

Diseño de un sistema Scada basado en labview, implementando el protocolo de comunicación inalámbrica zigbee

Design of a labview-based scada system, implementing the zigbee wireless communication protocol

Carlos Robles Algarín¹, Roger Caputo Llanos², Alfredo Sánchez Hernández³

¹Msc en Ingeniería de Control. Docente tiempo completo de Ingeniería Electrónica. Universidad Cooperativa de Colombia. Líder del Grupo de Investigación en Sistemas Electrónicos y Energías Renovables. carlos.robles@ucc.edu.co

^{2,3}Ingeniero Electrónico, Universidad del Magdalena, Santa Marta.

Recibido 28/02/11, Aceptado 15/05/2012

RESUMEN

En esta investigación se presenta el prototipo de un sistema SCADA que aprovecha las potentes características de LabVIEW y la confiabilidad del protocolo ZigBee en la comunicación inalámbrica para realizar un control eficiente y supervisión remota de los procesos de Coagulación y Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP). Se utilizó la metodología de descomposición del trabajo en fases (WBS) por su flexibilidad y facilidad para detallar en forma jerarquizada el trabajo a realizar. De esta forma se realizó una investigación exploratoria con diseño experimental que permitió hacer una integración exitosa entre hardware y software.

Los resultados demostraron la efectividad del sistema obteniéndose una perfecta sincronización entre las unidades remotas y el programa principal, una eficiente comunicación inalámbrica con los módulos ZigBee con tiempos de retardos imperceptibles y con alta inmunidad al ruido. Se logró estructurar un programa principal robusto, con una interfaz sencilla y amigable con baja demanda de recursos de cómputo para las tareas de control y visualización de los datos de temperatura y pH.

Palabras clave: SCADA, LabVIEW, ZigBee, XBee, Coagulación, Floculación.

ABSTRACT

This paper presents the prototype of a SCADA system that takes advantage the powerful features of LabVIEW and the reliability of the ZigBee protocol in wireless communication for efficient control and remote monitoring of the processes of coagulation and flocculation of a Treatment Plant Drinking Water (PTAP). The Work Breakdown Stage methodology was used for its flexibility and ease in a hierarchical detailing the work to be done. Was performed an exploratory research supported on an experimental design, which enabled the successful integration between hardware and software.

The results demonstrated the effectiveness of the system obtained a perfect synchronization between the remote units and the main program, an efficient wireless communication with ZigBee modules with imperceptible delay times and high immunity to noise. It was possible to structure a major program robust, simple and friendly interface with low demand for computing resources to the tasks of control and data display of temperature and PH.

Key Words: SCADA, LabVIEW, ZigBee, XBee, Coagulation, Flocculation.

1. INTRODUCCIÓN

El término SCADA usualmente se refiere a un “sistema central que monitoriza y controla un sitio completo” [1] o una parte de un sitio que es de interés controlar o finalmente un sistema que se extiende sobre una gran distancia. Un sistema de éste tipo comprende todas aquellas soluciones de aplicación para referirse a la captura de información de un proceso o planta industrial (aunque no es absolutamente necesario que pertenezca a este ámbito), para que, con ésta información, sea posible realizar una serie de análisis o estudios con los que se pueden obtener valiosos indicadores que permitan una retroalimentación sobre un operador o sobre el proceso mismo.

Gracias a la diversificación de tecnologías aplicadas en los SCADA, hoy en día es factible crear sistemas de monitoreo a bajo costo y con relativa sencillez a la hora de su implementación. Las posibilidades de diseño que ofrecen programas de desarrollo como LabVIEW [2], facilitan la creación de sistemas aplicables tanto a la investigación como a la industria, integrando una serie de soluciones en instrumentación y comunicación. Por esto, los SCADA constituyen hoy en día una poderosa herramienta cuando se requiere monitoreo y control de cualquier proceso industrial; contribuyen en la tecnificación de procesos críticos, mejorando la calidad en la ejecución de éstos y por ende la del producto final.

En aras de aportar una solución que permitiese monitorizar y controlar de forma eficiente los procesos de Coagulación y Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable, se constituyó un prototipo de SCADA, que hace uso de una red inalámbrica de sensores (soportada por el protocolo ZigBee [3]) para la transmisión de información y el control en sitio; el cual demuestra la viabilidad de un sistema basado en LabVIEW, integrando diversas tecnologías para la adquisición, procesamiento y transmisión de la información.

2. METODOLOGÍA

La investigación y el desarrollo realizados tienen un enfoque investigativo, cuantitativo y aplicativo a la vez, ya que todas las variables inmersas en el estudio se pueden medir lógicamente o matemáticamente, posibilitando la posterior cuantificación de las mismas y la utilización de éstas y otras variables en la obtención de los resultados deseados. En la etapa de investigación se pueden señalar claramente dos tipos de estudios realizados, uno exploratorio con el que se buscó conocer y aprehender las teorías y técnicas concernientes a los procesos de clarificación del agua en una planta de tratamiento, así como de las tecnologías aplicadas en el sistema planteado.

El otro estudio es de tipo descriptivo, el cual permitió analizar a profundidad los fenómenos que se manifiestan en las etapas de coagulación y floculación del agua; estudiar las variables que condicionan sus respuestas para así poder establecer los parámetros del control llevado a cabo.

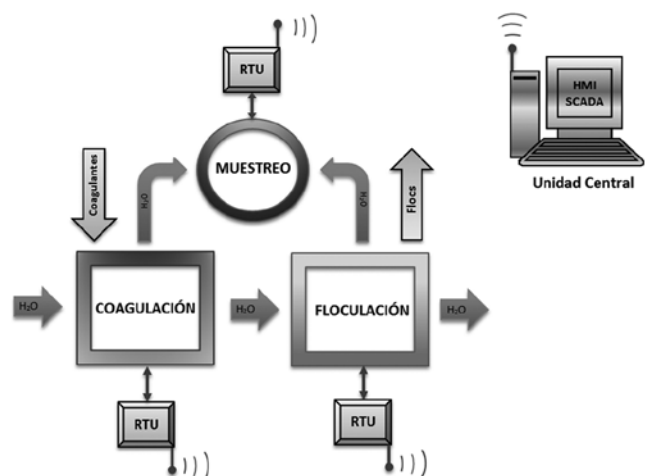
El trabajo para la construcción del prototipo se dividió en fases; según la metodología de trabajo WBS, basando la constitución y el desarrollo de estas en la Gestión de Proyectos, que es la disciplina que permite organizar y administrar recursos de manera tal que se pueda culminar el proyecto dentro del alcance, el tiempo y los costos definidos.

Planteamiento del esquema básico del sistema

Posterior al análisis de los datos arrojados por la investigación teórica realizada, se planteó el diseño general del sistema (Figura 1). Entendiendo que un sistema SCADA realiza cuatro funciones básicas (Adquisición de datos, Comunicación, Presentación de la información y Control) [4], en las que intervienen diferentes tipos de dispositivos, entre los cuales se pueden señalar tres grandes grupos que son:

- **Dispositivos de interfaz de campo.** Encargados del control en campo. Adquieren, convierten y procesan señales análogas para su posterior transmisión por medio de unidades remotas ó RTU (*Remote Terminal Units*).
- **Red de comunicación.** Concerniente a la infraestructura y logística para la comunicación entre las RTU y una central. Como medio de transmisión se utiliza fibra óptica, cobre o radio frecuencia.
- **Unidad central.** Computadora o servidor desde donde se administra la lógica del sistema. Provee una interfaz hombre-máquina y software para el control de los procesos.

Figura 1. Esquema básico del sistema.
Figure 1. Basic scheme of the system.



Las unidades remotas (RTU) están compuestas por microcontroladores y módulos ZigBee para la transmisión de la información por radio frecuencia hacia la unidad central provista de un computador que administra tanto el módulo coordinador de la red como la información del sistema. Los microcontroladores de las RTU, además de encargarse de acondicionar los datos adquiridos por los sensores, son los responsables del control en cada una de las etapas. Activan electroválvulas que permiten el flujo del agua, dosifican los químicos y manejan los motores utilizados en el mezclado y en la formación de los flóculos.

En condiciones reales el agua ha debido ser tratada previamente en un proceso de filtración para extraer las impurezas de gran tamaño. Posterior a esto, ingresa en la zona

de Coagulación para un mezclado homogéneo y rápido de los agentes coagulantes como el sulfato de aluminio, que desestabilizan las partículas microscópicas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. El flujo constante de agua hace que pase de la etapa de Coagulación hacia la de Floculación, que es dónde las partículas desestabilizadas adquieren mayor tamaño al aglomerarse formando flóculos [5]. El agua pasa a una etapa de clarificación posterior (no abarcada en el prototipo) y mientras tanto el proceso se repite desde el comienzo con el líquido que ingresa al sistema. Para facilitar la construcción del prototipo que recrea los procesos objeto de estudio, se hace uso de un punto de recolección de muestras, en dónde se analiza el agua antes y después de cada etapa, verificando la temperatura y el pH de ésta.

Figura 2. RTU de la zona de muestreo y disposición de la Unidad Central.
Figure 2. Sampling RTU and distribution of the Central Unit

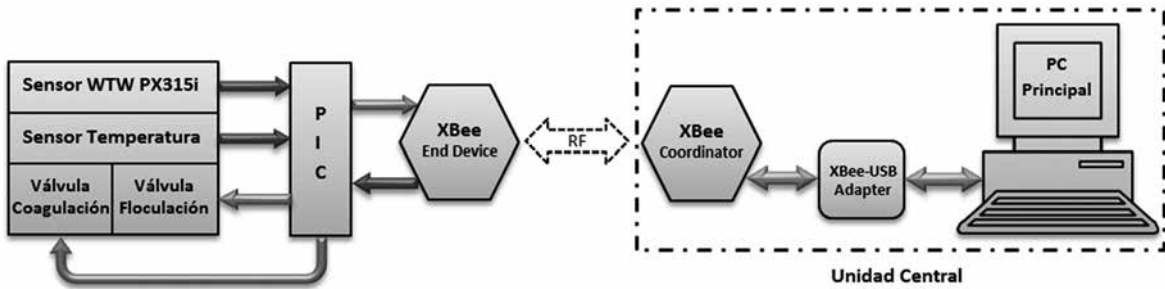
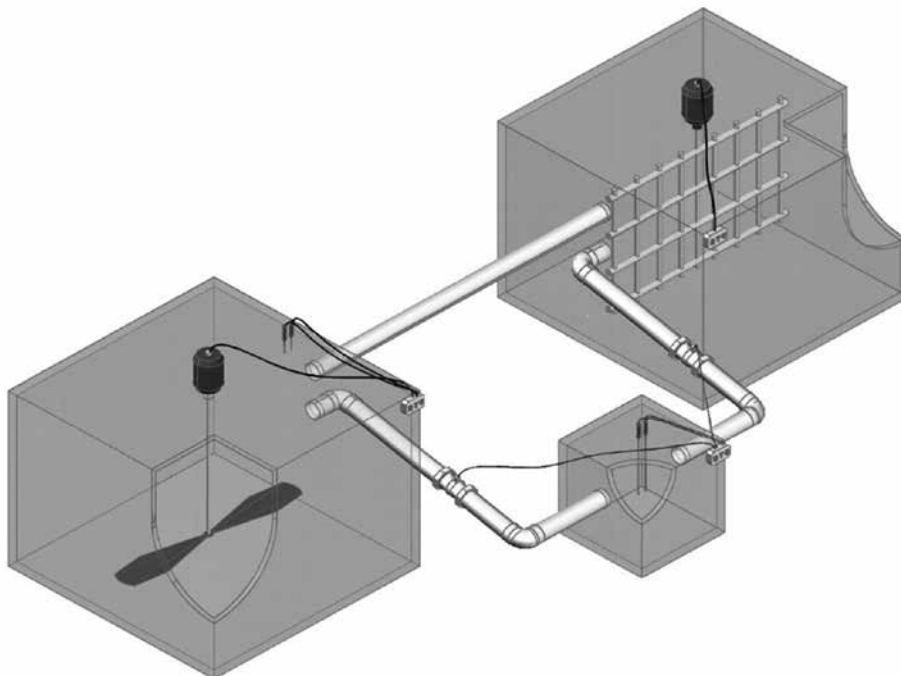


Figura 3. Distribución de los tanques de procesos y zona de muestreo.
Figure 3. Distribution of process tanks and sampling area.



En la figura anterior se muestra el tanque de Coagulación (izquierda), en el que se puede ver la disposición de la RTU a la que se encuentra conectado el motor con aspas para el mezclamiento del coagulante, así como el dosificador que lo contiene. Acoplado mediante una tubería que permite el ingreso del agua cuando ésta ha alcanzado cierto nivel en la etapa previa, se encuentra el tanque de la Floculación (derecha), aquí se muestra el motor de velocidad variable utilizado para la formación de flocs y la conexión de éste con la RTU respectiva. Además se ilustra el tanque de la zona de muestreo, su RTU con los sensores y electroválvulas para permitir el paso del agua desde cada una de las etapas.

Programación

El lenguaje de programación orientada a objetos de LabVIEW permite un ágil desarrollo del programa central, con un bajo nivel de complejidad y estructura organizada. El programa central es el encargado de la lógica de ejecución, es decir, que es en éste en dónde se dan las órdenes a las RTU para llevar a cabo cada uno de los procesos del sistema. De igual forma, en el programa de la Unidad Central se toman las decisiones con respecto a los elementos de control que intervienen en los procesos a los que se somete el agua.

Figura 4. Diagrama de flujo del programa central.
Figure 4. Flow diagram of main program.

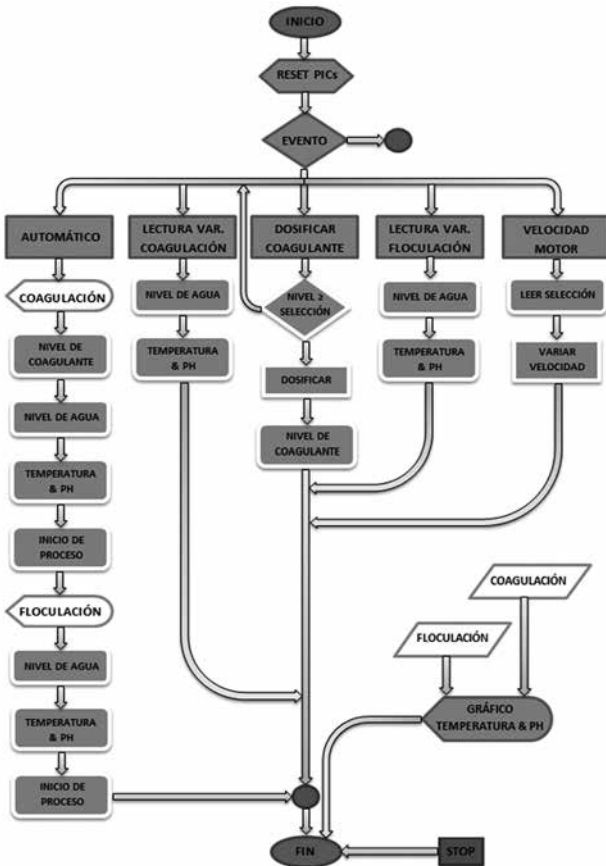


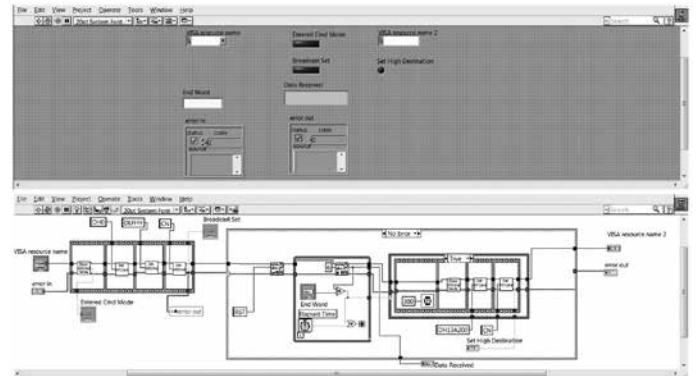
Figura 5. Flujo del sistema.
Figure 5. Flow system



En esencia, el flujo del sistema es el que se representa en la Figura 4. La lógica del programa central establece la ejecución inicial de los procesos de forma automática y siempre que no haya una acción del operario.

Se utilizan *Sub-VI* [2] para manejar ciertos procesos que son de alta importancia y que se ejecutan más de una vez. En LabVIEW, estos son similares a las funciones en los lenguajes de programación basados en texto, permiten el manejo de datos, conexiones internas y externas, realización de tareas específicas y se representan con íconos en el diagrama de bloques del programa principal.

Figura 6. Sub-VI para el sincronismo de las RTU.
Figure 6. Sub-VI for the synchronism of the RTU



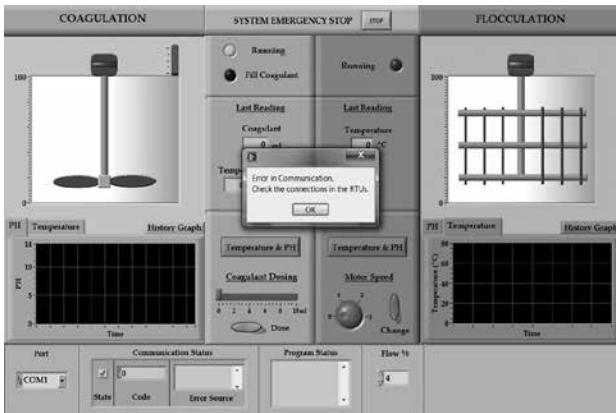
La lógica se administra a través de eventos, mediante la estructura cíclica *Event Structure*, la cual permite la ejecución de rutinas sin que el programa tenga que estar analizando una acción del usuario o un proceso determinado, basta con que ocurra un evento para que se ejecute el respectivo proceso.

Previo al inicio de cada procedimiento, se requiere el análisis de las variables de temperatura y pH para determinar los parámetros de operación, es decir: cantidad de coagulante a dosificar, velocidad del motor floculador, tiempo de funcionamiento de cada una de las etapas, entre otros. En la zona de muestreo se obtiene y procesa dicha información para luego ser enviada a la Unidad Central, en la

que se interpreta y representa en el panel de control del sistema, en éste se simula el llenado de los tanques, se muestra información importante del sistema, así como la ocurrencia de eventos y alarmas. La ocurrencia de situaciones críticas es alertada al operario mediante cuadros de diálogos con mensajes que informan del suceso, al estilo de los mensajes de error en Windows. En el transcurso de los procesos, las variables de temperatura y de pH de las etapas de Coagulación y Floculación son leídas y mostradas por el sistema en forma de indicadores numéricos y mediante gráficas de historial a través del tiempo, ambas formas son visibles desde el panel de control del SCADA para que sean interpretadas fácilmente por el operario.

Figura 7. Panel de control con mensaje de error en la comunicación.

Figure 7. Control panel with communication error message.



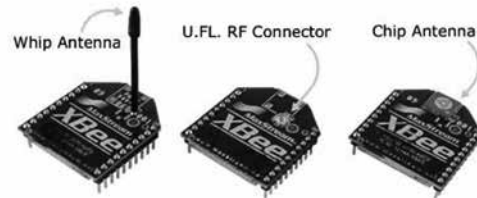
Dispositivos y componentes

En la ejecución del programa se debe contar con un computador que cumpla con los requisitos recomendados por *National Instruments* para correr sin problemas LabVIEW 2008 o superior, con puertos USB 2.0 de alta velocidad, buena capacidad de procesamiento y tener instalado el componente *VISA NI* [2] para permitir el manejo de los puertos y periféricos conectados a estos.

Los dispositivos ZigBee escogidos para la comunicación inalámbrica son los módulos *XBee ZB* programables, con antena integrada (chip antenna), de la empresa *DIGI*, conocidos también como *XBee Series 2*. Éstos tienen un alcance máximo línea- vista de 120 metros para exteriores y de 40 metros en interiores, potencia de transmisión de 2mW y sensibilidad de recepción de -96dBm, velocidad de transmisión de datos por RF de 250Kbps y serial de 1200bps a 1Mbps; además operan en la frecuencia ISM 2.4GHz y pueden constituir redes de cualquier topología [6]. El dispositivo coordinador de la red es conectado a la unidad principal mediante una tarjeta adaptadora USB que contiene un integrado FT232RL, y es administrado por el programa principal gracias al Sub-VI *XBee Communication*.

Figura 8. Módulos XBee ZB de Digi.

Figure 8. Digi's XBee ZB modules. Fuente [6].



El procesamiento y control en las RTU está a cargo de microcontroladores PIC de *MICROCHIP*. Para esta labor son utilizados PIC gama media de 8 bits, referencia 16F887-E/P [7]. Entre las prestaciones que brindan éstos, en particular para los requerimientos del prototipo, se encuentran el bajo consumo de corriente que alcanza los 250µA, el rango de voltaje de operación que oscila entre 2 y 5.5 Voltios, el módulo USART mejorado y el módulo ADC (Convertor Análogo Digital) de 10 bits de resolución.

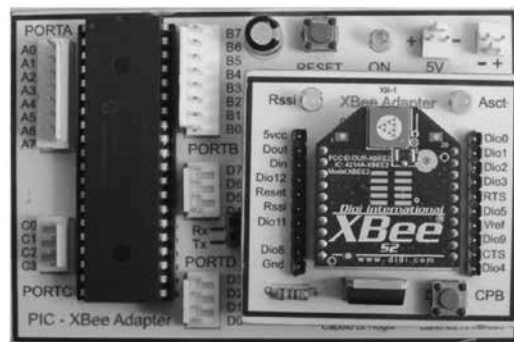
Además de los dispositivos mencionados, en el prototipo se utilizan motores y electroválvulas de corriente alterna (AC), y una bomba de corriente directa (DC) para la dosificación del químico coagulante. Las etapas de potencia necesarias para la alimentación de estos instrumentos, requieren de elementos para la protección de los microcontroladores, como optoaisladores, triacs, transistores y diodos. Amplificadores de instrumentación INA129 son utilizados para la adecuación de la señal del sensor de pH.

Circuitería

Los circuitos utilizados se diseñaron basándose en especificaciones de los fabricantes de los diferentes dispositivos y teniendo en cuenta las necesidades particulares del prototipo. La fabricación fue hecha manualmente y de forma modular por el grupo desarrollador. En cada RTU se disponen de manera similar los elementos de circuito que permiten la interacción de sus componentes, esto incluye la etapa de potencia, comunicación y adecuación de voltajes.

Figura 9. Circuito adaptador de PIC y XBee.

Figure 9. PIC and XBee circuit adapter.



En las conexiones internas fue necesario en primera instancia adaptar los voltajes de operación de los PIC y los XBee. Los dispositivos de DIGI operan a 3.3 Voltios nominales. Por eso se diseñó un circuito que además de la conexión con el PIC que lo gobierna, permitiese adaptar el voltaje de entrada de la RTU a lo requerido por el XBee, de igual forma se adecuaron los voltajes de los pines de comunicación entre los dos dispositivos.

Red de comunicación

Para la transmisión de la información del sistema y el control de los procesos, se estructuró una red con dispositivos XBee utilizando el protocolo de alto nivel para la comunicación inalámbrica diseñado por *ZigBee Alliance* [3]. ZigBee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 [8] de redes inalámbricas de área personal (*Wireless Personal Area Network, WPAN*), define la capa de red por encima de las descritas por éste último y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

Figura 10. Capas de protocolos para ZigBee.
Figure 10. Protocol Layers for ZigBee.

Aplicación / Perfil	Usuario
Soporte de Aplicación	
Red (NWK) / Seguridad (SSP)	ZigBee Alliance
MAC	
PHY	IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 especifica las características de la Capa Física (*PHY*) y la capa de Control de Acceso al Medio (*MAC*) para Redes de Área Personal Inalámbricas de Baja Velocidad (*LR-WPANs*), las cuales son redes simples y de bajo costo que permiten la comunicación inalámbrica en aplicaciones de poder limitado y sin elevados requisitos de rendimiento, cuyas principales características son:

- Tasas de transferencia de 250 kb/s, 100kb/s, 40 kb/s, y 20 kb/s
- Funcionamiento en Estrella o *peer-to-peer* (P2P).
- Direccionamiento asignado de 16-bit o de 64-bit.
- Asignación opcional de Intervalos de Tiempo Garantizados (*GTSs*).
- Acceso Múltiple al canal mediante Sensado de Portadora con Evitación de Colisiones (*CSMA-CA*).
- Reconocimiento completo del protocolo para fiabilidad de transferencia.
- Bajo consumo de potencia.
- Detección de energía.

- Indicación de calidad de enlace.
- 16 canales en la banda de 2450MHz, 30 en la de 915MHz y 3 canales en la de 868MHz.

De acuerdo a éste estándar, en una red ZigBee pueden participar dos tipos de dispositivos; uno de función completa (*Full-Function Device* o *FFD*) y un dispositivo de función reducida (*Reduced-Function Device* o *RFD*). El FFD puede operar en tres modos diferentes, sirviendo como un Coordinador de la PAN, un Enrutador o un Dispositivo Final. Un FFD puede hablar con los RFDs o con otro FFD, mientras que un dispositivo de función reducida sólo puede hablar con un FFD. Los RFDs están pensados para aplicaciones extremadamente simples como por ejemplo un sensor infrarrojo pasivo, estos no tienen la necesidad de enviar grandes cantidades de datos y únicamente pueden asociarse con un solo FFD al tiempo [8].

Además de su bajo consumo de energía, el bajo costo de los equipos y el de su implementación, la tecnología ZigBee tiene características especiales que la convierten en una excelente opción para aplicaciones industriales, entre ellas se pueden mencionar:

- Usa las bandas libres ISM (*Industrial, Scientific & Medical*) de 2.4GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (Estados Unidos).
- Velocidad de transmisión de 250 Kbps y rango de cobertura de 10 a 75 metros para un solo dispositivo.
- Capacidad de operar en redes de gran densidad, aumentando con ello la confiabilidad de la comunicación y el área de cobertura.
- Identificador de red único, lo que permite que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicación sin ningún problema. Teóricamente pueden existir hasta 16000 redes diferentes en un mismo canal y cada una puede estar constituida por hasta 65000 nodos.

De acuerdo a las características dadas por el estándar 802.15.4, ZigBee define tres diferentes tipos de dispositivos para la formación de redes:

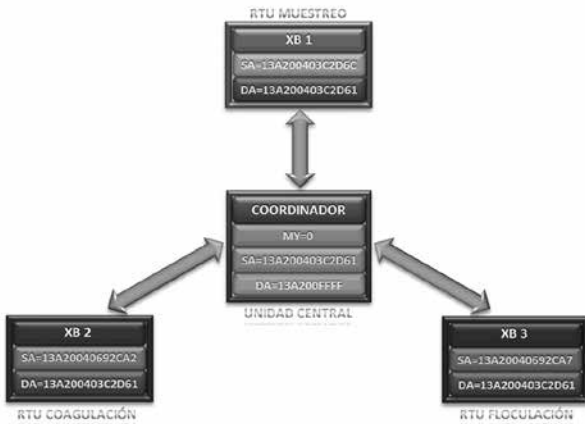
- **Dispositivo final.** Es un RFD que debe unirse a la red antes de poder transmitir cualquier dato. No permite que otros dispositivos se asocien. No puede transmitir o recibir información directamente de otros RFD. Puede entrar en modo de bajo consumo o *sleep*.
- **Enrutador.** Es un FFD que debe unirse a una PAN antes de poder transmitir, recibir, o enrutar datos. Permite a otros enrutadores y dispositivos finales unirse a la red. Asiste en el enrutamiento de los datos, por ende no puede entrar en modo *sleep*.
- **Coordinador.** FFD encargo de inicializar y estructurar la red personal, seleccionando el canal y asignándole un identificador (PAN ID), ya sea de 64 o 16 bits.

Permite a los enrutadores y a los dispositivos finales unirse a la red. Puede asistir en el enrutamiento de datos. No puede entrar en modo *sleep*.

La red estructurada tiene topología estrella, con un Coordinador y tres Dispositivos finales. El nodo Coordinador se encuentra conectado al computador de la Unidad Central, y cada RTU dispone de un XBee desempeñándose como Dispositivo final, estos se comunican serialmente con el PIC que los administra a través de la USART. Los XBee funcionan en modo transparente o AT [6], que actúa como reemplazo del medio cableado, codificando y transmitiendo por RF todo lo que recibe en su puerto serial y decodificando, para luego enviar a la USART, todo lo que recibe inalámbricamente.

Los módulos XBee tienen direcciones seriales de 64 bits que vienen inscritas de fábrica y se dividen en dos palabras de 32 bits (*Serial Number Low* y *Serial Number High*). Éstas permiten el correcto direccionamiento de la comunicación al indicar la dirección del dispositivo de destino (*Destination Address*), lo cual se logra configurando al Coordinador desde el programa central cuando sea requerido.

Figura 11. Red de datos.
Figure 11. Network



3. RESULTADOS

Gracias al desarrollo modular de la programación, se pudieron realizar las pruebas pertinentes con las que se evaluaron las características de los componentes del sistema. Aspectos como la sincronización de las RTU con el programa principal, la comunicación vía USART e inalámbrica, el manejo de los sensores, el comportamiento del sistema frente la ocurrencia de errores fueron analizados a profundidad obteniendo los siguientes resultados.

Comunicación

La red ZigBee funcionó como se esperaba, presentando retardos de tiempos imperceptibles en las transmisiones de

los XBee, aun cuando se requería la respuesta de todos los dispositivos finales al mismo tiempo. Se obtuvo una eficiencia total de la red, presentándose pérdidas de datos únicamente cuando el microcontrolador conectado a los XBee no respondía adecuadamente. Pese a que el sistema no requirió de grandes distancias para la comunicación entre las RTU y el Coordinador, pruebas realizadas mostraron una distancia máxima efectiva de hasta 10 metros, con separaciones mayores los dispositivos finales pierden el asocio a la red.

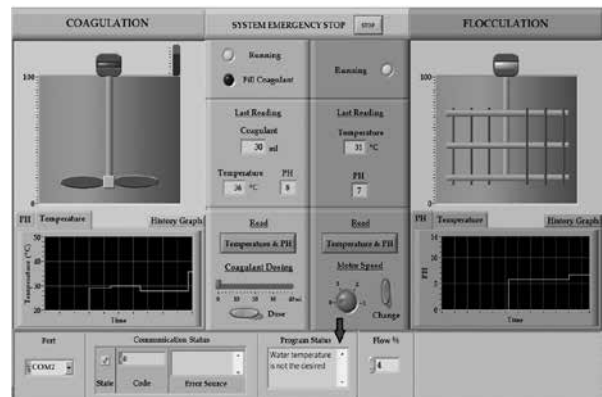
De igual forma el módulo VISA de *National Instruments*, permitió un adecuado manejo del puerto al cuál se encontraba conectado el Coordinador, sin presentarse errores en la comunicación cuando las sesiones iniciaban y se cerraban correctamente. En cuanto a la captura de los datos en LabVIEW, se necesitó establecer inicialmente la cantidad de bytes en cada intercambio de información, con el fin de evitar errores en la comunicación. Esto se consiguió planteando un máximo de 6 para los datos más grandes, partiendo de ahí se le indicó a cada proceso de lectura del puerto el número de bytes que debía recibir, asegurando en el envío desde los PIC la misma cantidad y el formato de presentación correcto.

Adquisición de datos

La información obtenida por los sensores de temperatura y de pH se visualiza en los gráficos de ambos procesos, representando estos valores en las mediciones realizadas durante el tiempo de ejecución del programa. Dichos históricos desempeñan un papel fundamental al momento de evaluar la utilidad del sistema y de obtener mayor información concerniente al estado del agua.

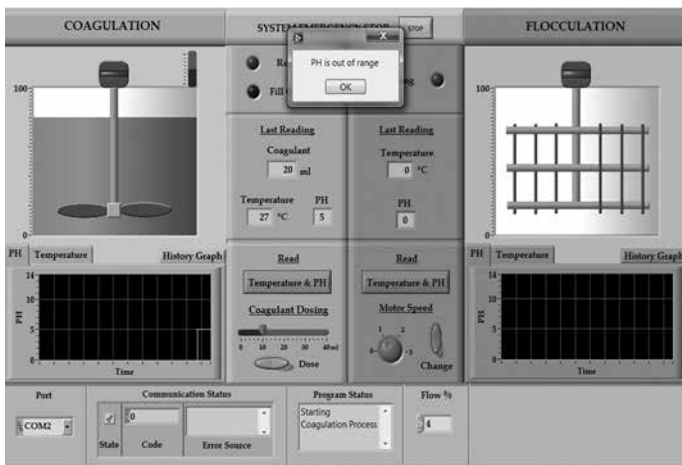
Los valores de la temperatura estipulan los rangos idóneos de operación de los procesos, de acuerdo a lo requerido por el coagulante utilizado. Se trabajó con un rango de temperaturas de 25 a 35 °C. Se alerta al operario cuando la temperatura del agua se encuentra fuera de éste rango mediante un mensaje en la ventana de Estado del Programa.

Figura 12. Respuesta a temperatura fuera de rango.
Figure 12. Response to temperature out of range



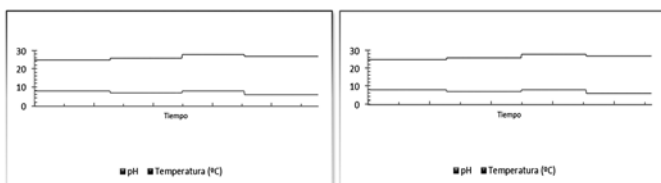
Los valores de pH representan información del estado del agua, importante para los controles de calidad y decisiva en la ejecución de los procesos; ya que, para que las reacciones químicas se puedan dar, el agua debe tener un pH entre 6 y 8 [9]. Cuando esto no ocurre, agregar coagulante en la etapa correspondiente puede no surtir ningún efecto, es por esto que el proceso se interrumpe, deteniendo el sistema por completo y alertando al usuario por medio de un cuadro de diálogo. En el caso que esta situación se presente durante el proceso de Floculación, el sistema sólo alerta de su ocurrencia y el proceso continúa.

Figura 13. Respuesta a pH fuera de rango.
Figure 13. Response to pH out of range.



La zona de muestreo permitió un control eficiente de los procesos, adquiriendo información del estado del agua y retroalimentando la procesada en la Unidad Central para la posterior toma de decisiones. La forma en la que se organizó la visualización de ésta información permitió un análisis detallado de la condición del agua durante el funcionamiento del sistema. Además el historial de gráficos posibilita su exportación a hojas de cálculos para realizar un análisis más detallado del comportamiento de las variables. A continuación se muestran gráficas con información del pH y la temperatura recogida durante las pruebas y exportada a hojas de cálculo directamente.

Figura 14. Comparativo del muestreo en la etapa de Coagulación y en la de Floculación.
Figure 14. Comparative of sampling in the Coagulation and in the Flocculation stage)



Desempeño del sistema

En el funcionamiento en conjunto, lo más complejo es la sincronización de los tiempos de la simulación con los tiempos reales de ejecución de los procesos. Presentándose disparidad en ambos, principalmente cuando el caudal del agua a la entrada del prototipo varía. La respuesta del sistema a los eventos fue muy buena, desempeñándose óptimamente en la ejecución automática de los procesos y cuándo debía procesar las órdenes que se ingresaban manualmente, como el cambio de la velocidad del motor floculador, la dosificación de una cantidad específica de coagulante o la orden para el muestreo de las variables. Las alertas y notificaciones se dieron en los momentos indicados y con precisión.

En general el sistema posibilitó el monitoreo deseado de los procesos de Coagulación y de Floculación obteniéndose información importante del estado del agua en tiempo real, constituyéndose en una base para que el personal de laboratorio de una planta de tratamiento pueda tomar decisiones que modifiquen, cuando sea necesario, las condiciones de los procesos.

4. CONCLUSIONES

- El nivel de supervisión alcanzado con el sistema concuerda con lo propuesto en las metas iniciales del proyecto. Los resultados demuestran la funcionalidad de las técnicas de muestreo y la pertinencia de los medios utilizados para su visualización; así como la confiabilidad de la programación en la ejecución de los procesos.
- Con el uso de la tecnología ZigBee provista por los XBee Series 2, se puede constituir una red de datos confiable, con alta inmunidad al ruido, facilitando la comunicación entre los componentes del sistema y asegurando el correcto transporte de la información desde y hacia las unidades remotas. Los dispositivos de Digi son una excelente opción cuando se requiere de redes de topologías simples similar a la utilizada en el prototipo, y de un desempeño óptimo en la transmisión inalámbrica. El funcionamiento en modo transparente simplifica su aplicación como *transceiver* del microcontrolador y como periférico de comunicaciones del computador central. En este punto cabe resaltar la importancia del módulo NI-VISA en el manejo del Coordinador de la red, ya que facilitó la comunicación con el XBee para su control y configuración.
- Gracias a la programación en paralelo y al uso de módulos de instrumentos virtuales se logró constituir un programa principal robusto y, a la vez, con una baja

demanda de recursos de cómputo. La interfaz diseñada permite la interacción con el sistema de una forma sencilla y amigable, mostrando claramente la información relevante. Con la aplicación de herramientas adicionales de LabVIEW, se podría generar un mayor impacto en la funcionalidad del sistema, empleando por ejemplo registros exportables en tiempo real para el salvaguardado de la información de las variables, eventos y alertas, para su posterior análisis.

REFERENCIAS

- [1] National Communications Systems. (2004). Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems. Technical Information Bulletin [on line], 4 (10), p.4-14. Disponible desde < http://www.ncs.gov/library/tech_bulletins/2004/tib_04-1.pdf> [Acceso 10 de mayo 2012].
- [2] National Instruments (2011). NI LabVIEW [internet]. United States. Disponible desde: < <http://www.ni.com/labview/>> [Acceso 28 de abril 2012].
- [3] ZigBee Alliance (2010). ZigBee Control Your World [internet]. California. Disponible desde: < <http://www.zigbee.org>> [Acceso 28 de abril 2012].
- [4] Rodríguez Penin, A, Sistemas SCADA, Marcombo, Barcelona, 2007.
- [5] Pérez Parra, J. A. Manual De Potabilización Del Agua. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Tercera Edición. Medellín, 2007.
- [6] Digi International (2011). ZigBee And RF Modules [internet]. United States. Disponible desde: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/> [Acceso 20 de abril 2012].
- [7] Microchip Technology Inc. (2010). Microchip [internet]. Arizona, United States. Disponible desde: < <http://www.microchip.com/>> [Acceso 15 de marzo 2012].
- [8] IEEE (2010). IEEE Standards Association [internet]. New Jersey, United States. Disponible desde: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html> [Acceso 15 de marzo 2012].
- [9] Mondo Discus (2011). El pH y El Agua [internet]. Italia. Disponible desde: < <http://www.mondodiscus.com/discus/articoli-mondo-acquario/el-ph-y-elagua.html>>.