

Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de alertas tempranas en minas subterráneas: una solución a la problemática de atmósferas explosivas en la minería de carbón en Colombia

Wireless sensor network for early warning monitoring in underground mines: a solution to the problem of explosive atmospheres in Colombian coal mining

Álvaro Romero Acero*

Alejandro Marín Cano**

Jovani Alberto Jiménez Builes***

Universidad Nacional de Colombia

* Estudiante de Ingeniería de Control, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Integrante del grupo de investigación Inteligencia Artificial en Educación. alromeroac@unal.edu.co

** Estudiante de Ingeniería de Control, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Integrante del grupo de investigación Inteligencia Artificial en Educación. amarincan@unal.edu.co

*** Doctor en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia. Director del grupo de investigación Inteligencia Artificial en Educación. Profesor asociado, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. jajimen1@unal.edu.co

Correspondencia: Jovani Alberto Jiménez Builes. Carrera 80 N°. 65-223, oficina M8A-309, Medellín (Colombia). Teléfono: (+574) 4255222.

Subvención y apoyo: Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, código 14198.

Abstract

En este artículo se presenta una alternativa de automatización y control en el monitoreo de alertas tempranas de atmosferas explosivas, mediante el protocolo ZigBee. El propósito es diseñar una red de sensores inalámbricos inteligentes para recopilar la información, de forma rápida y confiable, sobre las concentraciones de gases que generan una amenaza de atmósferas explosivas en minas subterráneas. De forma remota se pueden determinar los límites de alerta de acuerdo a los datos suministrados por la red, enviando un mensaje visual representado en semáforos a puntos estratégicos dentro de la mina. Se describen además los componentes del sistema de alertas tempranas, la estructura de la red inalámbrica ZigBee y la composición de atmosferas explosivas en triángulos de Coward.

Palabras clave: Monitoreo de alertas tempranas, Atmosferas explosivas, Red de sensores inalámbricos, Protocolo ZigBee, Automatización y control.

Resumen

This article illustrates a control and automation alternative in the early warning monitoring of explosive atmospheres by the ZigBee protocol. The purpose is to design a smart wireless sensor network to gather information quickly and reliably, on concentrations of gases produced by a threat from explosive atmospheres in underground mines. Remotely it can be determined the limits of alert levels according to data supplied by the network, sending a visual message represented by traffic lights in strategic locations within the mine. It is also described the components of early warning systems, the structure of the ZigBee wireless network and the composition of explosive atmospheres in Coward triangles.

Keywords: Monitoring early warning, Explosive atmospheres, Wireless sensor network, ZigBee, Automation and control.

Fecha de recepción: 10 de octubre de 2012
Fecha de aceptación: 31 de mayo de 2013

1. INTRODUCCIÓN

La industria colombiana empezó a desarrollarse desde comienzos del siglo XX mediante la llegada de las máquinas de vapor y las calderas. De esta manera, el carbón se ha constituido en un recurso energético importante para el crecimiento socioeconómico del país. La explotación minera en general se ha convertido en una actividad lucrativa, pero de poca atención en lo que se refiere a la seguridad industrial y la salud ocupacional de los mineros.

En consecuencia, el principal afectado no solo es el medio ambiente, sino el recurso humano, debido principalmente a un número significativo en pérdidas de vidas humanas a causa de explosiones subterráneas. Lo más desconcertante es que en la actualidad se cuenta con el conocimiento, recursos y tecnología para establecer normas de seguridad industrial que permitan garantizar y adecuar de forma segura la exploración minera. Sin embargo, el índice de fatalidad que presentó la actividad minera en Colombia para el año 2010 fue de 173 víctimas, y para el año 2011, al 31 de junio, reportó 81 víctimas [1]. Por lo tanto, se crea la necesidad de tomar acciones preventivas de forma inmediata en la seguridad y el salvamento minero.

Las condiciones complejas de seguridad industrial minera y los altos índices de accidentalidad y riesgos que afectan directamente al recurso humano y ambiental se deben en gran parte a la situación inestable y cambiante del medio dentro de la mina. Lo anterior genera un ambiente propicio para la conformación de atmósferas explosivas; un detonante invisible, silencioso y para el cual se cuenta con ineficientes mecanismos de detección.

El manejo de la información de la red inalámbrica basada en el protocolo ZigBee es adecuado para condiciones de bajo consumo energético y de operación en lugares remotos. ZigBee es un protocolo de alto nivel de comunicación inalámbrica diseñado por ZigBee Alliance bajo el estándar IEEE 802.15.4 para uso en radiodifusión digital. Las aplicaciones que se pueden beneficiar del protocolo ZigBee son la construcción de redes de automatización, sistemas de seguridad, redes industriales de control, teleoperación, telemedición, entre otras [2].

Por lo tanto, el uso de cable para adquirir la información de los sensores está en desventaja frente a una red de sensores inalámbricos. El cableado

dentro de una mina puede interrumpir el paso de la carga extraída, además de que la distribución del mismo puede ser compleja por las múltiples rutas de excavación y explotación. Otras desventajas son: pérdida e interrupción de la comunicación parcial o total por rotura del cable, mayor consumo de energía al potencializar la señal, carencia en el manejo inteligente de la información y demoras en la respuesta de una alerta. En consecuencia, son numerosas las condiciones que permiten pensar en la implementación de una red de sensores inalámbricos basada en el protocolo ZigBee para automatizar el sistema de monitoreo de alertas tempranas [3].

Se propone cubrir con un sistema de monitoreo de alertas tempranas las minas subterráneas de carbón para la detección de atmósferas explosivas, que son una mezcla de gases compuestas principalmente por: metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) e hidrocarburos.

La representación gráfica por medio del Triángulo de Coward determina si la atmósfera puede resultar explosiva o no conforme a las proporciones de los gases. Además, los diagramas de explosividad del U. S. Bureau of Mines son de gran utilidad en el momento de determinar la explosividad de una atmósfera, en ellas se muestran las curvas de las mezclas explosivas, no explosivas y explosivas combinadas con el aire [4].

Para el diseño de una red inalámbrica basada en el protocolo ZigBee se debe definir el trazado de la conexión de los dispositivos o topologías que estructuran la red, en la cual cada dispositivo cuenta con una función predeterminada como: *nodo coordinador* (administra la red), *router* (enruta la información) y *end device* (dispositivo final de la red). De esta manera se tienen a disposición tres principales topologías, a saber: estrella, árbol y malla. Una característica importante en las topologías ZigBee es que cuentan con un solo nodo coordinador que puede cambiar la topología de la red [5].

Este artículo está distribuido de la siguiente manera: en la segunda parte se presentan los métodos para la identificación de atmósferas explosivas. En la tercera sección se muestra la estructura del sistema de monitoreo de alertas tempranas utilizando el protocolo ZigBee en modo API (*Application Programming Interface*) dentro de la red de sensores. En la cuarta sección se presentan los resultados y la discusión, para finalmente establecer las conclusiones.

2. MÉTODOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS EN MINAS SUBTERRÁNEAS DE CARBÓN

En esta sección se presentan los métodos para la detección de zonas explosivas determinadas a partir de la concentración de gases, a saber: Triángulo de Discusión Explosiva (también conocido como Triángulo de Coward) y U. S. Bureau of Mines.

Triángulo de Coward

El Triángulo de Discusión Explosiva, que fue publicado por Coward y Jones en 1952, ha sido considerado como una forma rápida y fácil para determinar la explosividad en la mezcla de gases [6]. Sin embargo, este método sólo tiene en cuenta tres gases combustibles: metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2).

El triángulo explosivo para cada concentración porcentual de gas puede ser fácilmente definido por tres puntos característicos que son: el límite inferior de explosividad, el límite superior de explosividad y el límite del valor estequiométrico. Los valores de estos puntos hacen referencia a los vértices de los triángulos de explosividad para cada gas, descritos en la tabla 1 [7].

TABLA 1. VÉRTICES DE LOS TRIÁNGULOS EXPLOSIVOS (%)

Gases	Límites de explosividad		Valor estequiométrico	
	Inferior	Superior	Gas	Oxígeno
Metano (CH_4)	5,0	14,0	5,9	12,2
Monóxido de carbono (CO)	12,5	74,2	13,8	6,1
Hidrógeno (H_2)	4,0	74,2	4,3	5,1

La figura 1 es la representación gráfica del método y se encuentra dividida en cuatro zonas. La zona por encima de la línea AB es el espacio de mezcla imposible, es decir, donde no hay mezcla de gases. El triángulo (rojo) delimitado por los segmentos OCDO es la zona explosiva. El triángulo (azul) ACOA y el trapecoide (azul) ODBEO son zonas no explosivas, pero si se mezclan con más CO o aire, respectivamente, el punto de gas se moverá a la zona explosiva, por lo cual podría ocurrir una explosión. La zona no

explosiva está dada por el triángulo (verde) con vértices A, E y origen (0,0), conocida como la zona de seguridad absoluta [8].

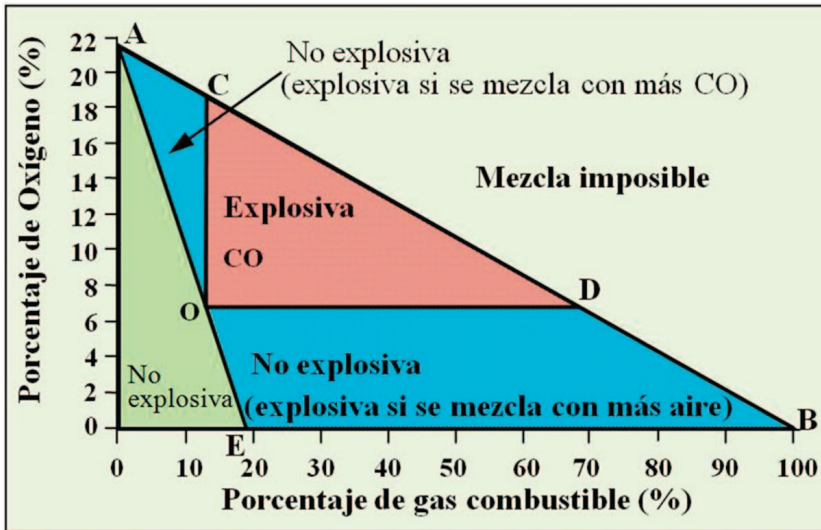


FIGURA 1. TRIÁNGULO DE COWARD (ELABORACIÓN PROPIA)

A partir de mediciones tomadas sobre las concentraciones de los gases combustibles, metano, monóxido de carbono e hidrógeno (CH_4 , CO y H_2), oxígeno (O_2) y gases inertes, se pueden obtener los datos necesarios para calcular si la zona corresponde a una atmósfera explosiva o no, representada en el Triángulo de Discusión Explosiva (Coward) mediante el diagrama de la figura 2.

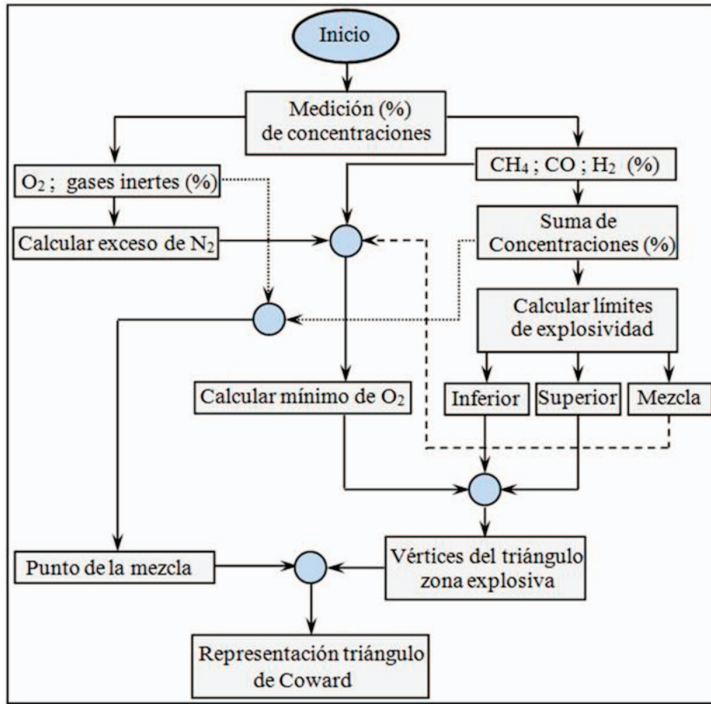


FIGURA 2. DIAGRAMA DEL CÁLCULO DE EXPLOSIVIDAD

El Triángulo de Coward proporciona unas zonas explosivas a partir de un gas combustible clave [9]. Si la mezcla de gas se compone de dos o más gases combustibles, el procedimiento de generar el triángulo de discusión resultante para la detección de la zona de explosividad se puede describir de la siguiente manera [10]:

▪ *Determinar el porcentaje de todos los gases combustibles*

Los porcentajes P1, P2 y P3 hacen referencia a los gases CH₄, CO y H₂, respectivamente. El porcentaje total de gases combustibles es:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 \quad (1)$$

▪ **Determinar los límites de explosividad**

Utilizando el principio de Le Chatelier y tomando los límites de explosividad superior, inferior (vértices uno y dos del triángulo de explosividad) y el valor estequiométrico (ver tabla 1), a cada gas le corresponde el límite (L_1 , L_2 y L_3), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{P_T}{L_{mix}} = \frac{P_1}{L_1} + \frac{P_2}{L_2} + \frac{P_3}{L_3} \quad (2)$$

Donde L_{mix} corresponde a la notación del límite inferior, superior o de la mezcla que se está calculando.

▪ **Determinar el exceso de nitrógeno (N_{ex}) requerido**

$$N_{ex} = \frac{L_n}{P_T} \{N_1^+ P_1 + N_2^+ P_2 + N_3^+ P_3\} \quad (3)$$

Donde L_n representa el límite de explosividad de la mezcla calculado con el valor estequiométrico, a su vez, N_i^+ es el volumen de exceso de nitrógeno que se adiciona a la mezcla con el fin de extinguir los gases explosivos. En la tabla 2 se muestra el exceso de nitrógeno si la cantidad de gas combustible se compone de un solo gas.

▪ **Determinar el porcentaje de oxígeno**

$$O_2(\text{mínimo}) = 0.2093(100 - N_{ex} - L_n) \quad (4)$$

Permite encontrar el valor mínimo de oxígeno (O_2) para que la mezcla sea explosiva, siendo parte del tercer y último vértice necesario para la representación de la zona explosiva en los triángulos de Coward.

TABLA 2. VOLUMEN DE EXCESO DE NITRÓGENO (N_2) QUE SE ADICIONA

Gases combustibles	Nitrógeno (m^3)
	Gas combustible (m^3)
Metano (CH_4)	6,07
Monóxido de carbono (CO)	4,13
Hidrógeno (H_2)	16,59

Método de explosividad del U. S. Bureau of Mines

Este método requiere el cálculo de los contenidos de gases combustibles en un incendio. En el eje y del diagrama (ver figura 3) se ubican los “combustibles efectivos”, representados por los porcentajes volumétricos y factores para cada uno de los gases combustibles, calculados en la siguiente ecuación [11], [12]:

$$Eje\ y = [(\%CH_4) + 1.25(\%H_2) + 0.4(\%CO)] \quad (5)$$

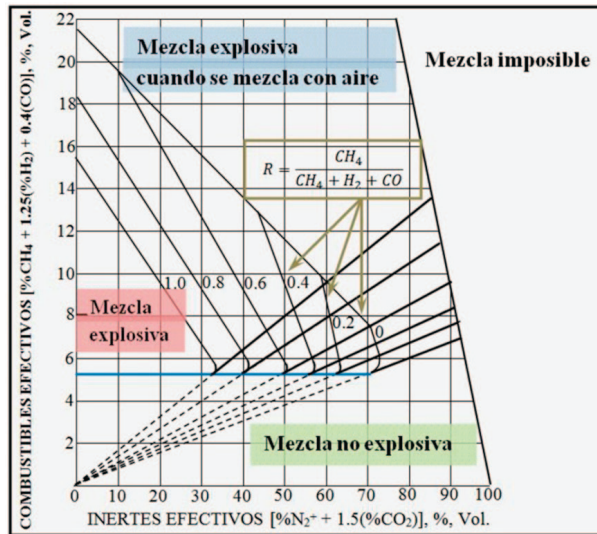
Sobre el eje x se expresa la combinación del exceso de nitrógeno (N_2) con 1.5 veces la concentración del dióxido de carbono (CO_2), así:

$$Eje\ x = N_2^+ + 1.5CO_2 \quad (6)$$

El nitrógeno requerido es el porcentaje de N_2 en exceso (N_2^+) debido al oxígeno presente:

$$N_2^+ = N_2(actual) - [O_2] \times \frac{79.04}{20.93} \quad (7)$$

Los triángulos explosivos representados en la figura 3 se basan en el CH_4 , sin embargo, son ajustados para adiciones combinadas de H_2 y CO. Se tiene la relación (R) entre el metano (CH_4) y el total de combustibles (ver figura 3).



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 3. DIAGRAMA DEL MÉTODO DE EXPLOSIVIDAD DEL U. S. BUREAU OF MINES

Luego de establecer los métodos por los cuales se determinan y corroboran los niveles de explosividad y predicción (a través del análisis de las concentraciones de gases) se debe tener en cuenta que la generación de un incendio solo puede ocurrir bajo las tres siguientes condiciones: 1) Cuando los gases explosivos forman una mezcla cuya concentración resulta peligrosa. 2) Cuando el contenido de oxígeno en la atmósfera es el requerido por los gases explosivos presentes. 3) Cuando la temperatura, la llama o la chispa son suficientes para encender la mezcla de gases.

3. METODOLOGÍA

El sistema de monitoreo de alertas tempranas se compone de tres elementos, a saber: estación de monitoreo, central de monitoreo y control, y configuración de la red. En general, el sistema implementado utiliza sensores inalámbricos basados en el protocolo ZigBee. En la actualidad es un desarrollo aplicado a la automatización y el control en el ámbito industrial, que garantiza una comunicación confiable de la información para brindar un ambiente laboral de seguridad al minero en cuanto a la detección predictiva de atmosferas explosivas [13], [14].

En la figura 4 se presenta una estructura del sistema de monitoreo de alertas tempranas que corresponde a un esquema cercano de la mina La Clarita, ubicada en el municipio de Amagá, del departamento de Antioquia, Colombia. En la actualidad se estudia la ubicación de los nodos en la mina. La siguiente es una propuesta de la red de sensores.

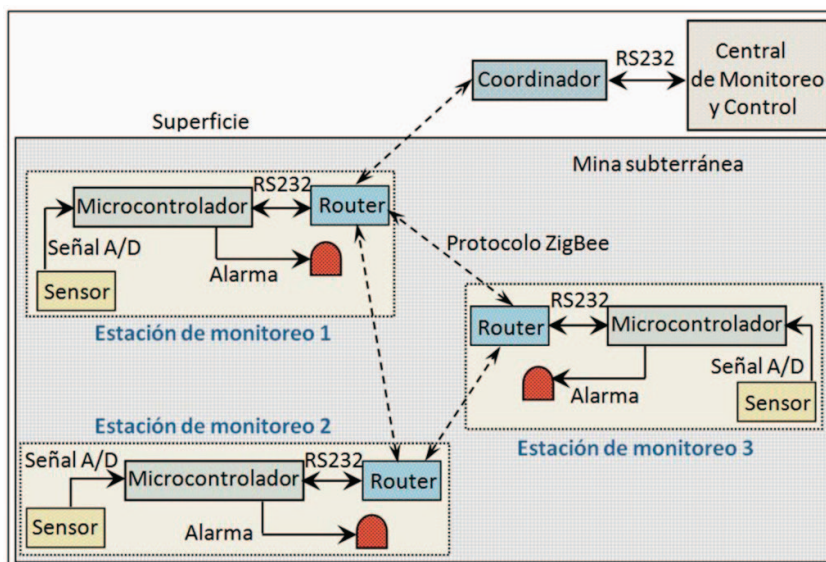


FIGURA 4. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE MONITOREO DE ALERTAS TEMPRANAS

A continuación se describen los componentes que integran el sistema de alertas tempranas, las funciones específicas que cumplen y los dispositivos que intervienen en la construcción de la red inalámbrica.

Estación de monitoreo

Cuenta con sensores de gases que miden la concentración de este componente en proporción de partes por millón (ppm). Envían la medición a través de una señal analógica o digital, dependiendo del instrumento de medición. Por consiguiente, el microcontrolador es el encargado de leer los datos del sensor y de construir la trama de comunicación para la transmisión y recepción de la información mediante el estándar RS232 (de comunicación

serial), del cual solo se utilizan cuatro líneas: transmisión (Tx), recepción (Rx), tierra (GND) y alimentación de energía (5V), que van conectadas al dispositivo ZigBee (*router*).

El dispositivo ZigBee trae acondicionado internamente un transmisor UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*), encargado de establecer la comunicación con los datos seriales para los estándares RS232, RS485 y RS422 [15]. A su vez, el microcontrolador tiene la función de actuador cuando la central de monitoreo envía una señal de alerta temprana que se muestra mediante un semáforo en colores: verde (no explosiva), amarilla (probablemente explosiva) y rojo (altamente explosiva). Estos semáforos están ubicados en puntos estratégicos, con repetibilidad en otros sitios en la línea de vista (*LOS*) y en los cruces de caminos. Lo anterior activa de forma inmediata, dentro y fuera de la mina, todos los mecanismos de atención de desastres antes de que ocurran.

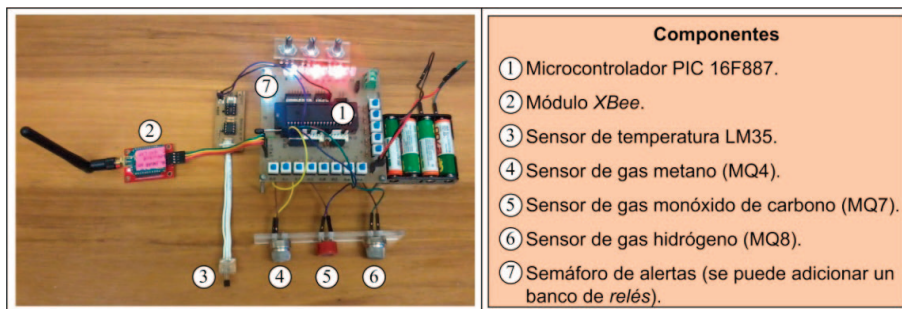


FIGURA 5. ESTACIÓN DE MONITOREO

La estación de monitoreo propuesta en la figura 5 se compone por: una placa principal que contiene un microcontrolador PIC16F887, encargado de leer y escribir la trama de la comunicación; un banco de *relés* que cumplen la tarea de activar el color en el semáforo de alerta temprana (verde, amarillo, rojo); un dispositivo inalámbrico de comunicaciones ZigBee (módulo XBee PRO S2B); un sensor de concentraciones de gases que, en este caso, se acopla a la estación de monitoreo, y un sensor de temperatura LM35, como variable de medición importante para el monitoreo de atmósferas explosivas.

▪ *Microcontrolador*

Cumple con la triple función de leer los datos del sensor, interpretar y empaquetar la información mediante una trama de comunicación API (modo de trabajo). Este modo envía los datos, recibe la confirmación de envío y enruta la información a un nodo específico de la red (ver figura 6). La otra tarea que realiza el microcontrolador es la de servir como actuador de la señal de alarma que es emitida mediante semáforos. Para determinar la estructura del programa del microcontrolador se realiza un esquema mediante diagramas de flujos, que interpreta sus principales funciones.

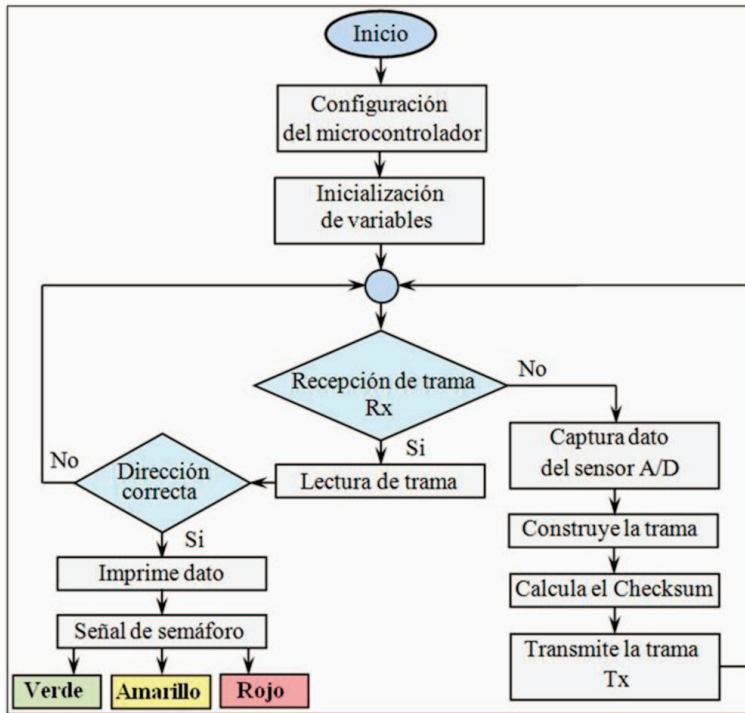


FIGURA 6. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA EN EL MICROCONTROLADOR

▪ *Sensor*

Es el encargado de la toma de datos sobre la medición en las concentraciones de gases y temperatura en cada estación de monitoreo ubicada dentro de la

mina. La adquisición de datos de los gases combustibles (CH_4 , CO y H_2) se realiza mediante los sensores: gas metano (MQ4), gas monóxido de carbono (MQ7), gas hidrógeno (MQ8). La señal de salida de los sensores (MQ4, MQ7 y MQ8) se caracteriza por entregar una señal analógica correspondiente a la cantidad de ppm (partes por millón) que contiene cada gas. La medición del oxígeno (O_2) se toma a partir de resultados experimentales dentro de un rango determinado por 9,45% a 13,89% [16].

A su vez, cuenta con un sensor que mide la temperatura LM35. Este relaciona la temperatura con el nivel de voltaje de la señal de salida, además, la salida es lineal y cada grado centígrado equivale a 10mV. Aunque la temperatura es una variable que no hace parte del análisis de la sección 2, es fundamental a la hora de supervisar el buen funcionamiento de los equipos.

El intérprete de este sensor es el microcontrolador, que recibe una señal análoga o digital proveniente del sensor en la cual registra el valor porcentual entre 0 y 100% de la concentración de un respectivo gas involucrado en el análisis de los diagramas de explosividad (sección 2). Existen diferentes tipos de señales y protocolos utilizados en la adquisición y transmisión de datos del sensor, señales analógicas (0 a 5 V y 4 a 20 mA), modulación por ancho de pulso (PWM), comunicación serial (RS232), USB, entre otros, como se menciona en [17] y [18]. Lo importante es tomar esta señal y adecuarla de manera que pueda ser fácilmente discretizada, en caso de ser análoga, para la posterior ejecución de la estructura del programa en el microcontrolador (ver figura 6).

▪ Router

Es el dispositivo de direccionamiento de la red. En la figura 4 se tienen tres *router* que pueden comunicarse entre sí. El propósito de la topología Mesh (malla) es brindar una mayor cobertura de la red y crear rutas de respaldo para la información. De esta manera es posible identificar el origen y seleccionar el destino de la información dentro del mismo paquete de datos, el cual solo brinda unas variantes en los modos de configuración que alteran el *hardware* interno de cada dispositivo. Esta función es conocida como el *firmware*. Por lo tanto, con modificar el *firmware* se puede cambiar la red, permitiendo adaptarse fácilmente a cambios estructurales de expansión y

compresión. Esto es muy conveniente, ya que la explotación minera varía constantemente en sus estudios y diseño cartográficos [19], [20].

Central de monitoreo y control

La función más importante del sistema se lleva a cabo en la central de monitoreo y control, la cual toma decisiones cruciales en cuanto a la predicción de atmósferas explosivas, mediante los diagramas de Coward y los de explosividad del U. S. Bureau of Mines. El algoritmo del sistema de control es algo complejo que se puede resolver estadísticamente o mediante paquetes de *software* prediseñados, donde se describen las atmósferas explosivas y sus *métodos de detección*.

Para este trabajo, el método del Triángulo de Coward se implementó de acuerdo a la medición de los gases combustibles (CH_4 , CO y H_2), y el oxígeno (O_2) a partir de resultados experimentales. El método explosividad del U. S. Bureau of Mines (BuMines) se introduce como soporte de validación matemática que contrasta los resultados con el método de Coward. Además, para el método de BuMines se requiere la medición de los gases combustibles: nitrógeno (N_2) y dióxido de carbono (CO_2). Esta medición se obtiene a partir de datos experimentales. Por lo tanto, la medición de los gases (CH_4 , CO y H_2) se adquiere en tiempo real, por medio de los sensores inalámbricos, y esta información es enviada a la central de monitoreo y control mediante paquetes de datos basados en el protocolo ZigBee.

Configuración de la red

Para la configuración de la red se debe definir el modo de comunicación que ofrece el protocolo ZigBee. Entre las alternativas tenemos el modo AT (modo transparente) y el modo API (ver figura 7). El modo API consiste en la construcción de una trama con lugar de origen, destino y confirmación de recepción del mensaje. Además, cuenta con la opción de encriptar la información y hacer de esta red no solo una herramienta flexible, confiable e inteligente, sino a la vez segura, algo muy importante a la hora de enfrentarse a sabotajes y agentes que pretendan alterar la función y el bien común de la industria minera [21].

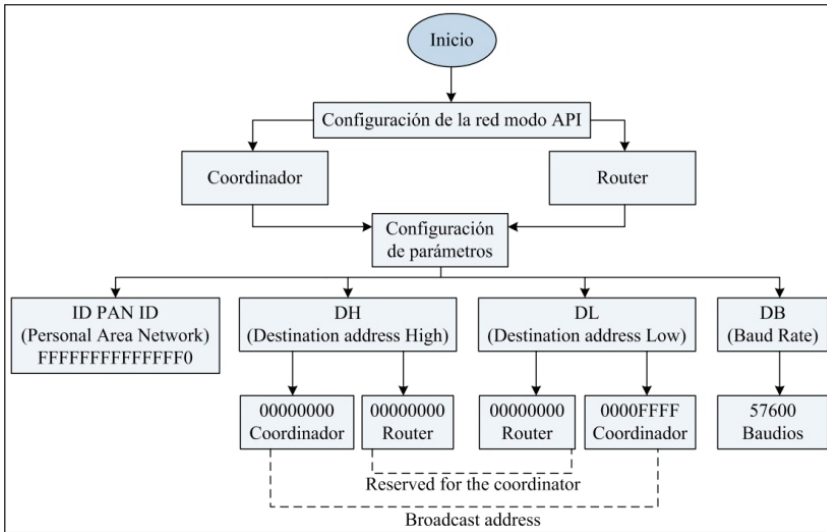


FIGURA 7. ESTRUCTURA DE CONFIGURACIÓN ZIGBEE EN MODO API

Luego de predefinir el modo API por las anteriores ventajas, se dispone a tomar la estructura de la red y a identificar el dispositivo que se configura como *coordinador*, *router* y *end device*; este último no hace parte de la red implementada en la figura 4.

Posteriormente, cada dispositivo se lleva a configuración del *firmware*, determinando su función específica en la red, dirección de origen, destino y cálculo del Checksum (ecuación 9). Lo anterior se realiza mediante el *software* X-CTU (interface de usuario XBee-Digi), el cual se utiliza como herramienta de configuración para los dispositivos de la red inalámbrica, a su vez permite verificar la transmisión y recepción de los paquetes de datos. En la figura 8 se determinan los parámetros de la trama de transmisión (Tx) y de recepción (Rx).

Tx	7E	00	0F	10	01	00	00	00	00	00	00	FF	FF	FF	FE	00	00	FF	F4
	SD	MSB	LSB	FT	FID	Dirección de destino 64 bit						16 bit	R	O	Dato	CK			
Rx	7E	00	0D	90	00	13	A2	00	40	6F	44	5E	00	00	02	FF	68		
	SD	MSB	LSB	FT	Dirección de quien envia 64 bit						16 bit	O	Dato	CK					

FIGURA 8. X-CTU TRAMA DE COMUNICACIÓN EN MODO API

Además, la implementación del protocolo ZigBee en la red de sensores inalámbricos, requiere un procesamiento de datos en forma discreta, por medio de la utilización del código hexadecimal, para la construcción de la estructura de programación en el microcontrolador y el manejo de la información en la central de monitoreo y control, bajo el entorno de programación de LabVIEW. Para obtener un dato correcto sobre la medición de las concentraciones de gases es importante verificar el cálculo del Checksum, la transmisión y la recepción de paquetes de datos, utilizando el driver X-CTU como interface para verificación de las tramas de comunicación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El último dato en la trama transmisión del protocolo ZigBee en modo API (Checksum), se convierte en un cálculo importante para el correcto empaquetamiento de la trama, por lo tanto, se comparan los resultados del cálculo del Checksum obtenido por la trama de transmisión (ecuación 8) con la ecuación general (ecuación 18). Luego se contrastan los resultados entre un nodo coordinador y dos nodos de enrutamiento (*router*), mediante la interface X-CTU, en la cual se verifica una correcta comunicación en los paquetes de transmisión y recepción de datos. Posteriormente, en la herramienta gráfica se ilustran los resultados obtenidos de los gases combustibles en porcentajes volumétricos de cada concentración y la visualización del semáforo como indicador de alertas tempranas.

Trama de transmisión

La trama de transmisión que se toma como ejemplo (ecuación 8) representa una señal discretizada con una escala de 256 valores en código hexadecimal para cada dato, la cual es la encargada de notificar el porcentaje de concentración del gas combustible (CH_4 , CO e H_2), en este caso mediante el hexadecimal FF en la siguiente trama:

$$7E00\ 0F\ 10\ 01\ 00\ 13\ 2A\ 00\ 40\ 62\ 05\ 3F\ 00\ 00\ 00\ 00\ FF\ CC \quad (8)$$

En la ecuación 8 se denota cada dato hexadecimal como $(x_m; m = 1\ 2\ 3 \dots n; n = 19)$, en consecuencia se tiene la representación de la trama $(x_1\ x_2\ x_3 \dots x_{n-1}\ x_n)$ para realizar los cálculos mediante el sistema hexadecimal y tomando en cada operación el entero más bajo (*floor*).

Cálculo de Checksum

Para el cálculo del Checksum (chequeador de la trama) se debe determinar una suma de los datos que conforman la trama (longitud) y de esta manera chequear si la información es correcta. Para realizar estos cálculos se toma la sumatoria de la longitud de la trama (ecuación 9) para luego dividirla por el número hexadecimal 100 (ecuación 10). Posteriormente, este valor se multiplica por el número 100 en hexadecimal y a este resultado se le resta la sumatoria de la longitud de la trama (ecuación 11). Por último, la ecuación (12) determina el valor del Checksum, que es FF menos el resultado de la ecuación (11). Como ecuación general (ecuación 13) para el correcto cálculo del Checksum se debe respetar el orden de la operación expresada en código hexadecimal.

$$\sum_{m=3}^{k=n-1} X_m \quad (9)$$

$$X_2 = \frac{\sum_{m=3}^{k=n-1} X_m}{100} \quad (10)$$

$$Y = \sum_{m=3}^{k=n-1} X_m - 100 \times X_2 \quad (11)$$

$$Y_2 = FF - Y \quad (12)$$

$$Y_2 = FF - \sum_{m=3}^{k=n-1} X_m + \frac{\sum_{m=3}^{k=n-1} X_m}{100} \times 100 \quad (13)$$

Tomando los valores hexadecimales de la ecuación 8, se inicia con la suma de datos que conforman la longitud de la trama, por medio de la ecuación 14.

$$\sum_{m=3}^{k=n-1} X_m = 10 + 01 + 00 + 13 + 2A + 00 + 40 + 62 + 05 + 3F + 00 + 00 + 00 + 00 + FF = 233 \quad (14)$$

Con la ecuación 15 se obtiene el hexadecimal entero más bajo (*floor*) al dividir por 100.

$$X_2 = \frac{\sum_{m=3}^{k=n-1} X_m}{100} = \frac{233}{100} = 2 \quad (15)$$

En la ecuación 16 se obtienen las dos últimas cifras del valor hexadecimal dado en la sumatoria de la longitud de la trama.

$$Y = \sum_{m=3}^{k=n-1} X_m - 100 \times X_2 = 233 - 100 \times 2 = 33 \quad (16)$$

Por último, con la ecuación 17 se obtiene el valor hexadecimal del Checksum.

$$Y_2 = FF - Y = FF - 33 = CC \quad (17)$$

En comparación con el resultado anterior, se utiliza la ecuación general (ecuación 18), la cual verifica el desarrollo precedente.

$$Y_2 = FF - \sum_{m=3}^{k=n-1} X_m + \frac{\sum_{m=3}^{k=n-1} X_m}{100} \times 100 = FF - 233 + \frac{233}{100} \times 100 = CC \quad (18)$$

Los resultados obtenidos del sistema de alertas tempranas basado en el protocolo ZigBee en modo de comunicación API se presentan mediante el driver X-CTU. Por el resultado anterior se puede visualizar de forma correcta el envío y recepción de la trama en la red. Para este caso se crea la trama de comunicación 7E 00 0F 10 01 00 00 00 00 00 00 FF FF FF FE 00 00 FF F4 (ver figura 9), la cual corresponde a la trama de transmisión del coordinador hacia los dos *router*, enviando como dato FF, el cual hace parte del penúltimo dato de la trama. El dato FF indica al microcontrolador que debe activar

el semáforo en color rojo (alerta de atmosfera altamente explosiva) en dos puntos distintos de la mina.

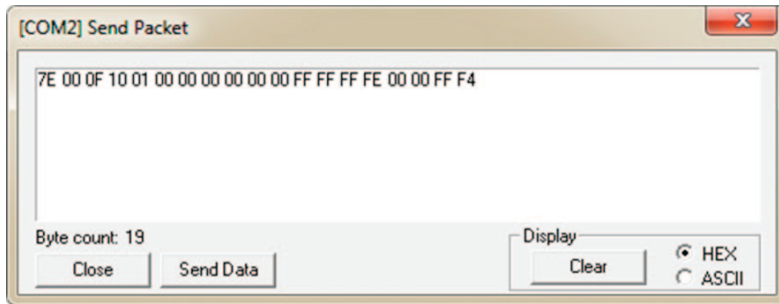


FIGURA 9. TRAMA DE TRASMISIÓN API

Para identificar la trama de comunicación de transmisión (Tx) y recepción (Rx) mediante el driver X-CTU se tienen en cuenta el color de los datos hexadecimales ubicados en la parte derecha de esta interface (ver figura 10), el color rojo para recepción de datos y el azul para la transmisión. Otro indicador de la trama Tx y Rx consiste en el *Start Delimiter* (hexadecimal de inicio), que toma el valor 7E y el Checksum como dato de cola. El mensaje de alerta está ubicado en la penúltima posición de la trama, para este caso FF.

En la figura 10 se presentan las tramas de transmisión y recepción entre varios dispositivos pertenecientes a la red. La interface X-CTU discrimina en colores: la transmisión de la trama en azul y la recepción en rojo, en el caso del coordinador (recuadro azul), se presenta la trama de transmisión 7E 00 0F 10 01 00 00 00 00 00 00 FF FF FF FE 00 00 FF F4, y como resultado se tiene la recepción de la trama en los *router 1* y *2* (cuadros rojos) 7E 00 0D 90 00 13 A2 00 40 6F 44 5E 00 00 02 FF 68. La activación de la alarma se puede observar en la trama de recepción representada por el dato FF, un dato antes del Checksum (68).

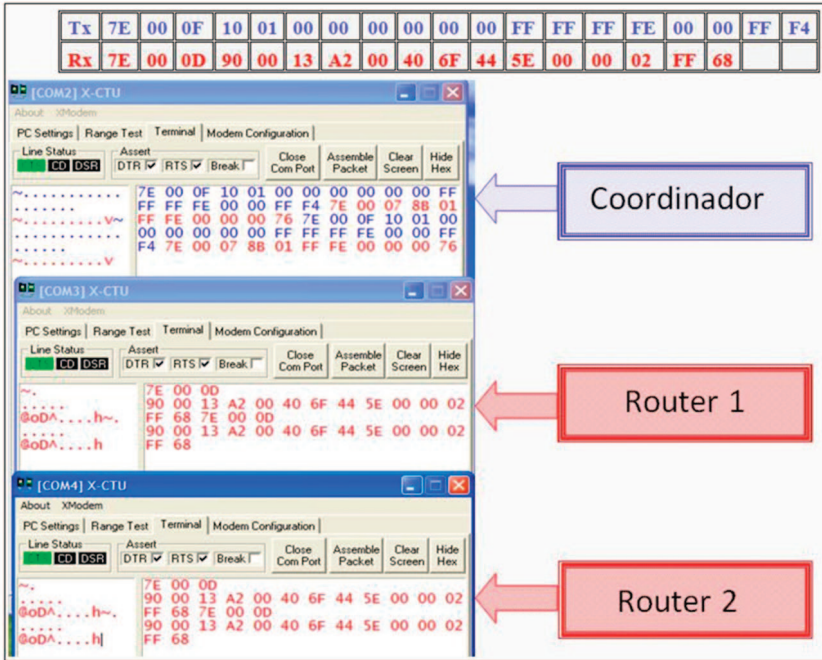


FIGURA 10. TRAMA DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN API

Herramienta gráfica

La implementación de la interface diseñada en LabVIEW proporciona una herramienta dinámica de monitoreo y control en tiempo real, como la recepción y el procesamiento de datos (ver figura 11). Permite la conexión con el módulo XBee por medio del puerto USB, sin requerir un tratamiento previo a través de una tarjeta de adquisición de datos. En la interface de control y monitoreo se visualizan las concentraciones de gases con un rango porcentual de 0 y 100, la temperatura entre 0 y 100 grados centígrados, y el semáforo (verde, amarillo y rojo) para las tres estaciones de monitoreo ubicadas en la mina [22], [23].

En la figura 11 se ilustran los resultados experimentales en la ejecución del programa por medio de la interface de usuario (sistema de control y monitoreo de alertas tempranas en minas subterráneas de carbón), en la cual se muestran tres casos particulares para presentar el cambio de estado en

el semáforo como representación de las alertas tempranas emitidas (verde, amarillo y rojo) que indican respectivamente bajo, medio y alto índice de explosividad.

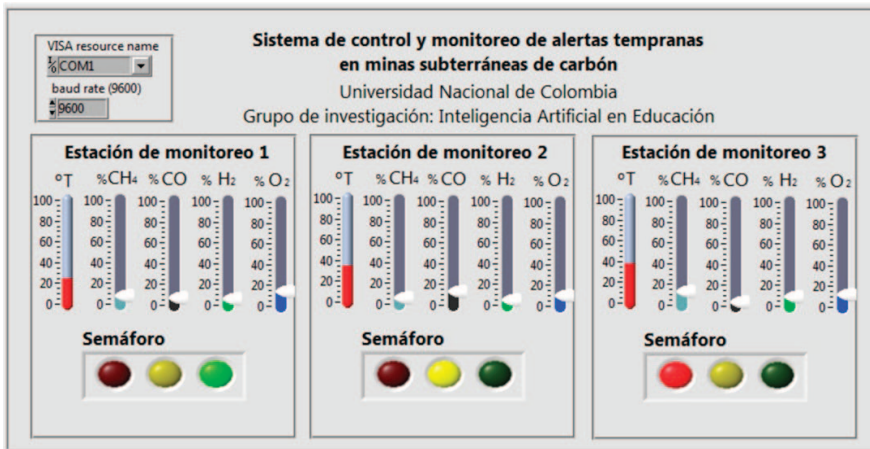


FIGURA 11. INTERFACE DE CONTROL Y MONITOREO

4. CONCLUSIONES

Los métodos de Coward y U. S. Bureau of Mines para determinar las zonas (mezclas) explosivas proporcionan una base matemática para el cálculo de la atmosfera explosiva. Por lo tanto, para alcanzar una exitosa detección con los métodos mencionados se deben tener en cuenta: la correcta calibración de los instrumentos de medición, el manejo de la información de los gases combustibles, las condiciones ambientales dentro de la mina y los resultados monitoreados en la central (interface de monitoreo y control).

En la práctica se obtiene un mejor sistema de alertas tempranas a mayor número de datos. Esto hace más preciso el cálculo matemático, lo cual requiere de procesadores y lenguajes de más alto nivel y optimización del algoritmo.

El cambio constante de la infraestructura en minas subterráneas de carbón aumenta las posibilidades de que se presenten accidentes, la mayoría generados por la alta concentración de gases combustibles, por lo tanto,

la propuesta del sistema de alertas tempranas basado en protocolo ZigBee ofrece flexibilidad y confiabilidad en la implementación de una red de sensores, la cual está orientada al monitoreo de atmosferas explosivas, permitiendo ejecutar una acción preventiva de forma inmediata a través de los semáforos informativos ubicados dentro de la mina.

REFERENCIAS

- [1] Ingeominas, *Informe de gestión, seguridad y salvamento minero*. Bogotá, 2011.
- [2] S. Palanisamy et ál., "Secured wireless communication for industrial automation and control," in *Int. Conf. on Electronics Computer Technology (ICECTCH)*, Kanyakumari, TN, 2011, pp. 168-171.
- [3] W. T. Sung and Y. C. Hsu, "Designing an industrial real-time measurement and monitoring system based on embedded system and ZigBee," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 4522-4529, Apr., 2011.
- [4] J. Cheng, et ál., "Calibrated explosive triangle for determining capacity of explosion of gas mixtures," *Mining Science and Technology (China)*, vol. 21, no. 4, pp. 567-571, Jul., 2011.
- [5] R. Faludi, *Wireless Sensor Networks*. O'Reilly, 2011.
- [6] H. F. Coward and G. W. Jones, *Limits of Flammability of Gases and Vapors*, US Bureau of Mines Bulletin 503, U. S. Government Printing Office, 1952.
- [7] W. Castro and C. P. Martínez, "Explosividad de gases desprendidos en los incendios subterráneos en minas de carbón," *Dyna, Universidad Nacional de Colombia*, vol. 129, pp. 51-58, Mar., 2000.
- [8] J. Cheng and S. Yang, "Improved Coward explosive triangle for determining explosibility of mixture gas," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 89, no. 2, pp. 89-94, Mar., 2011.
- [9] R. K. Zipf et ál., "Progress toward improved engineering of seals and sealed areas of coal mines," in *Annual Meeting and Exhibit Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, Denver, Colorado, Feb., 2009.
- [10] M. J. McPherson, *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. London, United Kingdom: Chapman & Hall, 1993.
- [11] S. K. Ray et ál., "Assessing the status of sealed fire in underground coal mines," *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 63, pp. 579-591, Jul., 2004.
- [12] R. J. Timko and R. L. Derick, "Methods to determine the status of mine atmospheres - an overview," *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa (SAUS)*, pp. 1-9, Apr., 2006.
- [13] C. Qiang et ál., "ZigBee based intelligent helmet for coal miners," in *World Congr. on Computer Science and Information Engineering (CSIE)*, 2009, Los Angeles, CA, pp. 433-435.

- [14] R. Lisi et ál., "Risk assessment of explosive atmospheres in workplaces," *RT&A* vol.1, pp. 23-31, Mar., 2010.
- [15] Y. M. Yussoff et ál., "Development of a PIC- based wireless sensor node utilizing XBee technology," presented at the *IEEE Int. Conf. on Information Management and Engineering (ICIME)*, Chengdú, 2010.
- [16] R. J. Timko and R. L. Derick, "Methods to determine the status of mine atmospheres - an overview," *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa (SAUS)*, pp. 1-9, 2006.
- [17] Westermo, *Industrial Data Communication Theoretical and General Applications*, 5th ed., Westermo, 2005, pp. 24-36.
- [18] D. Reynders, et ál., "RS-232 overview - current loop and RS-485 converters troubleshooting," in *Practical Industrial Data Communications*, 1st ed., Newnes, Elsevier, 2004, pp. 71-110.
- [19] A. W. Ahmad et ál., "Implementation of ZigBee-GSM based home security monitoring and remote control system," presented at the *IEEE Midwest Symp. on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Seoul, 2011.
- [20] M. Li and Y. Liu. "Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks," *ACM Trans. Sensor Netw.*, vol. 5, no. 2, pp. 10-39, Mar., 2009.
- [21] XBee® / XBee-PRO® ZB RF Modules, Digi International Inc., 2012.
- [22] L. Pengfei and L. Jiakun, "Application of communication and remote control in PLC based on ZigBee technology," in *Int. Conf. on Computational Intelligence and Security (CIS)*, New York: Hauppauge, 2009, pp. 536-536.
- [23] W. Lin, "Real time monitoring of electrocardiogram through IEEE 802.15.4 network," presented at the *IEEE Int. Conf. & Expo on Emerging Technologies for a Smarter World (CEWIT)*, New York, NY, 2011.