

# Red Inalámbrica de Sensores de Fibra Óptica de Plástico

Joffre Marcillo<sup>(1)</sup>, César Macías<sup>(2)</sup>, Germán Vargas M. Sc.<sup>(3)</sup>

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación<sup>(1)(2)(3)</sup>

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral

Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

jdmarcil@espol.edu.ec<sup>(1)</sup>, cesedmac@espol.edu.ec<sup>(2)</sup>, gvargas@espol.edu.ec<sup>(3)</sup>

## Resumen

*Este proyecto 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. Este proyecto se centra en el uso de la fibra óptica de plástico como elemento sensible.*

*Se analiza las características y limitantes de un transmisor y receptor de luz; presentamos un modelo de red inalámbrica basada en Zigbee para transmitir los datos obtenidos por el sensor de nivel de líquidos.*

*Se establece un escenario para la aplicación de la red inalámbrica de sensores con el fin de dar solución a un problema real. Haremos uso de un programa desarrollado en Matlab para estimar el comportamiento de la luz que se transmite de fibra a fibra a través de una interfaz de aire para determinar los niveles del líquido en función de los parámetros de entrada.*

*Se describirá la implementación de la red inalámbrica y el sensor, haciendo énfasis en las interfaces entre los elementos que conforman el sistema, esto comprende: criterios de diseño, diagramas de bloques, y simulaciones de los dispositivos electrónicos utilizados en el diseño de los módulos que componen el sensor.*

**Palabras Claves:** Fibra óptica, Zigbee, Matlab, LT Spice.

## Abstract

*This project develops the interface of a sensor that detects liquid presence based on plastic optical fiber, having as its main objective the analysis of sensor interconnection to a wireless network using Zigbee technology. This project focuses on the use of plastic optical fiber as a sensitive element.*

*It analyzes the characteristics and limitations of a light transmitter and receiver; we present a Zigbee-based wireless network model that transmits the data obtained by the liquid level sensor.*

*It establishes the scenario for the implementation of wireless sensor network to solve a real problem. We will use a program developed in Matlab to estimate the behavior of a sensor based on a fiber to fiber light transmitted via an air interface to determine the liquid levels based on the input parameters.*

*It will describe the implementation of the wireless network and sensor, emphasizing the interfaces between the elements of the system, this includes: design criteria, block diagrams, and simulations of electronic devices used in the design of the modules composing the sensor.*

**Keywords:** Fiber Optic, Zigbee, Matlab, LT Spice.

## 1. 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 comprenda: 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.

## 2. Sensor de fibra óptica

El sensor está compuesto por tres etapas: Un transmisor que incluye una fuente de luz, una etapa compuesta por fibras ópticas que corresponden la parte sensible y un receptor que determina la cantidad de luz transmitida. Adicionalmente se tiene un espejo y una lente que optimizan la sensibilidad del sistema.

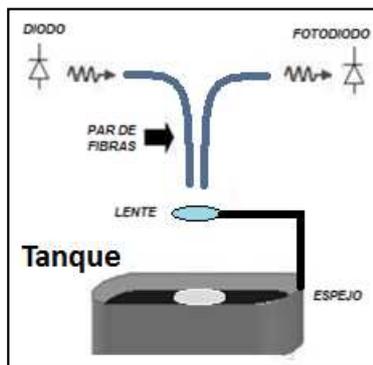


Figura 1. Sistema Sensor

### 2.1. Transmisor de luz

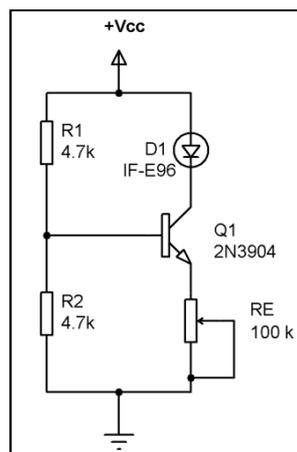


Figura 2. Circuito manejador del LED

La fuente de luz escogida consiste en un LED rojo IF-E96 que trabaja en los 660 nm. Los elementos resistivos fueron escogidos de modo que el diodo sea

polarizado sin exceder sus limitaciones aun si el transistor entrara en estado de saturación, la corriente que polariza al diodo se puede variar modificando el valor del potenciómetro presente en el emisor, la potencia óptica máxima se obtiene cuando se ajusta este elemento alrededor de los 90 ohmios.

La eficiencia externa del IF-E96 es de aproximadamente el 20% bajo condiciones normales de temperatura y humedad[1], es decir que más o menos la quinta parte de la potencia eléctrica que polariza al LED se transformaría en potencia óptica.

El acople del diodo con la fibra en el transmisor y el receptor se realiza por medio de un empaque hecho de PBT (Polybutylene terephthalate), este aloja por completo al LED y la fibra y contiene en su interior un micro lente que colima los rayos hacia el centro para que la mayor cantidad de luz sea acoplada en la fibra.

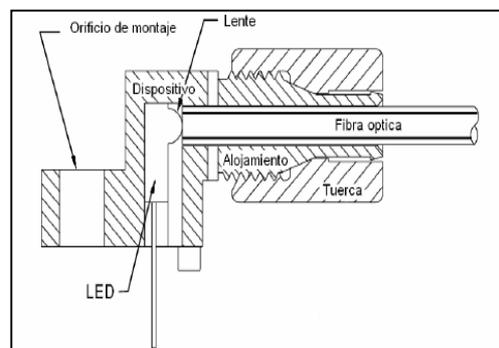


Figura 3. Acople del Led con la Fibra

### 2.2. Fibra óptica

En el trayecto en que la luz viaja a través de la fibra se producen pérdidas por atenuación, dispersión y otros factores que suman alrededor 0.15dB, estas junto con las pérdidas producidas por los acoples que también suman alrededor de 0.1dB se consideran despreciables ya que los tramos de fibra son pequeños y pueden reducirse aún más si se recorta la longitud de los tramos de fibra y se realiza un pulido de la región de la fibra que se acopla con el LED.

Sin embargo al final de la fibra transmisora se producen pérdidas por reflexión cercanas al 3.8% de la luz emitida desde el LED. Luego la luz viaja en el aire hasta encontrarse con una lente donde la luz es colimada, y posteriormente alcanza la superficie del líquido donde se encuentra ubicado un espejo con la finalidad de aumentar la intensidad de luz reflejada, los rayos son enviados de regreso hacia la lente y parte de ellos ingresa en la fibra receptora.

La cantidad de luz que se transmite en este trayecto puede calcularse como la suma de la intensidad que incide en el plano de la región que comprende el núcleo de la fibra receptora a una distancia  $2h$  de las fibras donde  $h$  representa la distancia entre las fibras y

el espejo[2]. Para este análisis hemos omitido la lente con fines explicativos.

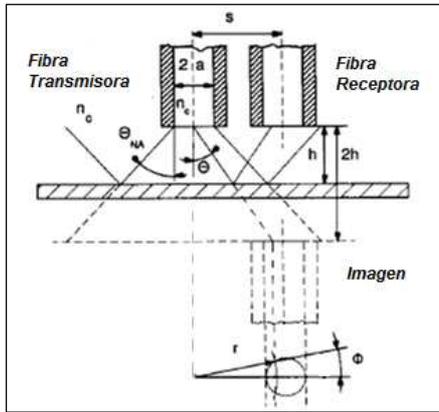


Figura 4. Sensor de reflexión de Fibra Óptica[2]

La potencia obtenida en la dicha región se obtiene por medio de la siguiente expresión:

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

Donde  $r$  es la distancia desde el centro de la fibra transmisora,  $\phi$  es el ángulo azimut y  $R$  es el radio del cono de luz a la distancia  $2h$ .

$$R = a + 2h \cdot \tan \theta$$

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

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

El factor de eficiencia  $\eta(2h, n_o)$  se define 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  $P_t$ :

$$\eta(2h, n_o) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{\phi_c} R_m T_i(n_o) T_o(r, 2h, n_o) \cdot I(r, 2h) \cdot r \, d\phi \, dr$$

donde  $\phi_c = \arccos((s^2 + r^2 - a^2)/2as)$

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:

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

$$T_o(r, 2h, n_o)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(2U)\text{sen}(2V)}{\text{sen}^2(U+V)\text{cos}^2(U-V)}$$

$$+ \frac{\text{sen}(2U)\text{sen}(2V)}{\text{sen}^2(U+V)}$$

donde  $U = \arctan\left(\frac{r}{2h}\right)$

y  $V = \arcsen((n_o \text{sen}(U))/n_c)$

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:

- $R_1=0$  y  $R_2=0$  cuando  $R \leq s-a$
- $R_1=s-a$  y  $R_2=R$  cuando  $s-a < R \leq s+a$
- $R_1=s-a$  y  $R_2=s+a$  cuando  $R > s+a$

### 2.3. Receptor de luz

El receptor dispone de un fotodiodo PIN IF-D91 que puede reconocer señales en el rango de los 400 nm a los 1100 nm. Presenta una responsividad de  $0.2 \mu A/\mu W$  alrededor de los 632 nm, su corriente de oscuridad es de 60 nA.

Este circuito permite obtener una señal de voltaje a partir de la señal proveniente del fotodiodo en términos de corriente por lo que actúa como un dispositivo de transimpedancia[3].

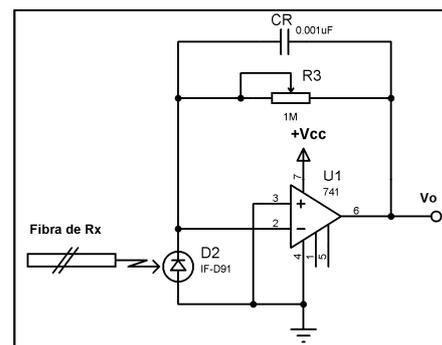


Figura 5. Receptor de luz

Por la naturaleza del fotodiodo el receptor se comporta de dos maneras.

Cuando no incide luz sobre él, solo la corriente oscura circula a través del fotodiodo, debido a la gran impedancia que posee el Opamp esta corriente no puede ingresar por los pines de entrada del mismo, quedando como única opción el camino donde se encuentra el potenciómetro  $R_3$ , esta corriente es muy

pequeña y no produce un incremento significativo en la salida de voltaje  $V_o$ .

De otro modo cuando la luz incide en el fotodiodo, se genera a través de él una corriente en sentido inverso que produce en el potenciómetro R3 una diferencia de voltaje, de modo que en la salida  $V_o$  se presenta un incremento proporcional a la cantidad de luz incidente en el fotodiodo.

La corriente generada en el fotodiodo cuando la luz incide en él puede calcularse por la siguiente expresión:

$$I_{pd} = P_i \cdot \mathcal{R}$$

Donde  $P_i$  representa la potencia óptica incidente y  $\mathcal{R}$  es la responsividad del fotodiodo. El voltaje a la salida se obtiene por:

$$V_o = I_{pd} \cdot R_3$$

De modo que:

$$V_o = P_i \cdot \mathcal{R} \cdot R_3$$

Así, la salida queda en función de la potencia óptica que proviene del transmisor.

### 3. Red Zigbee

Analizando las características de los contenedores industriales, se bosquejó el diseño de un conjunto de seis cilindros almacenadores de una empresa dedicada a la elaboración de refrescos. 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 mayores temperaturas, hasta  $70^\circ \text{C}$ .

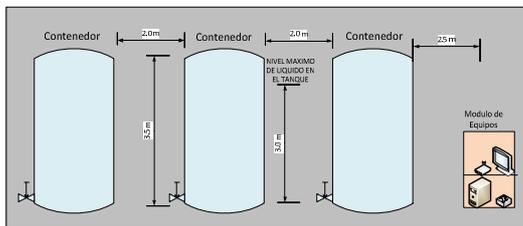


Figura 6. Esquema en vista lateral del entorno

La tipo de red Zigbee planteada para el conjunto de sensores será de tipo estrella, es decir punto a multipunto, donde solo el coordinador de red puede empezar la comunicación.

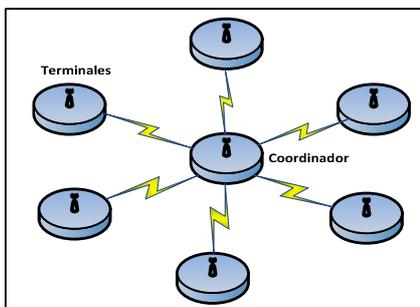


Figura 7. Esquema generalizado de la red de sensores

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.

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.
- Acoplar los niveles de tensión para la comunicación entre los distintos dispositivos de nuestra red.

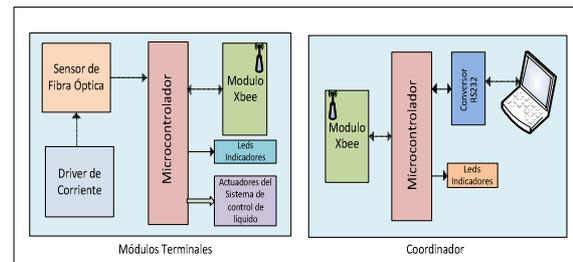


Figura 8. Diagrama de bloques del sistema

#### 3.1. Configuraciones en los módulos Zigbee

Los módulos Xbee[4] 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 CHANNEL ID.

Utilizaremos direcciones de 16 bits en todos los módulos, 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 =  $9600\text{bps}$ . Todos estos parámetros se pueden configurar de manera simplificada con el software X-CTU[4] de libre acceso.

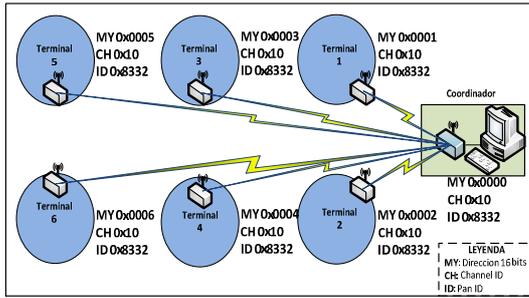


Figura 9. Diagrama detallado de red

### 3.2. Comunicación entre elementos de la red Zigbee

Para la comunicación entre los dispositivos del prototipo se deberá establecer un protocolo de comunicación, el cual permitirá interpretar los datos enviados y recibidos por cada módulo respectivamente.

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[5]. En la red, el control de errores se realiza mediante software, esto es comparando el checksum recibido y el checksum calculado del protocolo de comunicación a utilizarse.

### 4. Simulaciones

Del circuito transmisor nos interesan dos aspectos, que funcione correctamente y que la potencia de polarización del diodo sea la máxima. Los circuitos electrónicos del presente proyecto se han simulado utilizando el software LT Spice[6] de libre acceso.

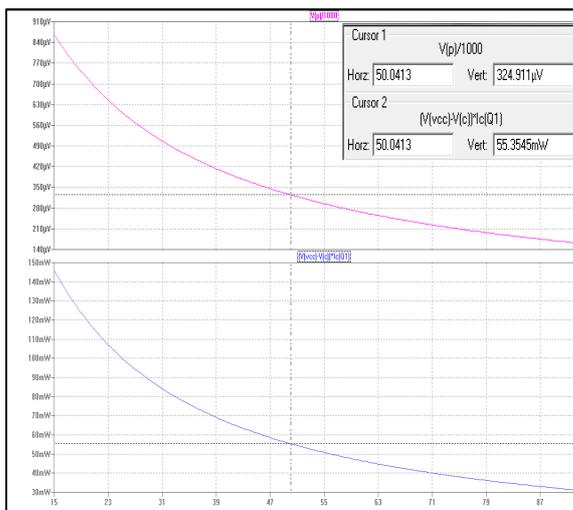


Figura 10. Potencia Óptica de salida y Potencia Eléctrica vs Re

Al fijar el potenciómetro del emisor 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. La figura 10 muestra la relación entre la potencia de salida del diodo emisor de luz y la resistencia de emisor que regula la intensidad del mismo.

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  $P_{opt} \approx 325 \mu W$ , equivalente a  $P_{opt} = -4.88 dBm$ .

El análisis del comportamiento de la luz a través de la fibra del transmisor, del aire y retorno a la fibra del receptor óptico, corresponde a un análisis matemático descrito en la sección 2 de este informe. Este comportamiento fue simulado usando el entorno de Matlab[7].

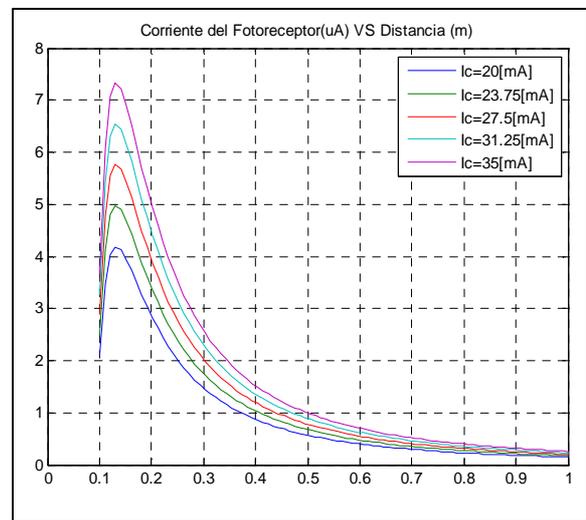
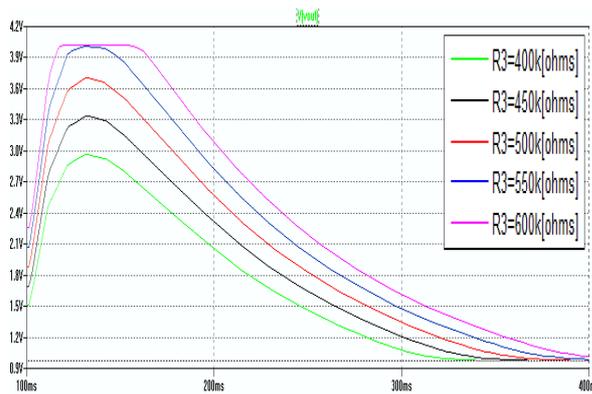


Figura 11. Resultados obtenidos en Matlab

La figura 11 muestra las curvas obtenidas para diferentes corrientes de polarización al variar un potenciómetro presente en el emisor del driver de corriente, ver figura 2. 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.

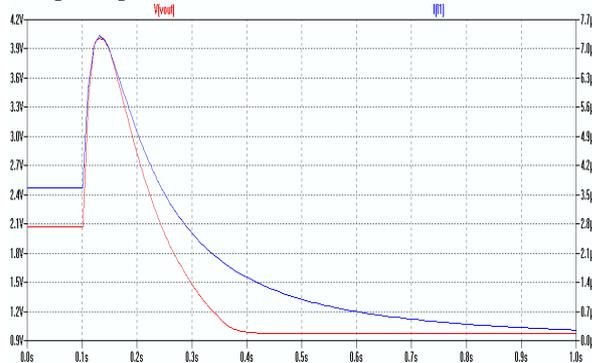
Los datos obtenidos en Matlab serán exportados a un documento de texto para poder incluirlos dentro del simulador LT Spice, donde emularemos el comportamiento del amplificador de transimpedancia utilizado como receptor óptico.

Para verificar el valor máximo del resistor de retroalimentación que puede ser usado en el circuito receptor hemos realizado un barrido para diferentes valores de resistencias obteniendo los siguientes resultados:



**Figura 12.** Resultados obtenidos en LT Spice para el receptor óptico.

Cuando el valor del resistor de retroalimentación  $R_3$  es de  $550\text{k}\Omega$  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 13.** Voltaje a la salida del amplificador y la corriente del fotodiodo

En la figura 13 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

## 12. Conclusiones

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 han sido realizadas con datos obtenidos del datasheet del fabricante y son la base para la implementación de una red inalámbrica de sensores con alta escalabilidad.

El uso de elementos como lentes y espejos se acopla 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.

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.

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

## 13. Recomendaciones

Para mejorar la distancia que puede ser medida con el sensor aquí propuesto, se debería considerar el uso de diodos más potentes como el fotodetector avalancha o inclusive diodos láseres.

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 periódicamente.

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 configurable en los microcontroladores.

## 14. Referencias

- [1] S.O. Kasap, Optoelectronics and Photonics Principles and Practices, Prentice Hall, 2001.
- [2] A. Suhadolnik, A. Babnik, J. Možina, Optical Fiber Reflection Refractometer, University of Ljubljana, 1995.
- [3] Borbor José, Molineros Jorge, Proaño Gabriel; Kit de entrenamiento sobre la transmisión de señales a través de fibra óptica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2007.
- [4] Digi International Inc., <http://www.digi.com>
- [5] 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.
- [6] Linear Technology, <http://www.linear.com/designtools/software/>
- [7] The MathWorks Inc, <http://www.mathworks.com/products/matlab/>