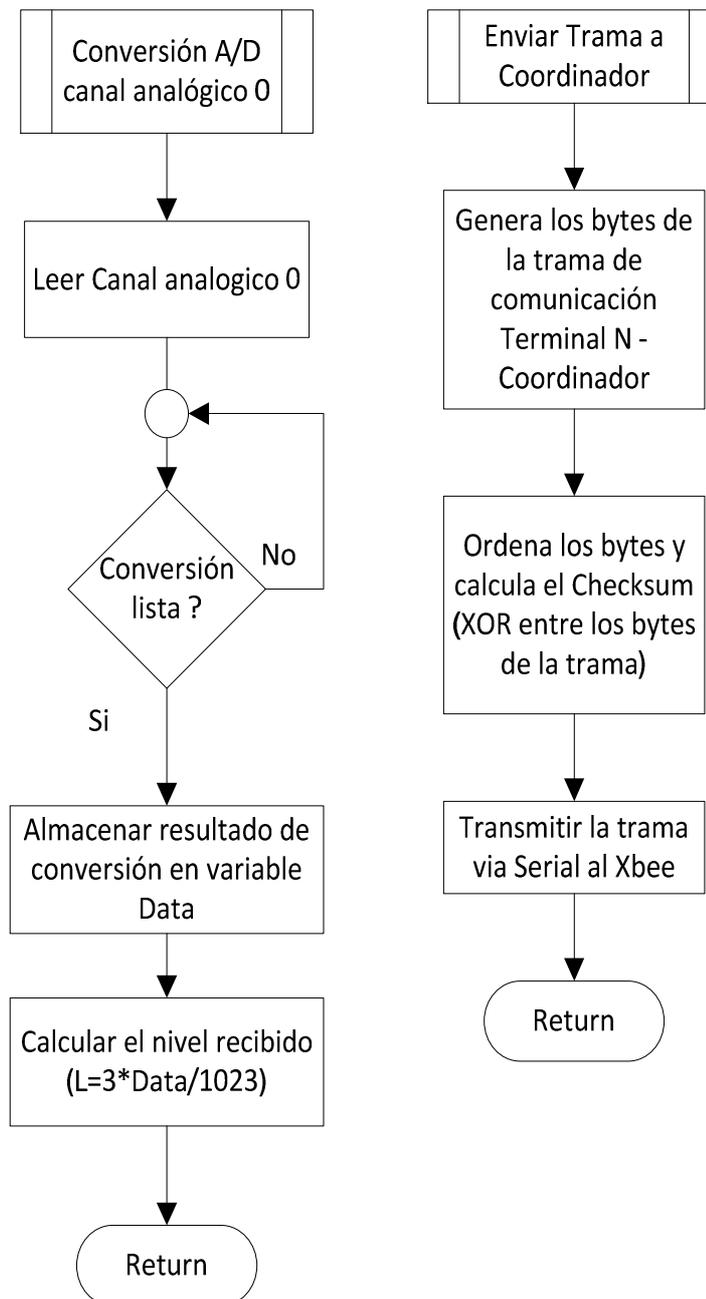


Figura 4.20 Subrutinas del dispositivo terminal: Conversión A/D y Enviar trama a coordinador.

CAPÍTULO 5

5. SIMULACIONES DEL PROYECTO.

Los procesos descritos en los capítulos anteriores deben demostrarse con la práctica y con la implementación del sistema, pero este análisis será interpretado en trabajos futuros, por ahora podemos realizar una aproximación con simulaciones en programas confiables como Matlab y LTSpice, así podemos apreciar las señales con un determinado margen de error.

5.1. Análisis y simulación del transmisor de luz.

Ya hemos descrito la obtención de los valores que permiten el funcionamiento del diodo que transmite la luz, estos valores fueron determinados teniendo como prioridad la polarización del transistor que funciona en el circuito, sin embargo en el ambiente de simulación encontramos características de funcionamiento ligeramente diferentes.

En nuestro análisis regulamos la corriente que enciende al diodo variando la perilla de un potenciómetro que se encuentra en el emisor, al simular el circuito se toman en cuenta propiedades internas de elementos como el transistor que varían los niveles de voltaje y corriente de modo que la potencia del diodo se ve disminuida al insertar elementos resistivos en el emisor, esta apreciación la podemos observar en la siguiente figura.

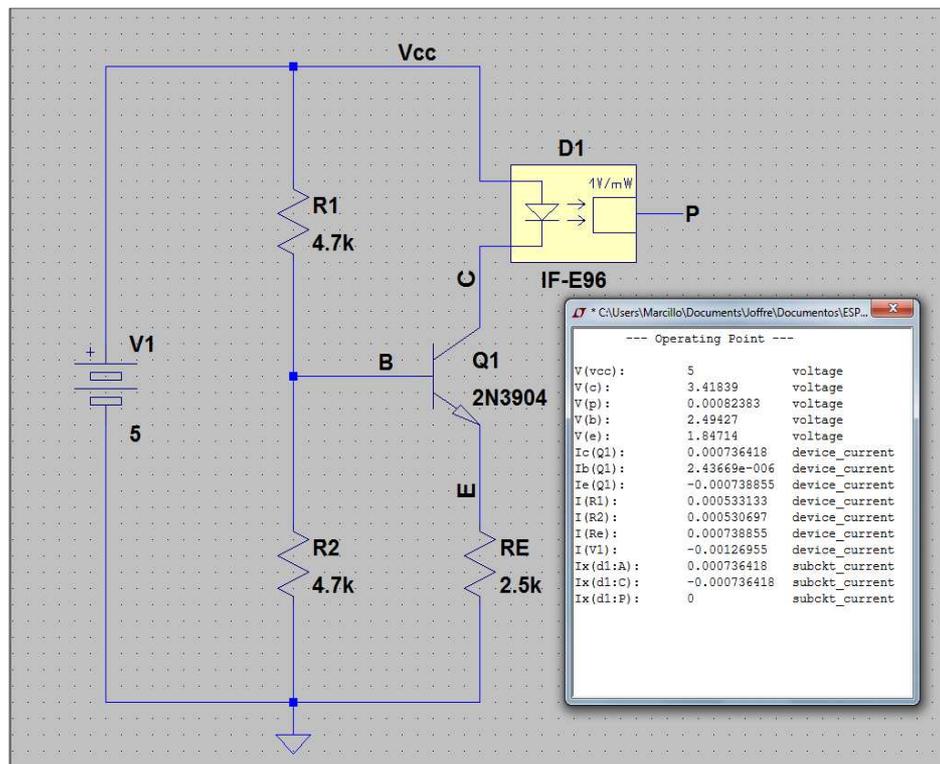


Figura 5.1 Arreglo para la menor potencia emitida por el LED.

Para la simulación del circuito hemos utilizado el modelo de un LED común dentro del LTSpice. En base a la corriente del LED $I_c = 0.736\text{mA}$ para este valor de $R_E = 2.5\text{K}\Omega$, podremos estimar que el diodo estará ligeramente encendido, cabe destacar que el voltaje de polarización del LED se mantiene pero la potencia se ve disminuida por la resistencia en el emisor que reduce la corriente que circula por este ramal a 0.736mA . Otros valores a rescatar son el voltaje colector-emisor $V_{ce} = 1.57\text{V}$, el voltaje base emisor $V_{be} = 0.65\text{V}$, indicadores de que el transistor se encuentra operando en zona lineal.

Al disminuir el valor de la resistencia presente en el emisor incrementamos la corriente de este ramal y dado que el voltaje que alimenta el circuito es bajo, la corriente que polariza al LED no excede las características de funcionamiento del mismo, logrando incrementar la potencia y mejorando así las condiciones del circuito.

En la figura 5.2 se muestran los valores del circuito óptimo que produce la máxima potencia soportada por el diodo, es importante ver que el simulador nos muestra un diodo con más circulación de corriente ya que está trabajando con valores de potencia más altos.

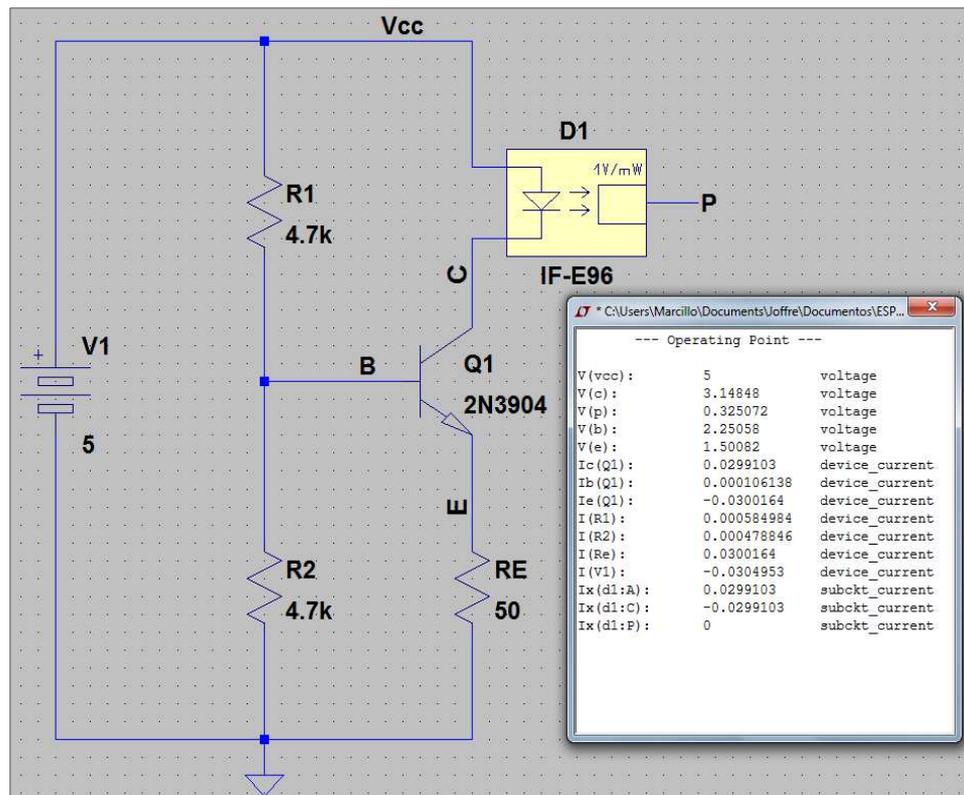


Figura 5.2 Arreglo para la mayor potencia emitida por el LED.

Al regular el potenciómetro en 50 ohmios como valor mínimo se obtiene una potencia aproximada de 55mW lo que nos garantiza que el diodo no se pueda quemar al trabajar a potencias menores a la máxima soportada. Las corrientes y voltajes del circuito que se muestran en la figura permiten que el transistor funcione en zona lineal.

Del circuito transmisor nos interesan dos aspectos, que funcione correctamente y que la potencia de polarización del diodo sea la máxima. La figura 5.3 muestra la relación entre la potencia de salida del

diodo emisor de luz y la resistencia de emisor que regula la intensidad del mismo.

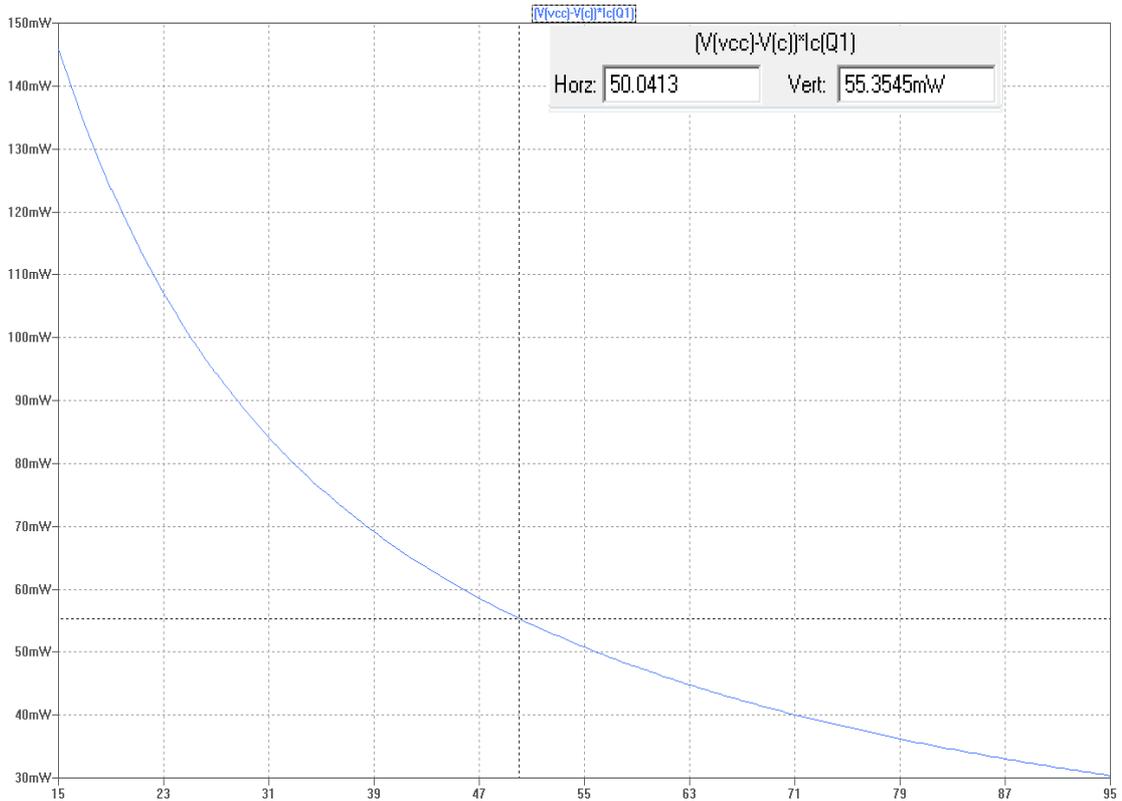


Figura 5.3 Potencia Eléctrica vs R_e

Como se puede apreciar, para una $R_e \approx 50 \Omega$, obtenemos la máxima excursión de potencia del diodo emisor de luz. Este valor de resistencia del emisor a su vez controla la cantidad de corriente que circula por el transistor y por el LED, $I_{CQ1} \approx 30 \text{mA}$, que es menor al valor máximo soportado por el diodo, $I_{D1\text{max}} = 35 \text{mA}$.

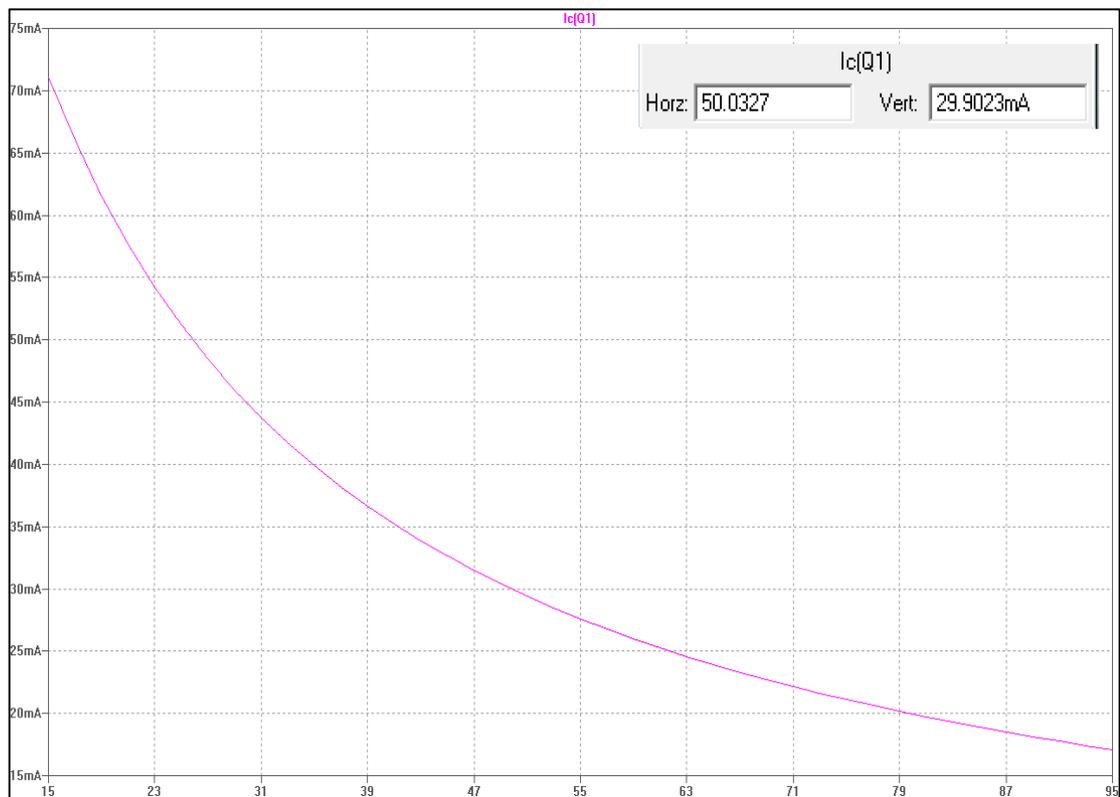


Figura 5.4 Corriente de Diodo vs Re.

La figura 5.5 representa la gráfica de Potencia Óptica (V_p) de salida del diodo acoplado a la fibra óptica en función de la resistencia de emisor. El valor de V_p fue dividido para mil ya que la relación de salida del elemento que nos da la potencia óptica en el circuito es $1V \cong 1mW$, con la división logramos obtener una relación 1:1 de modo que $1V \cong 1W$.

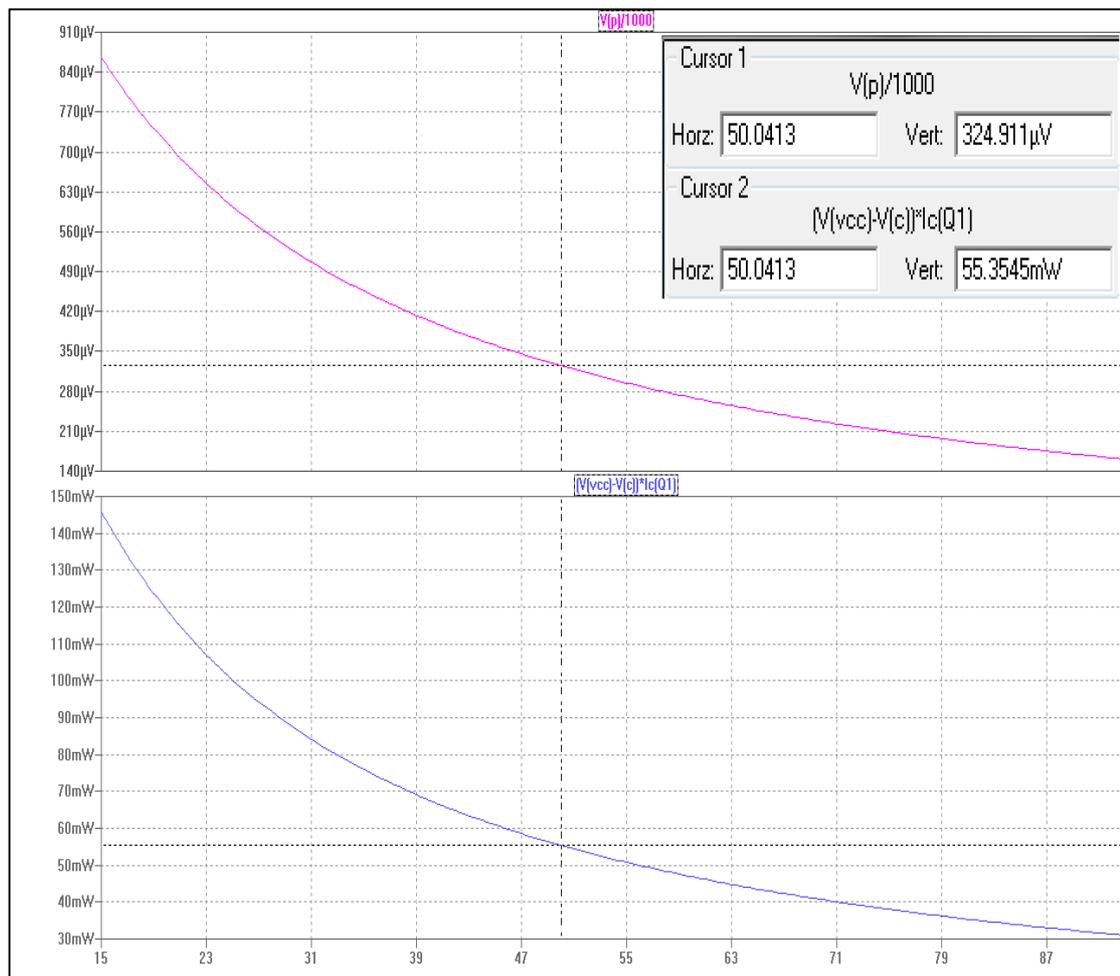


Figura 5.5 Potencia Óptica de salida y Potencia Eléctrica vs R_e .

Como se puede apreciar, los rangos de potencia óptica y eléctrica se encuentran dentro de los niveles normales de funcionamiento del diodo.

Para nuestro punto de operación obtenemos una potencia óptica de alrededor de $P_{\text{opt}} \approx 325 \mu\text{W}$, equivalente a $P_{\text{opt}} = -4.88 \text{dBm}$.

5.2. Simulación del entorno de transmisión del pulso de luz.

La simulación del comportamiento de la fibra corresponde a un análisis matemático que involucra integrales como ya lo hemos visto en capítulos anteriores. Este análisis es posible usando el entorno de MATLAB, el código que produce el análisis que mostraremos a continuación se encuentra en la parte de anexos.

La potencia que polariza al LED se transforma en potencia óptica que luego es transmitida a la fibra casi sin pérdidas por los dispositivos de acople entre la fibra y el diodo LED. Hemos determinado que la eficiencia de acople en condiciones normales puede ser de hasta el 20% para el material con el cual esta materializado el diodo.

La luz emitida viaja por la fibra perdiendo una mínima cantidad de potencia por ser un tramo pequeño y por las bondades de la fibra óptica de plástico. Al llegar al final de la fibra la luz emitida abandona la misma, atraviesa una lente que amplifica la distancia que recorre la luz colimando los rayos hacia el espejo y regresan para incidir en la fibra paralela a la emisora *****.

***** Las ecuaciones y el análisis matemático se detallan en el capítulo 2.

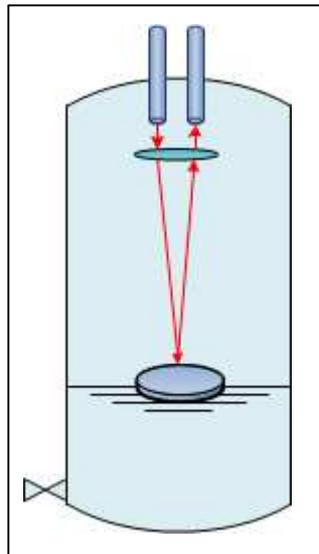


Figura 5.6 Trayectoria de la luz en el sistema.

Cuando la luz incide en la fibra nuevamente viaja hasta el otro extremo de la fibra y finalmente incide en un diodo receptor de luz que transforma la potencia óptica obtenida en potencia eléctrica y esta conectado a un circuito sencillo que permite la conversión de corriente en voltaje y la amplificación de este voltaje por medio de un amplificador donde un potenciómetro regula la ganancia.

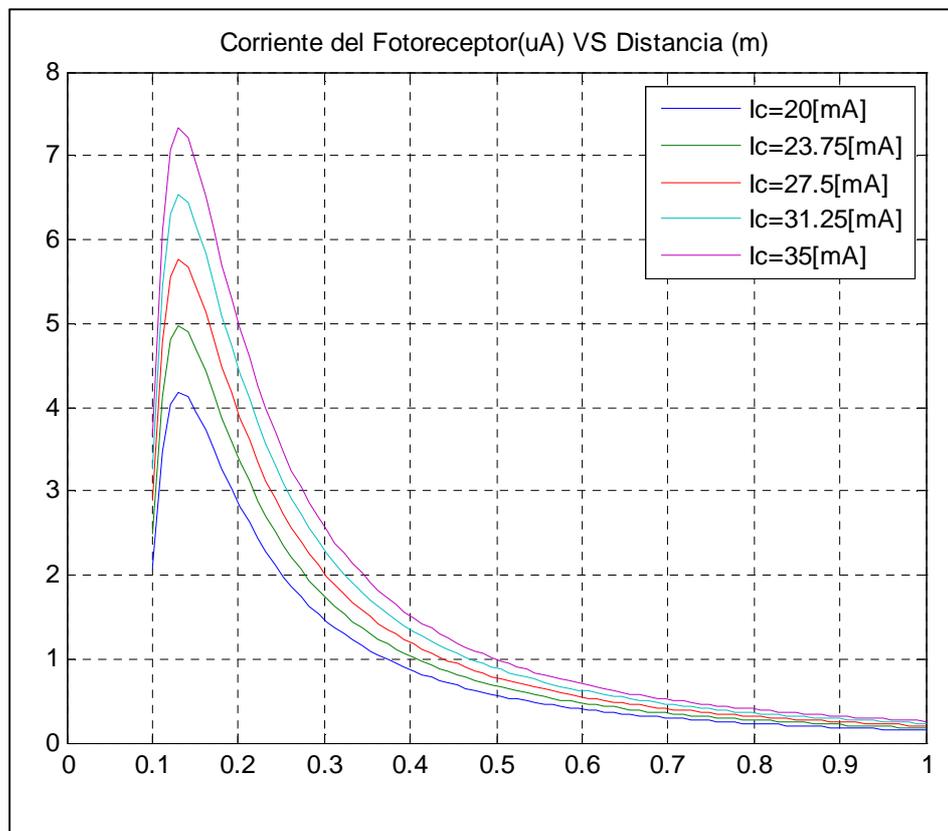


Figura 5.7 Corriente de salida del fotodiodo receptor vs. Distancia de separación fibra-líquido.

La figura 5.7 muestra las curvas obtenidas para diferentes corrientes de polarización obtenidas al variar el potenciómetro presente en el emisor. Note que la curva de 35mA produce mejores resultados. Cabe recalcar que esta imagen muestra la relación de corriente a la salida del fotodiodo receptor vs. la distancia entre las fibras y el espejo que se ubicaría en la superficie del líquido que se desea medir el nivel.

5.3. Análisis y simulaciones del receptor de luz.

Los datos obtenidos de esta gráfica deben ser analizados nuevamente en el entorno de LTSpice, para ello realizamos la exportación de los mismos a un documento de texto para poder incluirlos a una fuente de corriente que simularemos como el fotodetector ya que en estado de operación es similar su funcionamiento. Los comandos utilizados para llevar a cabo este proceso lo encontrara en la parte de anexos.

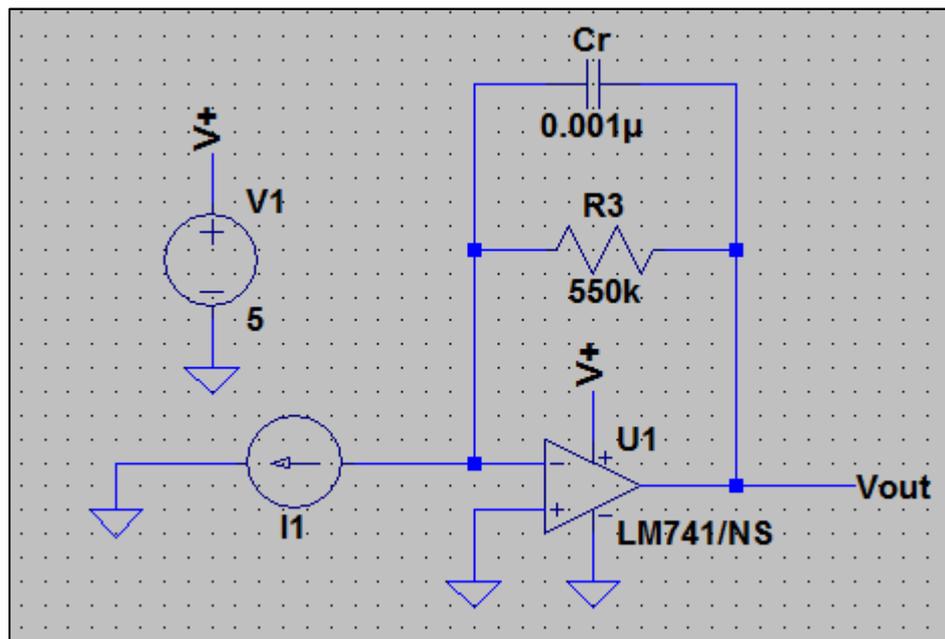


Figura 5.8 Fotodiodo acoplado al Amplificador de transimpedancia.

La figura 5.8 nos muestra el circuito receptor con el fotodiodo actuando como fuente corriente, la polarización de dicha fuente es inversa dada la naturaleza del fotodiodo y el Opamp actúa como un amplificador de transimpedancia, ya que convierte la señal de corriente proveniente del fotodiodo en voltaje a la salida del mismo. La ganancia puede ajustarse variando el resistor presente en el lazo de retroalimentación, R3.

Para verificar el valor máximo del resistor de retroalimentación que puede ser usado en el circuito hemos realizado un barrido con el circuito que acabamos de presentar obteniendo los siguientes resultados:

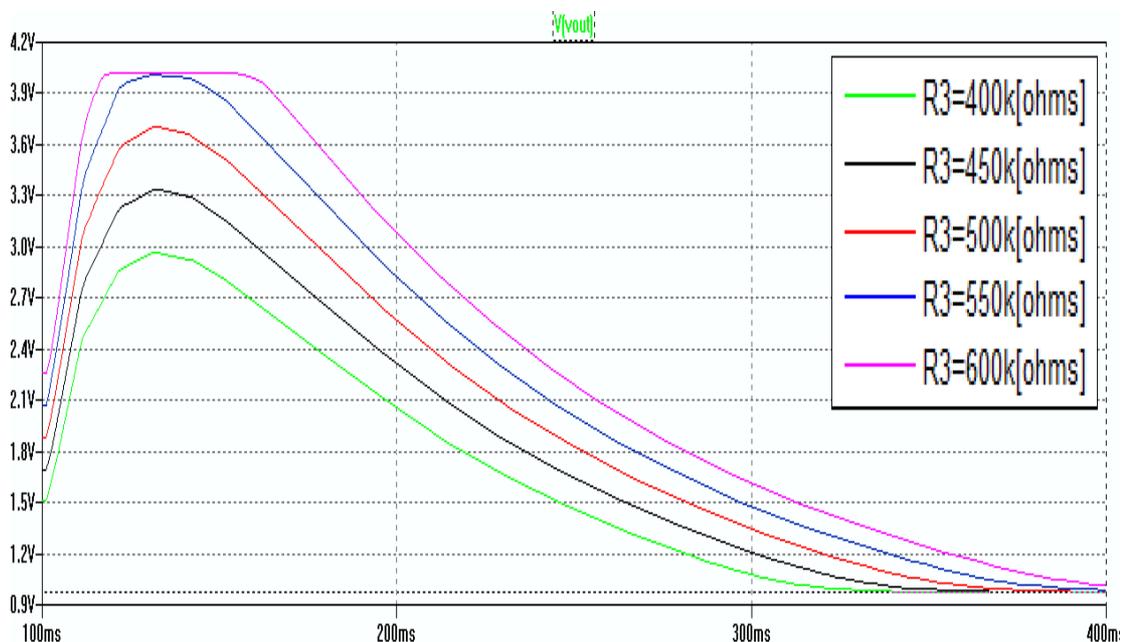


Figura 5.9 Voltaje a la salida del amplificador en función del resistor de retroalimentación.

La escala inferior de la figura 5.9 esta en milisegundos por efecto de simulación, lo que nos interesa observar es que la señal no se atenúe por la saturación del Opamp y que se amplifique en un rango aceptable para su proceso en el microcontrolador que es la siguiente etapa.

Cuando el valor del resistor de retroalimentación R3 es de 550k Ω se obtiene la máxima excursión de la señal sin recortes por la saturación del Opamp de modo que adoptaremos este valor para el diseño del receptor óptico.

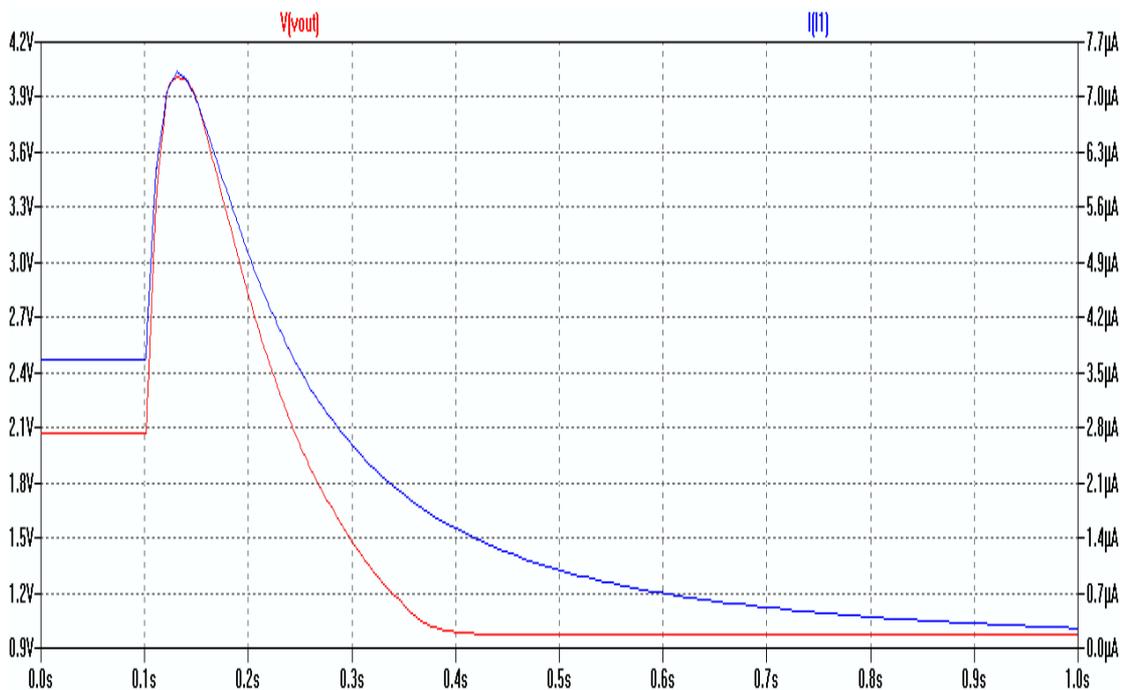


Figura 5.10 Relación entre el Voltaje a la salida del amplificador y la corriente del fotodiodo.

Otra característica que debemos controlar es el nivel de amplificación y la forma que adopta la señal, sin descuidar las características del Opamp como son: el voltaje de offset, las corrientes de fuga y otros que introducen ruido al sistema. En la figura 5.10 podemos apreciar la forma de la señal voltaje a la salida del amplificador y la corriente que genera el fotodiodo cuando la luz incide en él, note la desviación de la señal cuando el voltaje se aproxima a 0 debido a la no linealidad del resistor y las características que acabamos de mencionar. La señal de voltaje de salida es enviada al microcontrolador del transmisor de la red Zigbee.

Controlar los niveles de voltaje que adoptara la señal no resulta muy difícil, solo es necesario incluir etapas de amplificación de voltaje, mas para incrementar la distancia entre las fibras y el espejo se pueden optar por varias soluciones ajenas al campo eléctrico y que van de la mano con la óptica y las propiedades ondulatorias de la luz, pero si se realizan cambios en el sistema en la parte óptica se deben modificar las ecuaciones que determinan la cantidad de luz transmitida en la fibra.

Para este análisis las lentes no fueron consideradas como parte del sistema ya que las propiedades y el comportamiento de las lentes no ha sido estudiado a fondo en este trabajo porque no es el objetivo principal de este proyecto sin embargo se realizó un pequeño análisis de su influencia en el rango dinámico del mismo en el capítulo 3.

Para incluir el análisis completo con las ecuaciones referente a las lentes debe indagarse un poco más a fondo sobre las características y las normas que las rigen, queda como objeto de análisis para trabajos futuros esta tarea.

La figura 5.11 un trabajo realizado por la universidad de Parma en Italia basado en el mismo principio de operación de este proyecto y que sirvió como guía para el diseño del mismo.

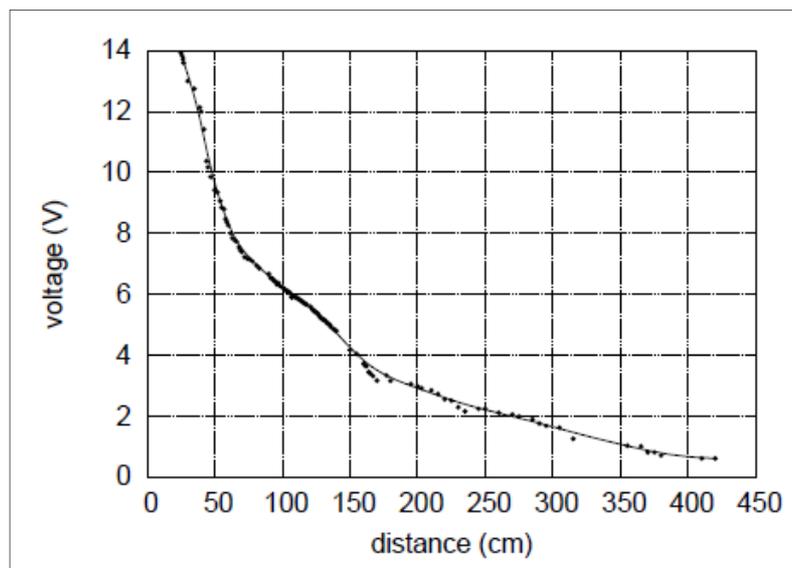


Figura 5.11 Relación Voltaje vs. Distancia para un sensor de nivel basado en un diodo láser [16].

La relación entre el voltaje y la distancia nos da la curva de mayor interés y con la que podemos hacer una comparación, ya que adopta las mismas características que consideramos en este trabajo.

La figura es muy similar a la obtenida por la simulación de nuestro sistema, muestra el comportamiento de un sensor con la influencia de las lentes y el uso de un láser en lugar de un diodo, lo que permite que los rayos viajen distancias mas grandes, la obtención de un rayo mas colimado y el poder trabajar con potencias mayores, además la lente influye de modo significativo en el sistema, si el proyecto se implementa con el uso de estos elementos, un resultado similar se podría obtener ampliando en gran medida las ventajas del sistema.

5.4. Procesamiento de los datos en la Red Zigbee.

La señal de voltaje proveniente del receptor óptico es luego procesada en el microcontrolador del transmisor ó dispositivo final de la red inalámbrica Zigbee. El microcontrolador dispone de un convertidor analógico-digital de 10 bits, como se aprecia en la figura 5.10, el valor máximo de voltaje de la señal de entrada será de 4V. Hemos ajustado intencionalmente a este valor máximo debido a que las tensiones de

referencia microcontrolador han sido fijadas en $+V_{ref}=5V$ y $-V_{ref}=0V$ internamente a través de los registros de control del microcontrolador.

Los valores binarios correspondientes a cada nivel de voltaje serán luego empaquetados en una trama de datos acorde al formato establecido en la figura 4.14; esta trama es transmitida vía serial al módulo Xbee, para ser enviada al coordinador; este proceso se repetirá continuamente.

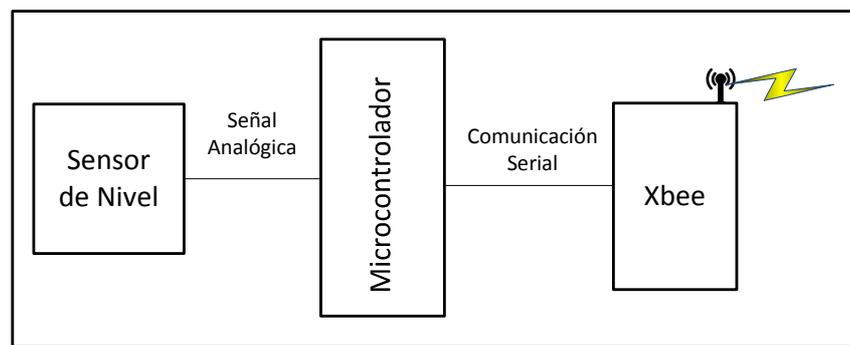


Figura 5.12 Diagrama de bloques simplificado del transmisor.

En el coordinador el modulo Xbee recibirá la trama de cada dispositivo terminal, luego la enviará serialmente al microcontrolador del coordinador donde la trama será procesada. El microcontrolador desempaquetará el valor de voltaje de la trama recibida, este valor de voltaje digital será luego transformado por medio de la relación

matemática de la ecuación 5.1 a su correspondiente nivel de altura del nivel del líquido en el contenedor.

$$L = 3 \times \frac{Data}{1023} \quad (5.1)$$

De donde, Data es el valor digital del voltaje obtenido a la salida del receptor óptico; 1023 corresponde al valor de máxima conversión digital^{††††}; y la constante 3 es el valor del máximo nivel a sensor en los contenedores de líquido. La ecuación nos da como resultado las correspondientes alturas del líquido medido en metros. Cabe mencionar que el voltaje máximo se obtiene con la mínima distancia fibra-espejo y deberá ser calibrado en el contenedor al momento de implementarse el sistema.

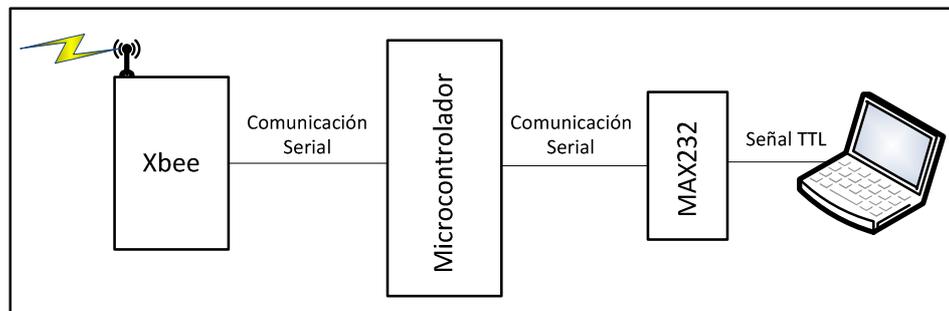


Figura 5.13 Diagrama de bloques simplificado del coordinador.

^{††††} El convertor analógico-digital del microcontrolador es de 10 bits por tanto genera valores entre 0 y 1023, dando un total de 1024 combinaciones.

Este valor L es enviado a un computador utilizando un segundo par de pines (RB1 y RB2) del microcontrolador del coordinador los cuales se han configurado por software como puerto de comunicación serial adicional. Cabe mencionar que es necesario adaptar los niveles de voltaje del microcontrolador a los niveles de voltaje TTL que utiliza un computador, para ello hemos conectado los pines del microcontrolador a un driver MAX232.

En el computador se ejecutará una rutina que deberá capturar, ordenar, almacenar y presentar en pantalla los niveles de líquido obtenidos en los sensores; esta información siempre estará visible y se actualizará conforme se realicen las consultas a los sensores. Este procedimiento deberá ser realizado en cualquier lenguaje de programación, recomendamos lenguaje C++ por ser de alto nivel y el más difundido a nivel universitario.

El proceso de adquisición y envío de información descrito será constante, y se ejecuta por cada sensor de manera secuencial y ordenada.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. La fibra óptica de plástico puede ser usada como un elemento sensible y tiene un gran potencial para ser explotada en numerosas áreas de aplicación si se aprovechan adecuadamente sus características, ya que proporciona un ambiente seguro, de mínima interferencia y ruido electromagnético con el uso de luz en lugar de señales eléctricas.
2. Este estudio propone un sensor de bajo costo que permite el ahorro de energía, porque debe acoplarse a un sistema de transmisión de datos inalámbrico de poca demanda de potencia. Las simulaciones acerca del comportamiento del sensor ha sido realizada con datos obtenidos del datasheet del fabricante y son la base para la implementación de una red inalámbrica de sensores con alta escalabilidad.
3. El uso de elementos como lentes y espejos se acoplan perfectamente a las aplicaciones que utilizan fibra óptica y permiten mejorar de forma

significativa el comportamiento de estos sistemas, incrementando la eficiencia y estableciendo etapas de control para formar dispositivos que pueden ser mejorados como objetivo de futuros trabajos.

4. Con la red Zigbee, siendo de bajo consumo de potencia, podemos alargar el tiempo de vida de las baterías de los sensores. Inclusive si se quiere ganar más durabilidad de las baterías podemos configurar el microcontrolador de los sensores para que entre en modo "sleep" mientras no se reciba la petición del coordinador de consultar el nivel del líquido.
5. El sistema propuesto en este trabajo es una base para futuros desarrollos de redes de sensores utilizando Zigbee, microcontroladores y elementos de fácil acceso en el mercado local. Permite la implementación de diferentes sistemas de recolección de datos que pueden cambiarse sin afectar el funcionamiento del sensor.

Recomendaciones:

1. Para mejorar la distancia que puede ser medida con el sensor aquí propuesto, se debería considerar el uso de Diodos mas potentes como el Diodo Avalancha o inclusive Diodos Láseres, así como también se puede mejorar los circuitos de emisión y recepción de luz utilizando micro controladores para establecer un mejor manejo de las señales y adquisición de datos.
2. Se puede aislar los tramos de fibra en una sección fina y aparte que posea el mismo nivel del liquido por presión atmosférica con la finalidad de impedir que señales ajenas a la luz emitida por el LED ingresen en la fibra que recibe la Luz para una mejor medición.
3. Establecer un circuito de temporización y una subrutina en el controlador que permita encender los sensores de forma sincronizada con los nodos que conforman la red inalámbrica, proporcionaría un mayor ahorro de energía pero de la misma manera se llevaría el control del nivel del líquido periódicamente.

4. La configuración de los microcontroladores es preferible realizarlas en código C, se recomienda realizarlo en Pic C Compiler dado que es más amigable y tiene subrutinas pre configuradas para las diversas funcionalidades que vamos a utilizar de los microcontroladores.
5. El microcontrolador del coordinador necesita dos vías de comunicación serial característico de integrados mas complejos y costosos, pero el Pic C permite utilizar dos pines adicionales y configurarlos como la salida serial extra que necesitamos.
6. Tener presente declarar las prioridades de las interrupciones de los microcontroladores acorde al flujo de la comunicación y los procesos que se desarrollan en la adquisición de los datos del nivel. Esto es una característica configurable en los microcontroladores.
7. La configuración de los elementos de red se convierte en un proceso rutinario utilizando el software de configuración XCTU de libre acceso, lo que nos da una ventaja si no estamos familiarizados a configurar con comandos AT.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Crates, EM Spectrum Properties es, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_Spectrum_Properties_es.svg, 17 de Febrero del 2008.
- [2] Arvelius Johan, Reflection Angles, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reflection_angles.svg, 26 de Septiembre del 2005.
- [3] Josell7, Propagación de la luz desde el agua hacia el aire, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Refracción_y_reflexión.svg, 20 de Marzo del 2010
- [4] S.O. Kasap, Optoelectronics and Photonics Principles and Practices, Prentice Hall, 2001.
- [5] JabberWok, Bohr-atom-PAR, <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bohr-atom-PAR.svg>, 23 de Febrero del 2007.
- [6] Mrzeon, Fibra_optica, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fibra_optica.svg, 21 de Septiembre de 2007
- [7] Backsideficker, IEEE_802.15.4_Star_P2P.svg, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:IEEE_802.15.4_Star_P2P.svg, 24 de Enero del 2009.
- [8] Electrocomponentes S.A., Tecnología ZigBee. Un mundo de soluciones inalámbricas, <http://www.electrocomponentes.com/articulos/diciembre06/ZigBee.html>, Diciembre 2012.

- [9] J. MacLellan, S. Lam, y X. Lee, "Resintian In door RF Channel Characterization", 43rd IEEE VTC, 20 de Mayo de1993, Página 210 – 213.
- [10] Martínez David, Comunicaciones Inalámbricas, 1era edición, Editorial Alfaomega, 2005.
- [11] S.O. Kasap, Optoelectronics and Photonics Principles and Practices, Prentice Hall, 2001.
- [12] Suhadolnik, A. Babnik, J. Možina, Optical Fiber Reflection Refractometer, University of Ljubljana, 1995.
- [13] Ortega Carlos, Del Socorro Deyanira, Ubeda Leslie; Técnicas de Alta Frecuencia: Zigbee, Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, 2008.
- [14] López David, Gala Sergio; Red Inalámbrica para instrumentación de procesos, Universidad Politécnica de Catalunya, Catalunya, 2012.
- [15] Moreno Cynthia, Construcción de una red Zigbee prototipo para la adquisición de datos desde transmisores de corriente de dos hilos, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2009.
- [16] Matteo Foroni, Michele Bottacini, Federica Poli, Annamaria Cucinotta, Stefano Selleri; University of Parma, Parco Area delle Scienze 181/A, I-43100 Parma, Italy, 2006.

ANEXOS

Anexo A: Código de Matlab para modelamiento el entorno fibra – aire presentado en el presente proyecto.

```
clear all;
close all;
clc;

Vled=1.8;           %Voltaje de polarizacion del LED
Nled=0.2;          %Eficiencia del LED
Rm= 0.99;          %Reflectancia del espejo
no=1;              %Índice de refracción del medio
ncore=1.495;       %Índice de refracción del núcleo
                    %de la fibra
ncladding=1.419;   %Índice de refracción de la
                    %cubierta de la fibra
a=0.0005;          %Radio del núcleo de la fibra [m]
s=0.1;             %Separación entre los ejes de la
                    %fibra [m]; valor óptimo 0.00234

Resp=0.2;          %Responsividad del fotodiodo[uA/uW]

Ic=linspace(20,35,5); %Corriente de colector [mA]
Pi=Nled*Vled.*Ic;    %Potencia optica de entrada [mW]
NA= sqrt(ncore.^2-ncladding.^2); %Apertura numérica
ang_crit= asin(NA/no); %Ángulo crítico
Ti=(4*ncore*no)/(ncore+no)^2; %Coeficiente de
transmision de Fresnel para incidencia normal

h =linspace(0.000005,1,100); %Distancia entre las fibras
                    %y el espejo (m)
R= a+2*h*tan(ang_crit); %Radio del cono de luz saliente

for i=1:100
if(R(i) <= s-a) % Limites
    R1=0; %
```

```

        R2=0; % de
elseif (and(R(i)>s-a,R(i)<s+a)) %
        R1=s-a; % la
        R2=R(i); %
else % integral
        R1=s-a; %
        R2=s+a; % externa
end %

%Vector usado como variable de la integral
r =linspace(R1,R2,10);
%Vector que permite realizar la integral de Riemman
r2=linspace(R1,R2,11);
%Angulo azimuth
phi=acos((r.^2+s^2-a^2)./(2*s*a));

%Calculo del indice de transmision de Fresnel con el ajuste
%del angulo de inclinacion con que inciden los rayos en la
%fibra receptora

U = atan(r/(2*h(i)));
V = asin(sin(U)*(no/ncore));
To_r= (0.5*(sin(2*U).*sin(2*V))./(((sin(U+V)).^2).*(cos(U-
V)).^2)))+(0.5*((sin(2*U).*sin(2*V))./((sin(U+V)).^2)));

%Calculo de la intensidad
I= (2/(pi*R(i)^2))*(1-((r.^2)./R(i)^2)).*r;

for j=1:10
%Calculo de la eficiencia en un vector con todas las areas de
%la integral de Riemman
Q(j)=2*Rm*Ti*To_r(j)*I(j)*(r2(j+1)-r2(j));
end

%Suma de las areas de la integral de Riemman
N(i)=sum(Q);

end

Io1=Resp*Pi(1)*N*1000;
Io2=Resp*Pi(2)*N*1000;
Io3=Resp*Pi(3)*N*1000;
Io4=Resp*Pi(4)*N*1000;
Io5=Resp*Pi(5)*N*1000;

```

```
str1=strcat('Ic=',num2str(Ic(1)),'[mA]');
str2=strcat('Ic=',num2str(Ic(2)),'[mA]');
str3=strcat('Ic=',num2str(Ic(3)),'[mA]');
str4=strcat('Ic=',num2str(Ic(4)),'[mA]');
str5=strcat('Ic=',num2str(Ic(5)),'[mA]');

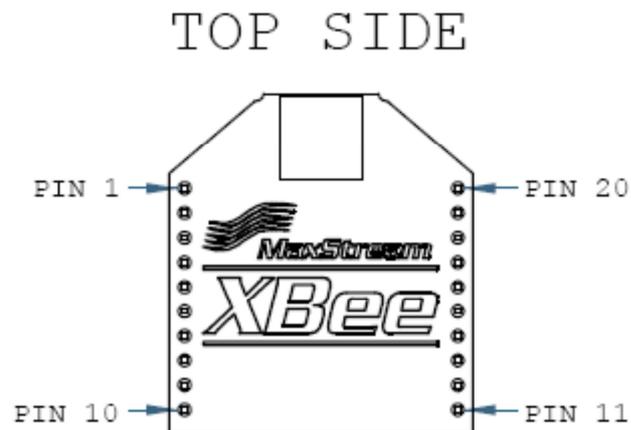
plot (h,Io1,h,Io2,h,Io3,h,Io4,h,Io5), grid on;
title('Corriente del Fotoreceptor(uA) VS Distancia (m)')
legend(str1,str2,str3,str4,str5)
```

Anexo B: Especificaciones técnicas de los módulos XBee serie 1.

Detalles		XBEE 802.15.4 (Series 1)	
		Funciones	
Tasa de datos		254 Kbps	
Rango recinto interior		30 m	
Rango línea de visión		100 m	
Potencia de Transmisión		1 mW (+0 dBm)	
Sensibilidad del receptor (1% PER ⁷)		-92 dBm	
		Características	
Interfaz de Datos Serial		3.3V CMOS UART	
Métodos de Configuración		Comandos AT o API, local o sobre el aire.	
Banda de frecuencia		2.4 GHz	
Inmunidad a la interferencia		DSSS (Direct Sequence Spread Spread Spectrum)	
Tasa de Comunicación Serial		1200 bps a 250 Kbps	
Convertidores ADC		Convertidores de 10 bit (hasta 7 disponibles). ⁸	
I/O Digitales		Hasta 8 disponibles.	
PWM (Pulse Width Modulation)		Hasta 2 disponibles.	
Opciones de Antena		Chip, Wire Chip, U.FL y RPSMA.	
		Redes y Seguridad.	
Encriptación		128 bits	
Entrega confiable de paquetes.		Retries/Acknowledgments (Reintentos/ aviso de recibo de paquetes)	
ID's y canales.		PAN ID (personal Area Network), 64-bit IEEE MAC, 16 canales.	
		Requerimientos de poder	
Voltaje de Alimentación		2.8 a 3.4 Vdc	
Corriente al transmitir.		45 mA @ 3.3 Vdc	
Corriente al recibir.		50 mA @ 3.3 Vdc	
Corriente de apagado.		<10uA @ 25 °C	
		Regulaciones aprobadas.	
FCC (USA)		OUR-XBEE	
IC (Canadá)		4214A-XBEE	
ETSI (Europa)		Si	
C-TICK Australia		Si	
Telec (Japón)		Si	

Anexo C: Distribución de pines en los módulos XBee serie 1.

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DO8*	Output	Digital Output 8
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI	Output	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator
7	PWM1	Output	PWM Output 1
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ / DI8	Input	Pin Sleep Control Line or Digital Input 8
10	GND	-	Ground
11	AD4 / DIO4	Either	Analog Input 4 or Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator
14	VREF	Input	Voltage Reference for A/D Inputs
15	Associate / AD5 / DIO5	Either	Associated Indicator, Analog Input 5 or Digital I/O 5
16	RTS / AD6 / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Analog Input 6 or Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0	Either	Analog Input 0 or Digital I/O 0



Anexo D: Comandos “AT” usados en módulos XBee.

Comando	Rango	Descripción
AT		
A1	0 - 0x0F	Describe el modo de Asociación de un módulo. utilizado como Dispositivo Terminal (CE=0). Defecto=0.
A2	0 - 0x0F	Describe el modo de Asociación de un módulo utilizado como Coordinador (CE=1). Defecto=0.
AC	-	Aplica los cambios realizados explícitamente en la configuración.
AP	0 - 0x02	Habilita el modo de operación API. Defecto=0. 0 Modo API Deshabilitado. 1 Modo API habilitado. 2 Modo API habilitado con carácter de escape. Ajusta la tasa de transmisión entre el módulo y su cliente conectado a través de la interfaz serial. Para valores no-estándar revisar el manual. Defecto=3.
BD	0 - 0x07	0 1200 1 2400 2 4800 3 9600 4 19200 5 38400 6 57600 7 115200
CC	0 - 0xFF	Establece el carácter de secuencia a ser usado entre tiempos de esperas para entrar al modo de comandos. Defecto=0x2B (carácter ASCII +)
CH	0x0B - 0x1A	Establece el canal por el cual se realiza la conexión RF entre módulos. Verificar Tabla 5-1 Frecuencia de Canales para configurar este parámetro. Defecto=0x0C.
CE	0 - 1	Indica el comportamiento del módulo. Defecto=0. 0 Dispositivo Terminal. 1 Coordinador.
CN	-	Salida del modo de Comando.
D0-D4	0 - 5	Ajusta la configuración de los pines I/O.

		0	Deshabilitado.
		1	--
		2	ADC.
		3	Entrada Digital.
		4	Salida Digital LOW.
		5	Salida Digital HIGH.
D5	0 - 5		Mismas funciones que D0 - D4, exceptuando lo siguiente:
D6	0 - 5	1	Indicador de Asociación. Mismas funciones que D0 - D4, exceptuando lo siguiente:
		1	Control de Flujo RTS.
		2	No tiene conversor ADC.
D7	0 - 5		Mismas funciones que D0 - D4, exceptuando lo siguiente:
		1	Control de Flujo CTS.
		2	No tiene conversor ADC.
D8	Sólo 0 y 3.		Ajusta la configuración del pin DI-8 (pin 9).
		0	Deshabilitado.
		3	Entrada Digital.
DB	0x17 - 0x5C (x-1dBm)		Lee la potencia de la señal del módulo del cual provino el último paquete RF recibido.
DL	0 - 0xFFFFFFFF		Ajusta los 32 bits menos significativos para direccionamiento. Defecto = 0.
DH	0 - 0xFFFFFFFF		Ajusta los 32 bits más significativos para direccionamiento. Defecto = 0.
GT	2 - 0x0CE4 (x 1 ms)		Tiempo de espera antes y después de ingresar el carácter de secuencia para entrar al modo de comandos. Defecto = 0x3E8.
			Utilizado para crear el Cable Virtual. Indica la dirección del módulo de origen de los datos. Defecto= 0xFFFFFFFFFFFFFFFF (no permite el recibo de ningún paquete para cambiar las salidas.)
IA	0 - 0xFFFFFFFF		Ajusta la dirección PAN del módulo. Defecto = 0x3332
ID	0 - 0xFFFF		Ajusta la tasa de muestreo de los pines I/O. Defecto = 0.
IR	0 - 0xFFFF (x1 ms)		
IS	1 - 0xFF		Forza al módulo a leer todos sus pines I/O. Si AP=0, el resultado se retorna del siguiente modo:
			- Número de Muestras.
			- Máscara de Canal.
			- Datos DIO.
			- Datos conversores ADC (se repite por cada conversor habilitado).
IT	1 - 0xFF		Número de muestras DIO y ADC que se deben

esperar, antes de transmitir. Defecto = 1.

IO	8 bits	Ajusta los niveles de las salidas digitales. Cada bits representa el nivel de los pines I/O configurados como salida .
M0 - M1	0 - 0x03FF	Ajusta el ciclo de trabajo de la salida PWM0 y PWM1. Si Mn=0 (0% PWM), Mn=0x01FF (50% PWM) y si Mn=0x03FF (100% PWM). Defecto=0.
MY	0 - 0xFFFF	Configura la dirección de 16 bits para el módulo. Si My=0xFFFF o 0xFFFE, se habilita el modo de direccionamiento de 64 bit. Defecto = 0.
NB	0 - 4	Ajusta la Paridad para la comunicación serial UART del módulo. Defecto = 0 .
		0 8 bit sin paridad o 7 bit con cualquier paridad.
		1 8 bit even.
		2 8 bit odd.
		3 8 bit mark.
		4 8 bit space.
ND	-	Reporta todos los dispositivos que se encuentren en el mismo canal y en la misma PAN que el módulo. El formato de respuesta es el siguiente cuando se encuentra en el modo Transparente.
		- MY (dirección de 16 bit)
		- SH (Serial Number High)
		- SL (Serial Nmuber Low).
		- DB (Fuerza de la señal proveniente de este módulo)
		- NI (Identificador del Nodo)
NI	String de 20 caracteres ASCII	Define con un String el nodo o módulo .
P0 - P1	0 - 2	Configura el pin PWM0 y PWM1. Defecto P0 =1, Defecto P1=0.
		0 Deshabilitado.
		1 RSSI.
RE	-	2 PWM habilitado.
		Restaura los valores de los parámetros a los valores por defecto que vienen de fábrica.
SM	0 - 6	Configura el modo de operación SLEEP. Defecto = 0.
		0 Deshabilitado.
		1 Pin de Hibernado.
		2 Pin Doze.
		3 (reservado)
		4 Remoto Cyclic SLEEP.
		5 Remoto Cyclic SLEEP (con pin Wake-up).
		6 SLEEP Cordinador.
SL	0 - 0xFFFFFFFF	Entrega los 32 bit menos significativos del Número Serial del módulo.

SH	0 - 0xFFFFFFFF	Entrega los 32 bit más significativos del Número Serial del módulo.
SP	1 - 0x68B0 (x10 ms)	Ajusta el tiempo de duración en que un módulo duerme o se mantiene en el modo SLEEP. Una vez terminado el periodo, busca por data entrante, si no hay nada vuelve a dormir y espera por un nuevo ciclo.
ST	1 - 0xFFFF (x1 ms)	Ajusta el tiempo de inactividad (datos ni recibidos ni enviados ya sea por RF o serial) antes de que el módulo ingrese al modo SLEEP. Defecto = 0x1388. Tiempo de espera de apagado para los Cables Virtuales. Si luego de este tiempo no hay cambios en alguna salida I/O, éstas cambian a su valor por defecto. Defecto = 0xFF.
T0 - T7	0 - 0xFF (x100 ms)	
IU	0 - 1	Habilita o no la salida I/O UART.
		0 Deshabilitado. Paquetes RF recibidos no serán enviados por UART.
		1 Habilitado. Paquetes RF recibidos serán enviados por UART.
VL	-	Entrega la versión del Firmware de forma Verbal. La respuesta entrega fecha de compilación de la aplicación, MAC, PHY y versión del bootloader y sus fechas de compilación.
VR	0 - 0xFFFF	Indica cual versión de firmware se encuentra actualmente en el módulo.
WR	-	Guarda en la memoria no-volátil del módulo, todos los valores de los parámetros.

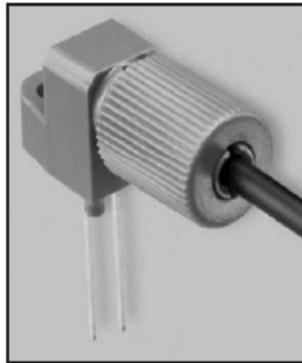
Tabla 8-1 Tabla Resumen de Comandos.

Anexo E. Datasheet diodo IF-E96.

Plastic Fiber Optic Red LED

IF-E96

5206



DESCRIPTION

The IF-E96 is a low-cost, high-speed, visible red LED housed in a "connector-less" style plastic fiber optic package. The output spectrum is produced by a GaAlAs die which peaks at 660 nm, one of the optimal transmission windows of PMMA plastic optical fiber. The device package features an internal micro-lens and a precision-molded PBT housing to maximize optical coupling into standard 1000 μm core plastic fiber cable.

APPLICATION HIGHLIGHTS

The performance/price ratio of the IF-E96 is particularly attractive for high volume design applications. The visible red output has low attenuation in PMMA plastic fiber and aids in troubleshooting installations. When used with an IF-D96 photologic detector the IF-E96 can achieve data rates of 5 Mbps. Fast transition times and low attenuation make the IF-E96 an excellent device selection for low cost analog and digital data links up to 75 meters.

APPLICATIONS

- ▶ Low Cost Analog and Digital Data Links
- ▶ Automotive Electronics
- ▶ Digitized Audio
- ▶ Medical Instruments
- ▶ PC-to-Peripheral Data Links
- ▶ Robotics Communications
- ▶ Motor Controller Triggering
- ▶ EMC/EMI Signal Isolation
- ▶ Local Area Networks
- ▶ Intra-System Links: Board-to-Board, Rack-to-Rack

FEATURES

- ◆ High Performance at Low Cost
- ◆ Visible Red Output Aids Troubleshooting
- ◆ Low Transmission Loss with PMMA Plastic Fiber
- ◆ Fast Transition Times
- ◆ Mates with standard 1000 μm core jacketed plastic fiber cable
- ◆ No Optical Design required
- ◆ Internal Micro-Lens for Efficient Optical Coupling
- ◆ Inexpensive Plastic Connector Housing
- ◆ Connector-Less Fiber Termination
- ◆ Light-Tight Housing Provides Interference-Free Transmission
- ◆ RoHS Compliant

MAXIMUM RATINGS

($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Operating and Storage Temperature Range (T_{OP}, T_{STG})	-40° to 85°C
Junction Temperature (T_J)	85°C
Soldering Temperature (2 mm from case bottom) (T_S) $t \leq 5s$	240°C
Reverse Voltage (V_R)	5 V
Power Dissipation (P_{TOT}) $T_A = 25^\circ\text{C}$	60 mW
De-rate Above 25°C	1.1 mW/°C
Forward Current, DC (I_F)	35 mA
Surge Current (I_{FSM}) $t \leq 10 \mu s$	150 mA

CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

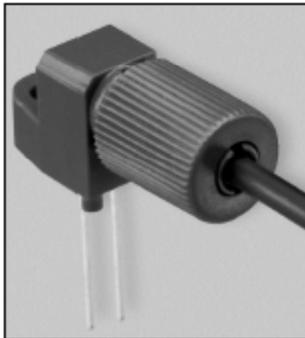
Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Peak Wavelength	λ_{PEAK}	650	660	670	nm
Spectral Bandwidth (50% of I_{MAX})	$\Delta\lambda$	-	20	-	nm
Output Power Coupled Into Plastic Fiber (1 mm core diameter). Distance Lens to Fiber ≤ 0.1 mm, 1 m SH4001 fiber, $I_F = 20$ mA	Φ_{min}	125 -9.0	200 -7.0	300 -5.2	μW dBm
Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) ($I_F = 20$ mA)	t_r, t_f	-	.1	-	μs
Capacitance ($F = 1$ MHz)	C_0	-	30	-	pF
Forward Voltage ($I_F = 20$ mA)	V_f	-	-	1.8	V
Temperature Coefficient, λ_{PEAK}	TC_λ	-	0.2	-	nm/K

Anexo F: Datasheet diodo IF-D91.

Plastic Fiber Optic Photodiode

IF-D91

revised 09/27/02



DESCRIPTION

The IF-D91 is a high-speed photodiode detector housed in a "connector-less" style plastic fiber optic package. Optical response of the IF-D91 extends from 400 to 1100 nm, making it compatible with a wide range of visible and near-infrared LED and laser diode sources. This includes 650 nm visible red LEDs used for optimum transmission in PMMA plastic optic fiber. The detector package features an internal micro-lens and a precision-molded PBT housing to ensure efficient optical coupling into standard 1000 μm core plastic fiber cable.

APPLICATION HIGHLIGHTS

The fast response times of the IF-D91 make it suitable for high-speed digital data links. When used with an appropriate LED or laser diode source the IF-D91 is capable of 100 Mbps data rates. The IF-D91 also can be used in analog video links with bandwidths up to 70 MHz. The integrated design of the IF-D91 provides simple, cost-effective implementation in a variety of analog and digital applications.

APPLICATIONS

- ▶ High-Speed Digital Data Links
- ▶ Local Area Networks
- ▶ Motor Controller Triggering
- ▶ Video Links
- ▶ Medical Instruments
- ▶ Automotive Electronics
- ▶ Robotics Communications
- ▶ EMC/EMI Signal Isolation
- ▶ Fiber Optic Modems

FEATURES

- ◆ Fast Rise and Fall Times
- ◆ Mates with Standard 1000 μm Core Jacketed Plastic Fiber Optic Cable
- ◆ No Optical Design Required
- ◆ Inexpensive Plastic Connector Housing
- ◆ Internal Micro-Lens for Efficient Optical Coupling
- ◆ Connector-Less Fiber Termination
- ◆ Light-Tight Housing provides Interference Free Transmission

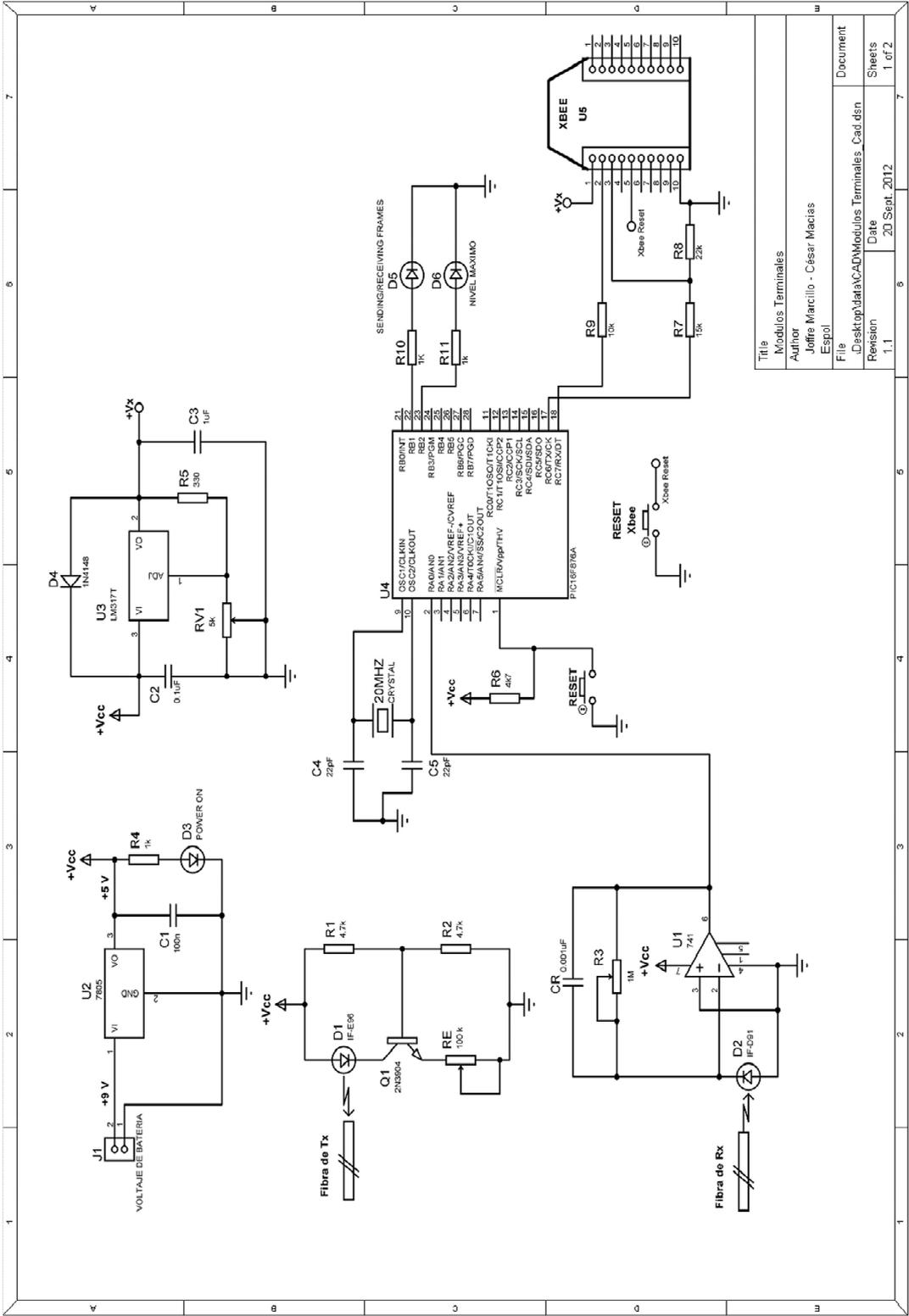
MAXIMUM RATINGS

($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Operating and Storage Temperature Range (T_{OP}, T_{STG}).....	-40° to 85°C
Junction Temperature (T_J)	85°C
Soldering Temperature (2 mm from case bottom) (T_S) $t_s \leq 5s$	240°C
Power Dissipation (P_{TOT}) $T_A = 25^\circ\text{C}$	100 mW
De-rate Above 25°C	1.33 mW/°C

CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Wavelength for Maximum Photosensitivity	λ_{PEAK}	-	880	-	nm
Spectral Bandwidth ($S=10\%$ of S_{MAX})	$\Delta\lambda$	400	-	1100	nm
Rise and Fall Times (10% to 90% and 90% to 10%) ($R_L=50 \Omega$, $V_R=20V$, $\lambda=850 \text{ nm}$)	t_r, t_f	-	5	-	ns
Total Capacitance ($V_R=20 \text{ V}$, $E_T=0$, $f=1.0 \text{ MHz}$)	C_T	-	4	-	pF
Responsivity min. @ 880 nm @ 632 nm	R	-	.4 .2	-	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$ $\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Reverse Dark Current ($V_R=30 \text{ volts}$, $E_T=0$)	I_D	-	-	60	nA
Reverse Breakdown Voltage	$V_{(BR)R}$	60	-	-	V
Forward Voltage	V_f	-	1.2	-	V



Title	Modulos Terminales
Author	Jofre Marcellio - César Macías
File	..desktop\data\CAD\Modulos Terminales_Cad.dsn
Revision	1.1
Date	20 Sept. 2012
Revision	1.1
Document	
Sheets	1 of 2