

# **Ra Ximhai**

Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo  
Sustentable

Ra Ximhai  
Universidad Autónoma Indígena de México  
ISSN: 1665-0441  
México

2014

## **SISTEMA DE CONTROL INALÁMBRICO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN EN CALDERA INDUSTRIAL**

Gerardo Cázarez-Ayala; Jesús Sallas-Armenta; Hugo Castillo-Meza; Antonio  
Rodríguez-Beltrán; Sócrates Lugo-Zavala y Miguel Ramírez-Montenegro  
Ra Ximhai, Enero - Junio, 2014/Vol. 10, Número 3 Edición Especial  
Universidad Autónoma Indígena de México  
Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa. pp. 39- 53



**e-revist@s**

## SISTEMA DE CONTROL INALÁMBRICO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN EN CALDERA INDUSTRIAL

### WIRELESS CONTROL SYSTEM: DESIGN, DEVELOPMENT AND APPLICATION ON INDUSTRIAL BOILER

Gerardo Cázarez-Ayala<sup>1</sup>; Jesús Sallas-Armenta<sup>2</sup>; Hugo Castillo-Meza<sup>1</sup>; Antonio Rodríguez-Beltrán<sup>1</sup>; Sócrates Lugo-Zavala<sup>1</sup>; Miguel Ramírez-Montenegro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Profesor Investigador, Instituto Tecnológico de Los Mochis, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Blvd. Juan de Dios Batiz y 20 de Noviembre S/N, Los Mochis, Sinaloa. <sup>2</sup>Alumno residente profesional del Instituto Tecnológico de Los Mochis.

#### RESUMEN

Este trabajo de investigación y desarrollo tecnológico tiene como finalidad el diseño y construcción de una unidad de control con capacidad de comunicación en red inalámbrica y cableada, con la finalidad de desarrollar una unidad de control de procesos poderosa, fácil de utilizar, flexible y bajo costo, a través de la cual, sea posible el implementar sistemas de control distribuidos inalámbricos y cableados basados en topologías de red avanzadas como estrella, árbol y malla, dado las diferentes tecnologías de comunicación que hoy en día se manejan en el campo de la automatización de procesos industriales y tomando referencia de las más novedosas y prometedoras ventajas de las tecnologías de avanzada disponibles en el mercado internacional.

El sistema incluye el desarrollo de un driver de comunicación en dos capas, el cual fue desarrollado bajo la plataforma del microcontrolador ATmega 328 con bootloader *Arduino* y la capa superior en ambiente de desarrollo LabVIEW, con la finalidad de facilitar al usuario el desarrollo de la aplicación de control y lograr que las tareas de comunicación entre las unidades de control y cuarto de supervisión sean completamente transparentes para el programa del usuario.

**Palabras Clave:** Red de sensores inalámbricos, topología en Malla, wifi, zigbee.

#### SUMMARY

This paper has as objective to describe the design and development of a control unit with capacity to communicate with similar others units in a wireless and wired way, this with the finality of achieve to develop a powerful control unit, useful, flexible and cheap, through it be possible the implementation of distributed control systems in a wireless and wired way based in advance network topologies, like star, cluster tree and mesh, in function of the diverse communication technologies that in these times are manage in the industry process automation field and having as reference the most novelties and promising advantages of the last technologies available in the international market.

The system includes a software communication driver; develop to operate in the control unit and the PC level. This driver was implemented in two layers structure, the first one, was develop under the platform of the microcontroller based the electronic board implemented, an ATmega 328 microcontroller with an *Arduino* bootloader. The second layer of the driver is based in LabVIEW platform under Windows operating system, and this work in a personal computer. All this, with the main objective of to prove to the user a technology tool to develop task communication between the control units network and the control room and do easier the implementation of the network communications and graphical users interfaces GUI's, and transparent for the developer of the system or the programmer of the network.

**Keywords:** Wireless sensor network, mesh topology, wifi, zigbee.

#### INTRODUCCIÓN

En la unidad de control multiprotocolo desarrollada se cuenta con comunicación vía enlaces Ethernet, WIFI y Zigbee, estos han sido seleccionados por tener un gran campo de aplicaciones no solo en las industrias, sino también en cualquier lugar donde se requiera una comunicación efectiva de transferencia de datos, control y monitoreo de procesos en diversas aplicaciones como: invernadero, líneas de producción, espacios inteligentes, etc.

Hoy en día existen muchos dispositivos que presentan características muy alentadoras y demasiado llamativas para la comunicación, control y monitoreo de procesos industriales, pero están limitados muchos de ellos a solo tener la ventaja de manejar un protocolo de comunicación y algunos no tienen la opción de manipular variables, es decir, solo operan como sistemas de monitoreo y adquisición de datos y no actúan sobre un proceso. Este sistema para el control y monitoreo de procesos industriales, ofrece una amplia opción de protocolos de comunicación inalámbricos y cableados y sobre todo estandarizados en la industria del control y

equipos de cómputo, lo cual, presenta la gran ventaja de que existan otros equipos de control y supervisión de procesos que operan basados en estos protocolos que puedan ser integrados a este sistema. Además, la unidad de control cuenta con un microcontrolador ATmega 328, mediante el cual se pueden programar las rutinas de automatización que permitan la medición de las variables del proceso industrial, el proceso de la información de los sensores y la actuación o manipulación de la variables mediante servomecanismos con dicha finalidad. Así mismo, su tamaño es pequeño, práctico y fácil de instalar en áreas donde los requerimientos de espacios son limitados, por lo cual este dispositivo tiene la ventaja de dar una gran solución a muchos de los problemas o necesidades en diferentes áreas como la automatización de procesos industriales y de transformación, monitoreo y medición de variables físicas en ambientes naturales protegidos, automatización de procesos de producción en invernaderos, granjas avícolas y otros tipos, implementación de espacios inteligentes, aplicaciones de ahorro y aprovechamiento de la energía y otros recursos naturales, robótica y muchos más. Destacan de este sistema electrónico, la capacidad de comunicación inalámbrica en protocolos de comunicación Zigbee y WiFi, mediante los cuales es posible la implementación de topologías de red avanzada como malla (Mesh) y árbol (cluster tree), además, de su interfaz de comunicación cableada Ethernet para topologías estrella y árbol de alta velocidad. En el *Cuadro 1* se describe las características y ventajas principales de cada uno de los tres protocolos de comunicación soportados en este sistema.

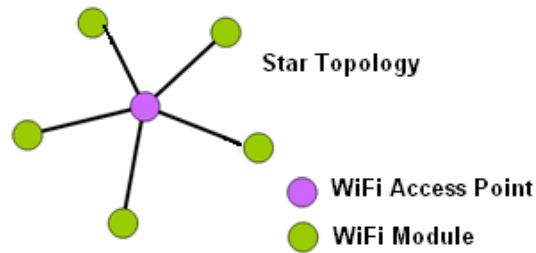
**Cuadro 1.- Comparativo protocolos**

Protocolo	Métrica de éxito	Descripción
Zigbee	Ahorro de energía	-10nA modo IDLE, 1mW activo Rx/Tx, topología en
	Cobertura amplia	Malla, nodos actúa como repetidor, cobertura extensa
	Bajo costo	.
WiFi	Ancho de banda	Alta velocidad hasta 54 Mbps (ver G). goza de aceptación
	Presencia en mercado	en mercado
Ethernet	Gran ancho de banda	Vel. +100/1000 Mbps, muy confiable, robusta, presencia
	Estabilidad	en el mercado, aprovecha infraestructura instalada,
	Aceptación del mercado	posibilidad de energizar a través mismo cable datos.
	Power Over Ethernet	

De igual manera, se destacan los recursos que proporciona la unidad de control, el cual es capaz de operar con un máximo de seis (6) variables analógicas, con capacidad de monitoreo y control si se desea, para esto, se dispone de ocho (8) entradas-salidas digitales programables según los requerimientos de la aplicación, ya sea para sensar variables digitales o actuar servomecanismos para manipular alguna de las variables en el proceso bajo control o prueba, agregamos a esto, la ventaja de su pequeño tamaño de apenas 9 x 8 cms., lo cual nos permite colocar esta unidad en espacios limitados.

#### *Protocolos de comunicación*

El protocolo de comunicación WiFi o IEEE 802.11 b/g es un estándar de comunicación inalámbrica y es orientado a la implementación de aplicaciones de adquisición de datos, medición y control de procesos, así como aplicaciones para compartir datos multimedia. WiFi como es comúnmente conocido por la mayoría de las personas, nos provee de características especiales y únicas, como son: gran ancho de banda, altas velocidades de transferencia de datos, confiabilidad y robustez de las aplicaciones desarrolladas, y por supuesto su popularidad en el mercado. Bajo este protocolo es posible alcanzar velocidades de 11 y 54 Mbps con las especificaciones /b y /g respectivamente soportadas por el módulo *WIZ610wi* utilizado en el desarrollo de este sistema y el cual opera a nivel del microcontrolador en la unidad de control.



**Figura 1.-** Topología en Estrella para WiFi.

Este dispositivo controlador de comunicaciones inalámbricas bajo el protocolo WiFi contiene embebidas en hardware las capas física (PHY) y de medios de accesos (MAC), del módulo de radio frecuencia y como en la gran mayoría de los protocolos de comunicación inalámbrica la capa de medios de acceso MAC es responsable de coordinar los accesos a uno de los canales de radio frecuencia compartidos por los dispositivos inalámbricos y módulos de comunicación en la red.

En la *Figura 1*, se observa la topología de red en *estrella*, la cual puede ser implementada por este sistema utilizando el puerto de comunicación WiFi implementado a través del controlador de comunicaciones WIZ610wi. En este caso, el rango de cobertura estará limitado a la potencia del punto de acceso inalámbrico (Access Point), la cual es de aproximadamente 100 metros de radio en interiores, dependiendo esto de los obstáculos en el edificio, como lo son paredes, divisiones de cristal, etc. y 400 metros para aplicaciones en el exterior en línea de vista.

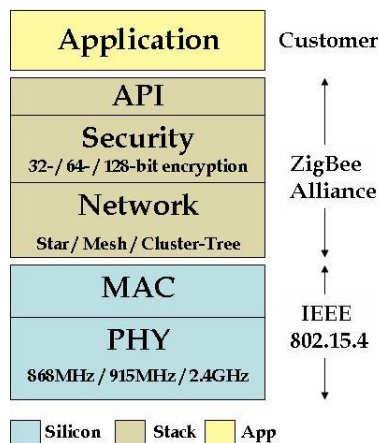
Es posible extender esta cobertura mediante el uso de dispositivos extensores o repetidores de señal de radio para WiFi, lo cual agrega una connotación a la topología de red en estrella, obteniendo como resultado una topología de árbol, la cual es más eficiente, pero afecta la velocidad de transferencia de la red e incrementa el costo debido al uso de dispositivos extraordinarios como los repetidores de señal.

### *Zigbee*

Es un protocolo de comunicación inalámbrico abierto y definido por *Zigbee Alliance*, un grupo de grandes empresas con la finalidad de definir una especificación para la comunicación inalámbrica con el objetivo de estandarizar sus características, entre los principales promotores de este protocolo se encuentran *Motorola*, *Honeywell*, *Samsung* y *Phillips*. Este protocolo presenta importantes características como velocidad de transferencia, facilidad de implementación de topologías de red en malla y robustez y confiabilidad, así como los niveles de consumo energético más bajos entre los controladores de comunicaciones disponibles en el mercado, las cuales lo hacen ver prometedor en aplicaciones de monitoreo de ambientes naturales y control de procesos industriales, en los cuales no se requiera una gran capacidad en la transmisión de datos en cuanto a velocidad y cantidad de los mismos. Zigbee opera sobre las bandas de frecuencias portadoras libres ISM en los rangos de 800-900 MHz y 2.4 GHz y cuenta con un ancho de banda máximo de 250 Kbps. A diferencia de otros protocolos, Zigbee fue diseñado para la comunicación de datos exclusivamente, debido a su bajo ancho de banda está dirigido a aplicaciones de bajo niveles de transferencia de datos y bajo consumo energético.

Zigbee se destaca sobre otros protocolos de comunicación por el nivel de energía tan bajo requerido para trabajar, lo cual era una de las principales requerimientos de los fabricantes, en función de ser un protocolo de comunicación inalámbrica orientado a aplicaciones de redes de sensores inalámbricos, sistemas de adquisición de datos para el monitoreo y supervisión de ambientes naturales, en los cuales, no existen fuentes de energía tradicionales y la mayoría de sensores requerirían energizarse con la misma batería que los nodos. Por otro lado, velocidades de transferencias de datos elevada no es crítico en Zigbee, esto en función de las aplicaciones de

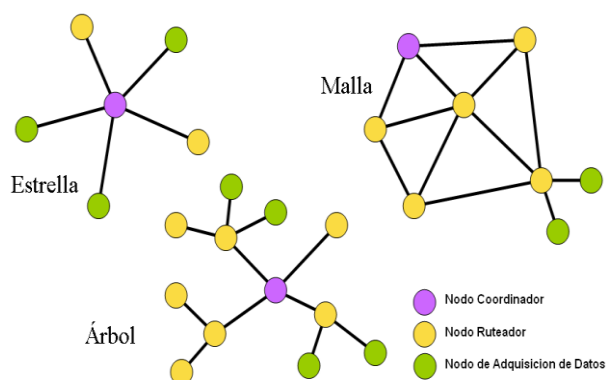
control y monitoreo de datos con baja demanda de información, en Zigbee un paquete de datos útiles apenas puede llegar a contener una veintena de bytes, por lo cual, la tasa de transferencia que se maneja a 250 Kbps para este protocolo es suficientemente superior a los requerimientos, esto comparado con otros protocolos inalámbricos como WiFi, donde los paquetes de datos son del orden de Kbytes o MBytes y debido al tipo de aplicación de transferencia de datos multimedia, voz, sonido, video, etc.



**Figura 2.-** Arquitectura de Zigbee.

La arquitectura básica del protocolo de comunicación puede observarse en la *Figura 2*, en la cual destacan tres áreas importantes. La primera de ellas, es la referente a la implementación de las capas física (PHY) y de medios de accesos (MAC), ambas están implementadas en hardware y representan el módulo de radio comunicaciones. La segunda área general de esta arquitectura es la referente a la especificación Zigbee, la cual como se muestra en la *Figura 2* esta implementada en software y estas capas o Zigbee, actúan como interface entre el software del usuario o aplicación de control y el controlador de radio frecuencia.

Tal como se puede observar en la *Figura 2*, Zigbee es una especificación de firmware (software) que agrupa un conjunto de rutinas para realizar y automatizar tareas específicas de inicialización de la red, configuración de la topología a implementar, adjuntar dispositivos a la red, manejar la comunicación entre dispositivos en la red, establecer la seguridad de la red en diversos niveles, para con esto, proveer al usuario o programador una herramienta para el manejo del radio (hardware). Para esto, Zigbee establece un grupo de funciones de interface al Stack o librería, las cuales pueden ser invocadas o llamadas desde el software de aplicación del cliente (capa de Aplicación), nótese también que al ser Zigbee una especificación de software este requiere un protocolo que opere el nivel de hardware, dicho protocolo es el estándar IEEE 802.15.4 de dicha organización.

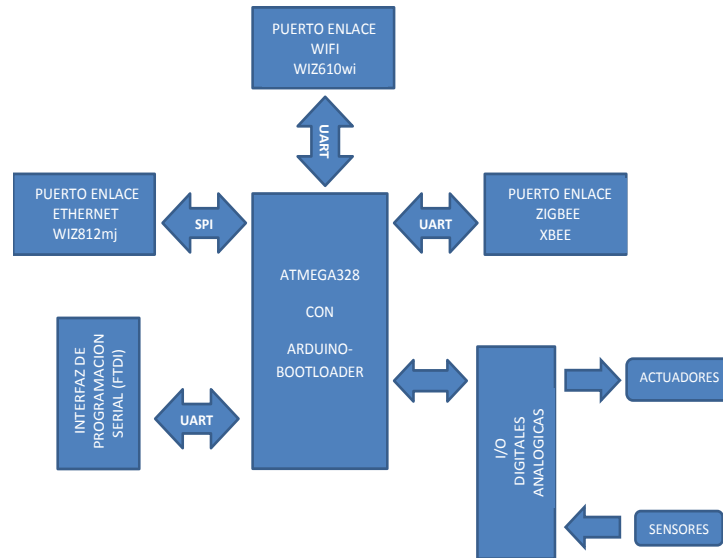


**Figura 3.-** Topologías de red en Zigbee.

En la *Figura 3* se ilustran las diversas topologías de red que pueden ser implementadas en Zigbee, destaca la topología de malla (Mesh, en la esquina superior derecha) en la cual las rutas de comunicación entre dispositivos pueden ser diversas, en función de que el coordinador de la red determine el ahorro energético en dicha transferencia de datos basado en el origen y destino de dicho paquete de información.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las etapas de diseño e implementación de la unidad de control con capacidad de comunicación en múltiples protocolos fueron realizadas en el laboratorio de Ingeniería Electrónica del ITLM, las cuales iniciaron después de una exhaustiva investigación documental que consideró el estudio del estado del arte en tecnologías de la comunicación inalámbrica y cableada en los diversos protocolos de comunicación. Asimismo, se consideraron algunos otros protocolos de comunicación, los cuales fueron desechados como resultado del análisis que se llevó a cabo, en el cual se determinó que al no ser estándares de la comunicación, abiertos a cualquier fabricante de este tipo de dispositivos y sistemas de control, era poco conveniente el considerar sean implementados en esta unidad a desarrollar.



**Figura 4.-** Arquitectura general de la unidad de control diseñada.

Por otro lado, dichos dispositivos deberían estar disponibles en el mercado internacional y a precios razonables, garantizando con esto la producción en masa o duplicación de nuestro sistema. Con estas consideraciones, diseñamos un sistema con las siguientes características:

1. Capaz de trabajar en forma colaborativa con otras unidades similares.
2. Cuenta con interfaces de comunicación inalámbrica WiFi y Zigbee.
3. Soporte redes de trabajo Ethernet.
4. Soporte hasta 6 canales analógicos.
5. Entradas-salidas digitales programables en niveles de 0 y 5 volts.
6. Interfaz de comunicación serial USB.
7. Provea de los niveles de voltaje adecuados para energizar sensores utilizados.
8. Sea capaz de operar como un sistema de adquisición de datos y/o implementar acciones de control de procesos en sitio.
9. Se base en un microcontrolador ATmega 328 programable en el circuito.
10. Cuenta con un driver de comunicación para la implementación de las redes y comunicación con cuarto de control.

En la *Figura 4* se ilustra el diagrama de bloques del diseño desarrollado, en esta, se puede observar como unidad central del diseño un microcontrolador ATmega 328 *Arduino* y puertos de comunicación inalámbricos Zigbee y WiFi, así como puerto Ethernet. También destaca una interface serial USB y el módulo de entradas-salidas para conexión de sensores y actuadores.

#### *Enlace WiFi*

Para dotar al sistema de un puerto WiFi se utilizó el módulo *WIZ610wi* de la empresa coreana Wiznet, este módulo proporciona un puente entre comunicación UART a inalámbrica IEEE 802.11 b/g. Este módulo posee el Stack de TCP/IP implementado en hardware y cuenta con un conector U.FL para conectar una antena externa.

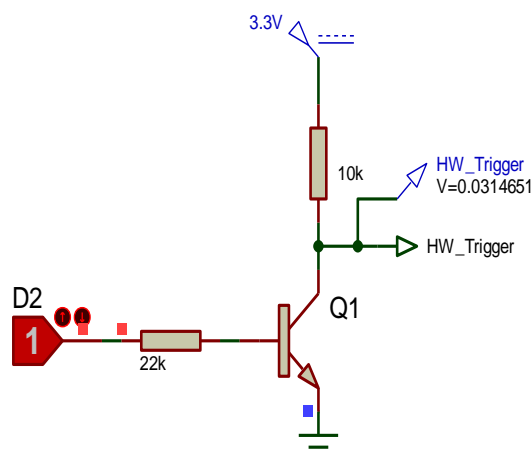
Para la interfaz serial UART es necesario el uso de dos pines de cada dispositivo transmisión TX y recepción RX, y tierra en común.

Este tipo de interconexión se hizo dentro del circuito impreso. El uso del puerto UART del microcontrolador no se utilizó solo para propósitos de comunicación con este módulo, posteriormente se aclara el porqué de ello. El módulo *WIZ610wi* opera a 3.3V y no es capaz de soportar voltajes mayores a ese, debido a ello fue necesario hacer un acondicionamiento especial para la interfaz entre este módulo y el microcontrolador.

El módulo *WIZ610wi* puede ser configurado de forma serial o inalámbrica, para poder ser configurado de forma serial es necesario entrar en modo *comando seriales*. Para lograr esto, el módulo cuenta con un pin configurable especial llamado *HW\_Trigger* (Hardware trigger). A través de este pin se logra poner el módulo en modo de programación y cuando está en alto sale de este modo.

Para el diseño del sistema se optó hacerlo por medio de la unidad de control, utilizando el pin programable D2 y un acondicionamiento especial para acoplar los distintos voltajes utilizados por estos dispositivos. Este acondicionamiento consistió en un arreglo inversor utilizando un transistor BJT tipo NPN y se ilustra en la *Figura 5*.

Cuando la salida digital D2 se encuentra en estado bajo (GND) el transistor entra en corte permitiendo circular un voltaje VCE máximo, parecido al de alimentación, y por lo tanto la salida al pin *HW\_Trigger* se encuentra en un estado lógico alto y su voltaje es igual al de la alimentación.



**Figura 5.-** Control modo Programación.

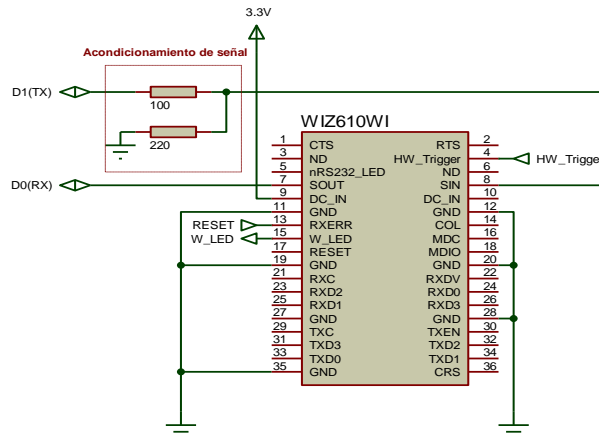


Figura 6.- Conexión módulo WiFi-micro.

Esto indica que el estado por default en el sistema del pin D2 será bajo, el modo de configuración por comandos seriales estará deshabilitado, por lo que el módulo WIZ610wi actuará como enlace entre comunicación RS232 a comunicación inalámbrica y solo cuando el pin D2 sea programado en estado alto el modo de configuración por comandos seriales estará habilitado

En la Figura 6 se ilustra el circuito de interconexión del módulo WiFi con el microcontrolador ATmega

*Enlace Zigbee*

Esta unidad de control también fue dotada de una interfaz de comunicación Xbee para proveerla con la capacidad de trabajar en redes basadas en protocolos de comunicación Zigbee, IEEE 802.15.4 y Digimesh y si deseara.

El módulo controlador de la comunicación Zigbee es el Xbee de Digi, y en su modo de trabajo más simple (modo Transparente) actúa como un transceptor de comunicaciones seriales UART TTL a inalámbricas Zigbee. Este controlador, comparte el puerto serial del micro controlador ATmega 328 con el controlador inalámbrico WiFi (WIZ610wi), debido a esto, el sistema electrónico cuenta con un selector de puerto de comunicación inalámbrica, el cual es un switch entre uno u otro controlador según se requiera. En este sentido, no es posible trabajar con ambos protocolos de comunicación inalámbrico de manera simultánea y el usuario deberá seleccionar previamente el tipo de comunicación inalámbrica en función de la red de trabajo que se implemente.

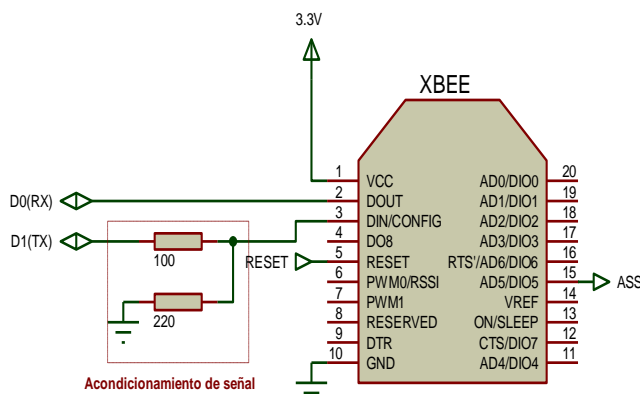


Figura 7.- Conexión Xbee-ATmega 328.



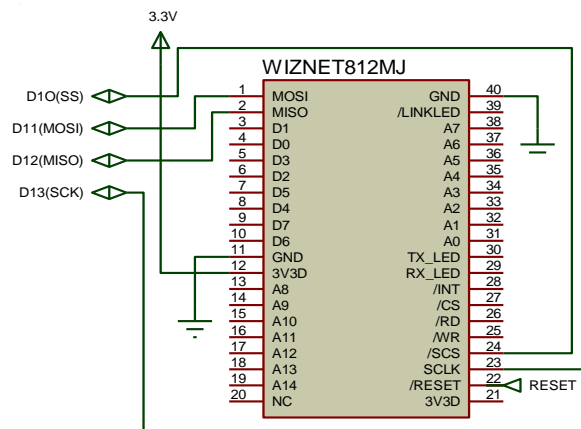
### Enlace Ethernet

En la *Figura 7*, se ilustra el diagrama esquemático de la conexión del módulo Xbee con el microcontrolador ATmega 328, destacando una conexión básica a través del puerto serial entre dichos dispositivos y el acondicionamiento de las señales de datos provenientes del microcontrolador a través de un divisor de voltaje. Lo anterior en el sentido de que el módulo de comunicación opera con niveles digitales de 0 y 3.3 volts.

Para implementar la comunicación Ethernet, se agregó un módulo WIZ812mj de Wiznet al sistema, el cual provee de un enlace Ethernet con capacidad de trabajo 10/100 Mbps y la interface de comunicación con el microcontrolador es a través de comunicación serial SPI. Este controlador fue seleccionado en virtud de que cuenta con este tipo de interface, la cual también es fácilmente implementada el microcontrolador utilizado en este diseño. Este tipo de comunicación utiliza cuatro pines de cada dispositivo SCLK, MOSI, MISO, SS y tierra en común.

Este tipo de interconexión se hizo dentro del circuito impreso y los pines utilizados por el microcontrolador fueron utilizados únicamente para el propósito de comunicación SPI entre él y el módulo WIZ812mj. El módulo WIZ812mj opera a 3.3v con tolerancia de señales de entradas y salidas a 5v y el microcontrolador opera a 5v con tolerancia de señales de entrada entre 1.8v a 5v, por lo que la interfaz entre los dos se hizo directamente.

En la *Figura 8* se ilustra el diagrama esquemático de la interconexión electrónica entre el microcontrolador y el módulo de comunicaciones cableadas Ethernet WIZ812mj utilizado en el desarrollo de este sistema.



**Figura 8.-** Esquemático módulo Ethernet.

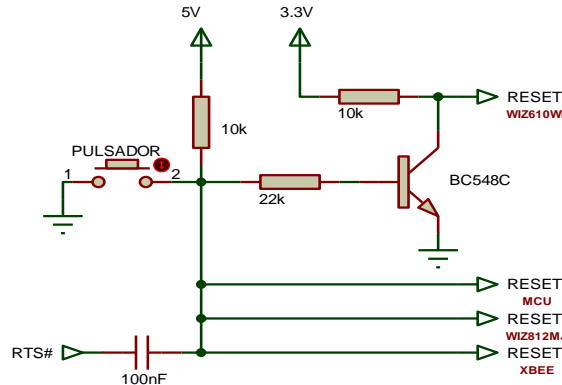
### Sistema de Alimentación

Debido a que la alimentación se puede hacer de dos formas, ya sea por vía externa por medio del conector *DC Barrel* y por vía USB por medio del conector FTDI, para esto fue necesario integrar al diseño un selector para no permitir el uso simultaneo de las dos vías y evitar se dalle la unidad. Dicho selector fue implementado en base de tres pines y un jumper que hacen posible escoger entre una alimentación del sistema ya sea vía externa o vía USB.

El diseño logrado cuenta con reguladores de voltaje de alta ganancia los cuales proveen de los niveles de 3.3 volts y 5.0 volts, con la finalidad de energizar los controladores de comunicación inalámbrica y cableada en el sistema, así como al microcontrolador o unidad central. De igual manera se proveen de salidas de voltajes en esos niveles con la finalidad de que sea posible, si se deseara, el energizar los módulos sensores externos utilizados en las aplicaciones de control y adquisición de datos.

*Circuitería de reset*

Los principales dispositivos que integran al sistema tienen la capacidad de reiniciarse y ponerse en condiciones iniciales por medio de hardware, este proceso se lleva a cabo por medio de la configuración de un pin del circuito integrado llamado “reset”. El microcontrolador, el módulo WiFi WIZ610wi, el módulo Ethernet WIZ812mj y el módulo Xbee son los dispositivos que cuentan con esta característica y es de suma importancia con motivos de establecer todos los parámetros del módulo a sus valores por defecto.



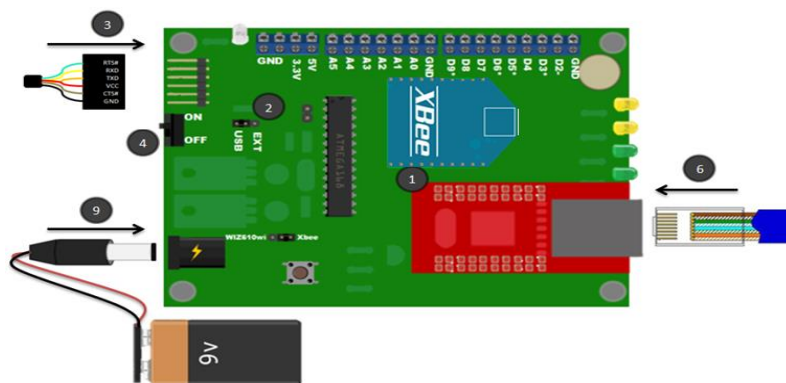
**Figura 9.-** Lógica de señal reset.

Para esto, fue necesario la implementación de un sistema de reinicio de los módulos de comunicación y el microcontrolador, el cual se integró en el diseño para llevar a cabo el reinicio del sistema mediante dos mecanismos.

Se incluyó un *push-button* o pulsador y la circuitería necesaria para modificar el estado de la señal de reset acorde a los requerimientos de cada dispositivo.

Para lograr resetear los dispositivos por software se utilizaron las características proporcionadas por el cable USB, este tipo de reinicio es necesario a la hora de programar el programa del usuario en el microcontrolador del sistema desarrollado.

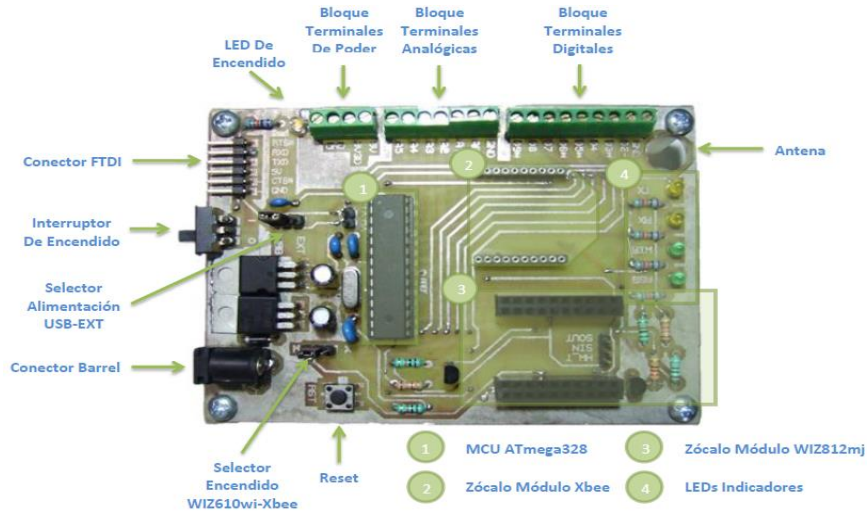
En la *Figura 9* se ilustra el diagrama esquemático del sistema de reseteo diseñado para los diferentes dispositivos en el desarrollo electrónico. Nótese que la naturaleza de la señal de reset para cada dispositivo tiene características diferentes.



**Figura 10.-** Imagen de simulación 3D del sistema desarrollado.

En la *Figura 10* se ilustra una imagen de diseño 3D de la unidad de adquisición de datos desarrollada, en la cual desatacan los principales componentes del sistema, los módulos de regulación y acondicionamiento de señales, microcontrolador y zócalos de conexión para

módulos de comunicación Ethernet y Zigbee utilizados (zócalo WiFi se encuentra en la parte posterior de la tarjeta, la cual está construida en PCB doble cara), así como bloques de terminales para las conexiones de sensores y actuadores, tanto análogos como digitales.

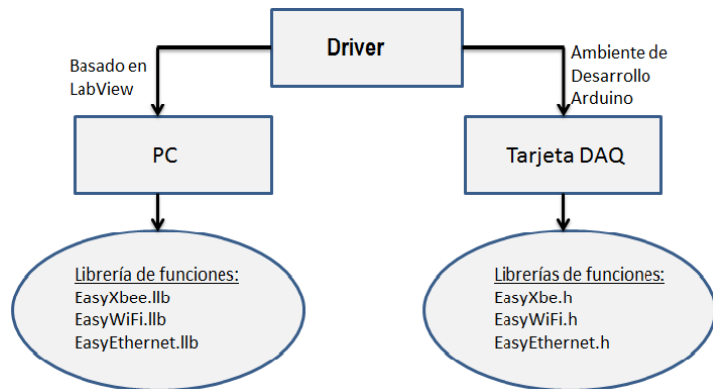


**Figura 11.-** Imagen real de la unidad de control y adquisición de datos desarrollada.

*Driver de comunicación*

El driver de comunicación es el segundo componente del sistema de adquisición de datos, este driver, a su vez está dividido en dos partes, una de ellas opera a bajo nivel y se incluye en el programa del microcontrolador *Arduino* desarrollado por el usuario como una librería de software, el cual integra un gran número de funciones que hacen posible el manejo de la comunicación a través de los controladores o módulos de comunicación WiFi, Zigbee o Ethernet. En la *Figura 12* se ilustra los componentes del Driver de comunicación desarrollado para implementar las tareas de comunicación de datos y supervisión de las variables en el sistema distribuido.

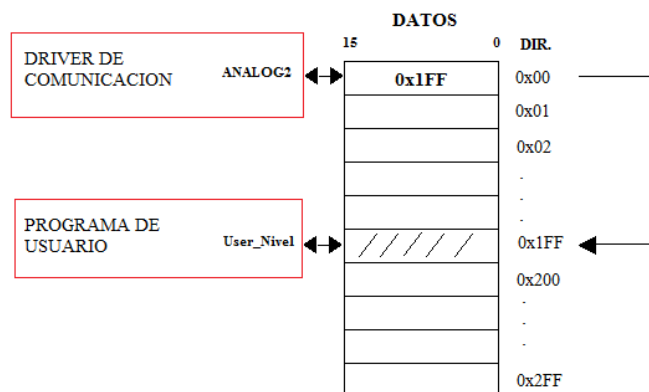
Cabe destacar, que el driver es el encargado de controlar los enlaces de comunicación según el puerto y protocolo de comunicación que se haya determinado utilizar, esto en función de las necesidades de la aplicación podría ser una red Zigbee, WiFi o Ethernet.



**Figura 12.-** Driver de comunicación.

El usuario será responsable de desarrollar su programa de adquisición de datos y/o control en función de sus requerimientos, sin necesidad de manejar la comunicación. Para esto, solo deberá incluir la librería del driver de comunicación según el enlace deseado: *EasyXbee.h* para Zigbee

o IEEE802.15.4; *EasyWiFi.h* para enlace WiFi e *EasyEthernet.h* para enlaces cableados Ethernet.



**Figura 13.-** Mecanismo asociación variables.

Una vez agregada la librería adecuada, el usuario solo tendrá que relacionar sus variables en las cuales almacena los datos de sus sensores conectados en las entradas analógicas y límites de la variable o *Setpoints*, con las variables *punteros* que utiliza el driver para acceder a los datos del usuario de forma indirecta. De esta manera, el software del usuario no se ve afectado por la operación del driver de comunicación, el cual accede a los datos de las variables a través de *punteros* y los transmite hacia la red al *nodo coordinador*, el cual puede ser un computador o consola central basada en un microcontrolador, como se ilustra en la *Figura 13*.

Cabe destacar, que mientras el usuario desarrolla su programa para el microcontrolador Arduino, sin incluir instrucción alguna para el manejo de la comunicación serial UART o SPI, solo agregando la librería adecuada, toma ventaja de las características que le proporciona el driver de comunicación desarrollado, cuyas principales tareas en la plataforma del microcontrolador son:

1. Establece los parámetros de operación de los módulos de comunicación WiFi, Zigbee y Ethernet, según se desee utilizar.
2. Detecta la red y se agrega la unidad DAQ a dicha red.
3. Responde a comandos de “*descubrimiento*” de la unidad coordinador de la red.
4. Establece la operación de muestreo de datos, generación de paquete de datos y transmisión de los paquetes de forma periódica a través de una interrupción temporizada programable en rango de 0 a 65,535 milisegundos.
5. Interpreta comandos enviados desde la unidad central: toma de muestras por demanda, establecimiento de parámetros de control como límites y setpoints, direccionamiento de unidad de control específica, etc.

La segunda componente del driver de comunicación desarrollado, es un conjunto de funciones basadas en LabVIEW 2010 de *National Instruments*. Mediante las cuales se pueden configurar los enlaces con las unidades de adquisición de datos, se pueden muestrear datos y supervisar los procesos de control, esto debido a que el driver programado en el microcontrolador reconoce comandos enviados en secuencia hexadecimal desde el computador o unidad cliente-coordinador, entre estos comandos se encuentran: establecer periodo de muestreo, establecer límites de control, leer paquete de datos, leer una variable, establecer estado de un actuador, direccionar hacia una unidad y enviar comando, etc.

## PRUEBAS Y RESULTADOS

El sistema desarrollado fue probado en el proceso de producción de vapor de agua en una de las calderas del ingenio azucarero ubicado en la ciudad de Los Mochis. En este se buscaba

monitorear las variables de la caldera con la finalidad de obtener datos del proceso de generación de vapor para su posterior análisis. Todo esto en función de que en dichas calderas se tiene una problemática de baja eficiencia, desconociéndose las causas que la generan.

Dichas calderas, presentan un problema de eficiencia cuando están trabajando en modo bagazo, ya que generan mucho menos cantidad de vapor por kilogramo de bagazo quemado, que el cual se espera, en relación con 1 litro de petróleo para generar la misma cantidad de vapor, según experimentos la relación de equivalencia de bagazo-petróleo es de 6 a 1.

Las calderas en este ingenio azucarero son del tipo *acuatubular* de horno basculante y operan con combustible combinado de petróleo y/o bagazo de caña, este último, puede llegar a tener un gran impacto en el costo de producción en función de la fibra que contiene el bagazo y el porcentaje de humedad del mismo al momento de ingresar al hogar de la caldera, es decir, a menor nivel de humedad en el bagazo, se mejora la combustión y se ocupa menor cantidad del mismo para generar la cantidad de vapor necesaria para generación de energía y proceso. El proceso de producción en el ingenio azucarero requiere de una producción de vapor de alrededor de las 210 Toneladas de vapor por hora, con lo cual se garantiza los niveles de producción de energía eléctrica requerida, de alrededor de 14,000 Kw/hr, y por ende la eficaz operación del equipo. La producción de esta cantidad de vapor de agua requerido es a través de 2 calderas, las cuales producen alrededor de 120 Toneladas/Hr cada una de ellas y 1 pequeña caldera basada en la quema de petróleo la cual se utiliza solo en casos muy necesarios en los cuales las calderas principales no pueden aportar la cantidad de vapor requerido en el proceso en algún momento preciso.

En este sentido, sabemos por datos experimentales que aproximadamente el contenido energético de 6 Kg. de bagazo proporcionan la energía contenida en 1 litro de petróleo y en el Ingenio Azucarero de Los Mochis, la cantidad de vapor requerido para la generación de 1 KW de energía eléctrica es de aproximadamente 26 Lb. de presión de vapor (11.8 Kg.), en la quema de petróleo: 1 litro proporciona entre 18 a 22 Lb. de presión de vapor (8.165 a 9.98 Kg.) y en la quema de bagazo de caña 1 Kg. de bagazo genera cerca de 2.4 Lb. (1.1 Kg.) de presión de vapor a un nivel del 50% de humedad en estas calderas, lo cual refleja claramente que en la quema de bagazo se obtiene mucho menor cantidad de vapor que en la quema de petróleo, inclusive muy por debajo de la relación de 6 a 1. Debido a esto se busca monitorear las variables del proceso de producción de vapor en la caldera para determinar las causas de esta baja en la eficiencia en la producción de vapor.

En esta prueba se utilizaron tres unidades y el protocolo de comunicación utilizado fue IEEE 802.15.4 y Zigbee, mediante los módulos de comunicación Xbee serie 2. En el *Cuadro 2* se describen las variables que se monitorearon.

Para realizar estas tareas se utilizaron los transmisores existentes en la planta, los cuales proporcionan su salida analógica en corriente en el rango de 4 – 20 mA, y fueron acopladas a las unidades mediante un acondicionador de señales *KOS 517* con salida configurada en voltaje de 0 a 5 volts.

De esta forma, se logró la implementación de un sistema distribuido basado en este sistema de adquisición de datos y driver de comunicación desarrollado con el propósito de facilitar dichas tareas y coadyuvar en el mejoramiento de los índices de productividad, calidad y eficiencia en los procesos productivos. Con esto, se logró el monitoreo de las señales no-básicas en una caldera, pero que el análisis del comportamiento de las mismas puede llevar a detectar las causas de la baja eficiencia en la generación de vapor de agua utilizando el bagazo de la caña molida y por consecuencias el alto consumo de combustibles.

**Cuadro 2.- Variables medidas en caldera**

Unidad de Control	Variable	Valores Típicos de Operación
1	Temperatura y Presión de gases de salida del hogar. Temperatura y Presión de agua de entrada al economizador.	340 °C y -2 mm CA 120 °C y 30Kg/cm <sup>2</sup>
2	Temperatura y Presión del aire de salida del precalentador. Temperatura y Presión de agua de Salida del economizador del economizador.	200 °C y 180mmCA 130 °C y 31Kg/cm <sup>2</sup>
3	Temperatura y presión de gases de salida a chimenea.	180 °C y 150mmCA

Este sistema fue implementado y probado al final de la temporada 2012 en el mes de marzo y se espera operarlo en la próxima temporada de zafra 2012-2013 y en consecuencia contar con los datos para su análisis y correlación con los indicadores de las variables principales de la caldera.

Así mismo, con la finalidad de determinar el protocolo de comunicación a utilizar y las ventajas que cada uno de ellos presenta para esta aplicación, se realizaron pruebas de comunicación y velocidad antes de su implementación y de igual forma se analizaron las demás características con la finalidad de determinar qué tipo de red y protocolo que utilizaríamos. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en cuanto a velocidad en la comunicación haciendo uso del driver de desarrollado. Dicha prueba consistió en el siguiente procedimiento. Primeramente se desarrolló una interfaz de usuario en LabVIEW mediante la cual se lanzarían los diversos comandos a las diferentes unidades de control, una vez que llegaba el comando a la unidad de control se arrancaba un temporizador con base de tiempo en microsegundo, seguidamente se procesaba el comando y al ser transmitidos los datos requeridos por el comando se detenía el temporizador y se transmitía al computador después del paquete de datos enviado como respuesta. Estas pruebas fueron realizadas en ciclos de 1000 repeticiones y cabe señalar que el tiempo que le llevaba a la aplicación de software en el computador de analizar y desplegar los datos no era considerado y tampoco afectaba la prueba. En este sentido, contábamos con el tiempo de respuesta a cada comando que llegaba a las unidades de control a partir de que estas recibían el comando en cuestión.

**Cuadro 3.- Tiempo respuesta de comandos implementados en el driver**

Protocolo Utilizado	Tiempo de respuesta rango (microsegundos)	Tiempo de respuesta promedio
Zigbee	1016 a 1020	1018 $\mu$ S
WiFi	1084	1084 $\mu$ S
Ethernet	772 a 780	776 $\mu$ S

Cabe destacar que en base a las pruebas realizadas, la ejecución de las rutinas de servicio temporizada del driver a nivel del microcontrolador Arduino, la cual se encarga de generar el paquete incluyendo todas las variables análogas, digitales y límites de operación y control, a 16 MHz. de frecuencia de trabajo, solo consume aproximadamente alrededor de 1 milisegundo del tiempo del procesador. Por lo cual podemos asumir que el driver no interfiere con el programa del usuario y no carga al controlador, ya que si suponemos que se está llevando a cabo una transferencia de datos desde la unidad hacia el coordinador o PC de tiempo estándar cada 1000 mili-segundos, esto conlleva, dedicarle tiempo del procesador al driver en una relación de 1 a 1000 respecto al programa del usuario en el microcontrolador Arduino.

## CONCLUSIONES

Respecto a los resultados podríamos concluir que el protocolo de comunicaciones cableado Ethernet, es el que presenta tiempos de respuesta menores respecto a los protocolos inalámbricos Zigbee y WiFi. Sabemos que los módulos utilizados para los 3 protocolos de comunicación presentan sus limitaciones, al tratarse de controladores embebidos de dichos protocolos de comunicación, lo cual significa que al llevarse a cabo las operaciones de transporte, ruteo y acondicionamiento de paquetes en el mismo módulo y permite utilizar estos protocolos en aplicaciones a bajo nivel como desarrollo de placas basados en microcontroladores, los rendimientos que se obtienen en cuanto a velocidad de transferencia en estos módulos son reducidos.

Aun así, estamos convencidos de que el presente sistema representa una gran oportunidad como herramienta para el desarrollo e implementación tanto de redes de sensores, sistemas de adquisición de datos o sistemas de control distribuidos en diversas topologías y tecnologías que permiten al usuario sacar provecho de la infraestructura física de telecomunicación instalada, en el caso de WiFi; bajo consumo energético y cobertura geográfica ilimitada en caso de Zigbee; banda ancha, confiabilidad y robustez de Ethernet y todos ellos en este sistema a bajo costo. Asimismo, coadyuvará en el fortalecimiento del perfil profesional del egresado de ingeniería electrónica permitiéndole enfocarse en la aplicación de control y adquisición de datos y no en las herramientas tecnológicas auxiliares para dicha tarea.

## LITERATURA CITADA

- Karl, H., Willing, A. (2005). *Protocols And Architectures For Wireless Sensor Networks*. West Sussex: John Wiley & Sons, ISBN: 978-0470095102.
- Forouzan, B. (2002). *Transmisión de datos y redes de comunicaciones*. Aravaca: McGraw-Hill, ISBN: 978-8448156176.
- Callaway, E., Gorday, P., Hester, L., Gutierrez, J. A., Marco, N., Heile, B., y otros. (2002). *Home networking with IEEE 802.15.4: A developing standard for low-rate wireless personal area network*. IEEE Communications Magazine, pages 70-77.
- Digi International, Inc. (2011). *Xbee-Pro 2.4 Digimesh RF Modules Datasheet*, Minnetonka: Digi International, Inc.
- Roving Networks. (2011). *WiFi GSX 802.11 b/g Wireless LAN Module Datasheet*. Disponible en: [http://www.rovingnetworks.com/resources/download/11/RN\\_131](http://www.rovingnetworks.com/resources/download/11/RN_131)
- Zhao, F., Guibas, L. J. (2004). *Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach*. Massachusetts, Morgan Kaufmann. ISBN: 978-1558609143.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M. (2007). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. Madrid, McGraw-Hill, ISBN: 978-9701061473.

## Síntesis Curricular

### Gerardo Cázarez Ayala

Profesor Investigador Instituto Tecnológico de Los Mochis, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Blvd. Juan de Dios Batiz y 20 de Noviembre s/n, C.P. 81279, Los Mochis, Sinaloa, México.

**Jesús Guadalupe Sallas Armenta**

Estudiante y Residente Profesional en la carrera de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Los Mochis, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Blvd. Juan de Dios Batiz y 20 de Noviembre s/n, C.P. 81279, Los Mochis, Sinaloa, México.

**Hugo Castillo Meza**

Profesor Investigador Instituto Tecnológico de Los Mochis, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Blvd. Juan de Dios Batiz y 20 de Noviembre s/n, C.P. 81279, Los Mochis, Sinaloa, México.

**Antonio Rodríguez Beltrán**

Profesor Investigador Instituto Tecnológico de Los Mochis, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Blvd. Juan de Dios Batiz y 20 de Noviembre s/n, C.P. 81279, Los Mochis, Sinaloa, México.

**Sócrates Lugo Zavala**

Profesor Investigador Instituto Tecnológico de Los Mochis, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Blvd. Juan de Dios Batiz y 20 de Noviembre s/n, C.P. 81279, Los Mochis, Sinaloa, México.

**Miguel Ramírez Montenegro**

Profesor Investigador Instituto Tecnológico de Los Mochis, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Blvd. Juan de Dios Batiz y 20 de Noviembre s/n, C.P. 81279, Los Mochis, Sinaloa, México.