

ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS EN MINAS SUBTERRÁNEAS DE CARBÓN MEDIANTE WSN

DATA ACQUISITION FOR THE IDENTIFICATION OF EXPLOSIVE ATMOSPHERES THROUGH WSN

ALVARO ROMERO ACERO

Est. Ingeniería de Control, Universidad Nacional de Colombia, alromeroac@unal.edu.co

ALEJANDRO MARÍN CANO

Est. Ingeniería de Control, Universidad Nacional de Colombia, amarincan@unal.edu.co

JOVANI ALBERTO JIMENÉZ BUILES

PhD Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia, jajimen1@unal.edu.co

Recibido para evaluación: 18 de Octubre de 2012 / Aceptación: 03 de Mayo de 2013 / Recibida versión final: 15 de Noviembre de 2013

RESUMEN: Se presenta el diseño de una herramienta para la identificación de atmósferas explosivas en minas de carbón, utilizando los métodos de predicción Triángulos de Coward y diagramas de explosividad del U. S. Bureau of Mines, por medio del manejo inteligente en la adquisición de datos mediante redes de sensores inalámbricos (WSN). De esta manera se realiza la comparación de resultados en forma analítica, matemática y simulada por medio del entorno de programación gráfico de LabVIEW.

Palabras clave: Red de sensores inalámbricos, Adquisición de datos, Programación estructurada, Atmósferas explosivas, Minas de carbón.

ABSTRACT: A tool for identification of explosive atmospheres in coal mines, using prediction methods and diagrams Coward Triangles explosion of U. S. Bureau of Mines, through intelligent management in the acquisition of data through wireless sensor networks (WSN) is presented. In this way it makes the comparison of results in an analytical, mathematical and simulated using the graphical programming environment LabVIEW.

Keywords: Wireless sensor network, Data acquisition, Programming, Explosive atmospheres, Coal Mines.

1. INTRODUCCIÓN

La explotación minera en general se ha convertido en una actividad lucrativa, pero de poca atención en la parte de seguridad industrial para los mineros, debido a la alta accidentalidad en las minas de carbón por falta de la implementación de nuevas tecnología, equipos de seguridad y sistemas de identificación en la conformación de atmósferas explosivas (OTI, 1998).

Los métodos de predicción para la identificación de atmósferas explosivas Triángulos de *Coward* y diagramas de explosividad del *U. S. Bureau of Mines*, nos indica de forma dinámica la conformación de detección de atmósferas explosivas en representaciones gráficas de cada método, fundamentado matemáticamente, lo cual garantiza un seguimiento adecuado del comportamiento de

los gases combustibles: metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) (Cheng *et al*, 2011).

El manejo inteligente de la información, juega un papel importante en la adquisición de los gases combustibles, se propone el uso en el protocolo *ZigBee* (estándar de comunicación inalámbrica IEEE 802.15.4, que utiliza radiodifusión digital para el envío de datos), adecuado para las condiciones de bajo consumo energético y de operación en lugares remotos, el cual representa en el estado del arte un dispositivo adecuado para la implementación de redes de señores inalámbricos conocido con las siglas en ingles *WSN* (*Wireless Sensor Network*) (Palanisamy, 2011). Además el protocolo *ZigBee* en el modo *API* (*Application Programming Interface*), provee de un manejo de paquetes de datos para transmitir (*transmit request 0x10*), recibir (*receive*

packet 0x90) y verificar paquetes (*Tx status 0x8b*), en modo seguro (Digi, 2012). De esta manera, se requiere implementar una estructura de programación que soporte el análisis matemático, para calcular en tiempo real los resultados de los métodos de predicción, y el manejo de las tramas de comunicación del protocolo *ZigBee*, además ilustrar gráficamente el sistema de identificación de atmósferas explosivas, lo cual proporcione una herramienta dinámica y confiable. El entorno de programación de LabVIEW, se basa en el lenguaje G y facilita el manejo de la interface grafica y adquisición de datos (Lajara *et al*, 2007).

Por lo tanto, es posible implementar el protocolo *ZigBee* para la adquisición de datos de los gases combustibles, como variables de entrada al entorno de programación en LabVIEW diseñado para la identificación de atmósferas explosivas, y a la vez puede analizar e interpretar los datos, mediante las ecuaciones matemáticas de los métodos de predicción. De esta manera se puede obtener una herramienta para el análisis de resultados en la conformación de atmósferas explosivas en minas subterráneas de carbón.

Este artículo, se presenta de la siguiente manera: en el siguiente capítulo se presentan los materiales y métodos

utilizados, los métodos de predicción de atmósferas explosivas. Luego, en el capítulo tres y cuatro se exponen la metodología, para la red de sensores inalámbricos y la adquisición de datos respectivamente. El capítulo cinco muestra los resultados; para finalizar, en el capítulo seis con las conclusiones.

2. MÉTODOS DE PREDICCIÓN PARA ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS

2.1. Método Triángulo de Coward

El Triángulo de Discusión Explosiva que fue publicado por Coward y Jones en 1952, desde entonces se a considerado como una método fácil y rápido, para identificar la conformación de atmósferas explosivas (Coward *et al*, 1952). Sin embargo, este método sólo tiene en cuenta tres gases combustibles principales para su análisis: metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂). El triángulo está definido por los límites de explosividad que presenta cada concentración porcentual de gas (ver Tabla 1). El límite superior de explosividad y el límite del valor estequiométrico, hacen referencia a los vértices del triángulo para cada gas descritos en la Tabla 1 (Castro *et al*, 2000).

Tabla 1. Vértices de los triángulos explosivos (Límites de explosividad, Valor estequiométrico)

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

La representación gráfica del Triángulo de Coward (ver Figura 1), se encuentra distribuida en cuatro zonas, y se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones (Cheng *et al*, 2011):

a) La parte por encima de la línea AB es el espacio de mezcla imposible, que significa que no hay mezcla de gases.

b) La zona no explosiva está dada por el triángulo (verde) con vértices A, E y F, conocida como la zona de seguridad absoluta, en la figura 1 se observa un punto (Pm), el cual indica el punto de mezcla ubicado dentro de este triángulo.

c) Para el triángulo (azul) se presenta dos subregiones determinadas por: el triángulo ACOA y el trapezoide ODBEO, estas dos subregiones se convierten en zonas explosivas, si se mezcla con más CO o aire respectivamente.

d) En el caso del triángulo (rojo) delimitado por el triángulo OCDO es la zona explosiva.

e) Se debe aclarar que el triángulo con vértices A, B y F, es el triángulo de referencia y es fijo, mientras que los triángulos (verde, azul y rojo), cambian de tamaño según como se mueva el punto de mezcla (Pm).

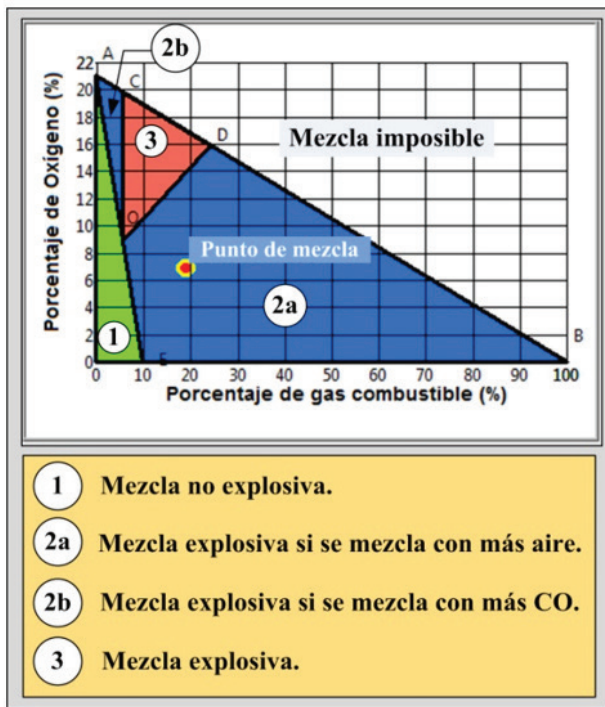


Figura 1. Triángulo de Coward, punto de mezcla (Pm)

2.2. Método de explosividad del U.S. Bureau of Mines

Los diagramas de explosividad U.S. Bureau of Mines (BuMines), proporciona un índice de rango de explosividad relativo (R), se basan en el metano, sin embargo, son ajustados para adiciones combinadas de H_2 y CO (Ray *et al*, 2004). Por lo tanto, en la ecuación 1, se tiene la relación (R) entre el metano (CH_4) y el total de combustibles.

$$R = \frac{\text{Metano}}{P_T} \quad (1)$$

En la figura 2, se representa el método de BuMines, en el eje y se ubican los “combustibles efectivos” representados por los porcentajes volumétricos y acompañado de los factores para cada uno de los gases combustibles ($CH_4 + 1.25H_2 + 0.4CO$). Sobre el eje x se expresa la combinación del exceso de nitrógeno (N_2^+) con 1.5 veces la concentración del dióxido de carbono ($N_2^+ + 1.5CO_2$). Además se puede observar el punto de mezcla y la relación del índice de rango relativo del metano (R).

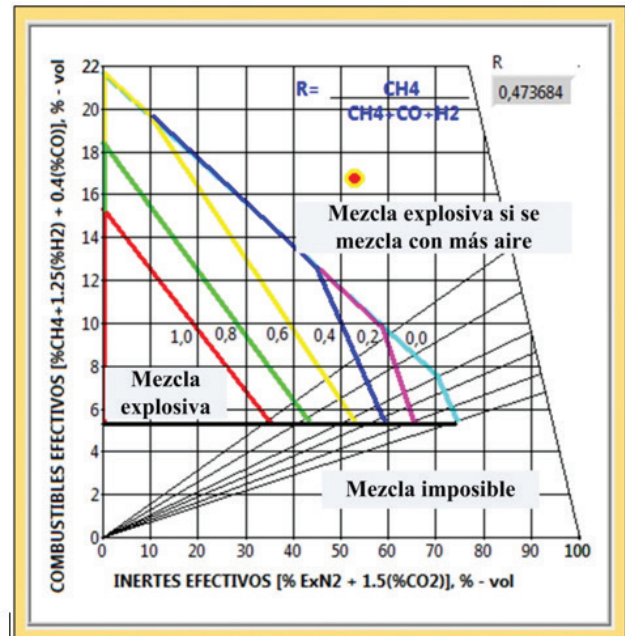


Figura 2. Diagrama U. S. Bureau of Mines (BuMines), punto de mezcla (Pm).

3. RED DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN)

3.1. Protocolo ZigBee

Para el diseño de una red de sensores inalámbricos (WSN), 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* (enrutador de la red) y *end device* (dispositivo final de la red). De esta manera se tienen a disposición tres principales topologías, a saber: estrella, árbol y malla (ver figura 3a).

El manejo de la información de la red de sensores inalámbrica basada en el protocolo ZigBee (estándar de comunicación inalámbrica IEEE 802.15.4, utiliza radiodifusión digital para el envío de datos), una de sus características principales de este protocolo, es su de bajo consumo energético, pueden existir más de 64000 nodos en una sola red y opera en lugares remotos. Además se puede atribuir otra ventaja más sobre este protocolo, en el modo *API* (*Application Programming Interface*), que tiene en cuenta las siguientes tramas de comunicación: transmit request (0x10), receive packet (0x90) y Tx status (0x8b) (Faludi, 2011).

Las tramas de comunicación en modo *API*, proveen a la red inalámbrica de un sistema de auto-verificación sobre la transmisión de datos, y a su vez cada trama contiene un Checksum (chequeador de la trama), y así determinar si la información es correcta.

3.2. Estructura de nodos de la red inalámbrica

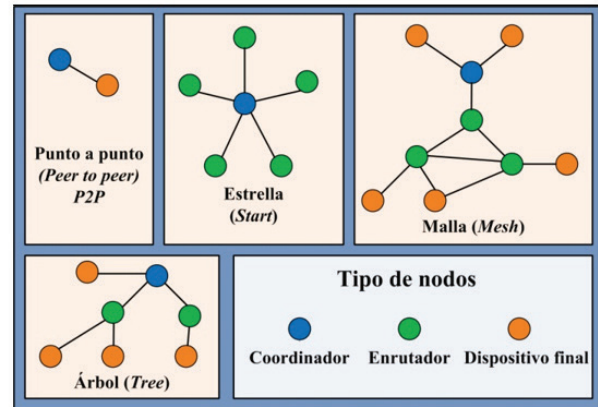
La implementación de clúster en la red de sensores inalámbricos encargados de recopilar los nodos cercanos, y esto produce un mejor manejo de la información sin caer en la redundancia, que ocasiona congestión en el servidor o coordinador de la red ubicado en la entrada de la mina (bocamina).

La integración del sistema de monitoreo y la red de sensores inalámbricos, haciendo uso del protocolo *ZigBee* IEEE 802.15.4, el cual estructura una forma de red de sensores, conformada por dos funciones específicas en los nodos: (CN) clúster nodo y (CH) clúster cabecera. El clúster (CH) recoge los clúster (CN) más cercanos, y mediante la topología de la red en malla, se comporta como: “una abeja cuando recoge el polen de las flores”, hasta encontrar la puerta de enlace (Gateway) ubicado en la bocamina, esto es una característica propia del protocolo *ZigBee* (Yang *et al*, 2007).

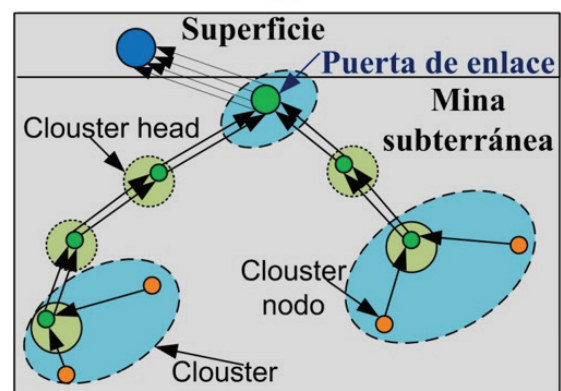
En la figura 3b, se presenta el manejo de la red de sensores inalámbricos propuestos en una mina subterránea de carbón, en la cual se determina: la estructura y distribución de nodos de la red, las rutas trazadas, la topología y la función que representa cada nodo. Esta propuesta cuenta con la ventaja de encapsular las tramas de comunicación, mediante un clúster head asignado (CH) y así lograr un mejor uso del recurso disponible, tanto en el manejo de datos como en el ahorro de energía, y a partir de este esquema se realiza las modificaciones pertinentes de la red.

3.3. Estructura de programación para WSN

Para lograr un manejo rápido y confiable de la información, se requiere un lenguaje de programación de alto nivel, que logre obtener los datos provenientes de la WSN, y a partir de estos realizar los cálculos de los métodos de predicción de atmósferas explosivas. Se realiza una estructura de programación, basada en el entorno de programación de LabVIEW, representado sobre el lenguaje G, de forma gráfica (National Instruments, 2013).



(a)



(b)

Figura 3. (a) Topología *ZigBee*. (b) Estructura de la mina y distribución de los nodos clúster

En la figura 4, se puede ilustrar la estructura de programación, mediante el diagrama de bloques, y su función principal consiste, en recibir el paquete de datos y extraer la información relevante de este, y al mismo tiempo es la encargada de construir un nuevo paquete de datos, con la información que se desea enviar, basado en las tramas de comunicación *API* propuestas por DIGI.

4. METODOLOGÍA PARA LA AQUISICIÓN DE DATOS DE LOS GASES COMBUSTIBLES

4.1. Conversión de datos

La conversión de datos es un manejo de la información importante, debido a que este depende los correctos cálculos realizados, a través de los métodos de predicción. Por lo tanto la estructura de programación en LabVIEW, sobre la conversión de datos pasa por diferentes variables.

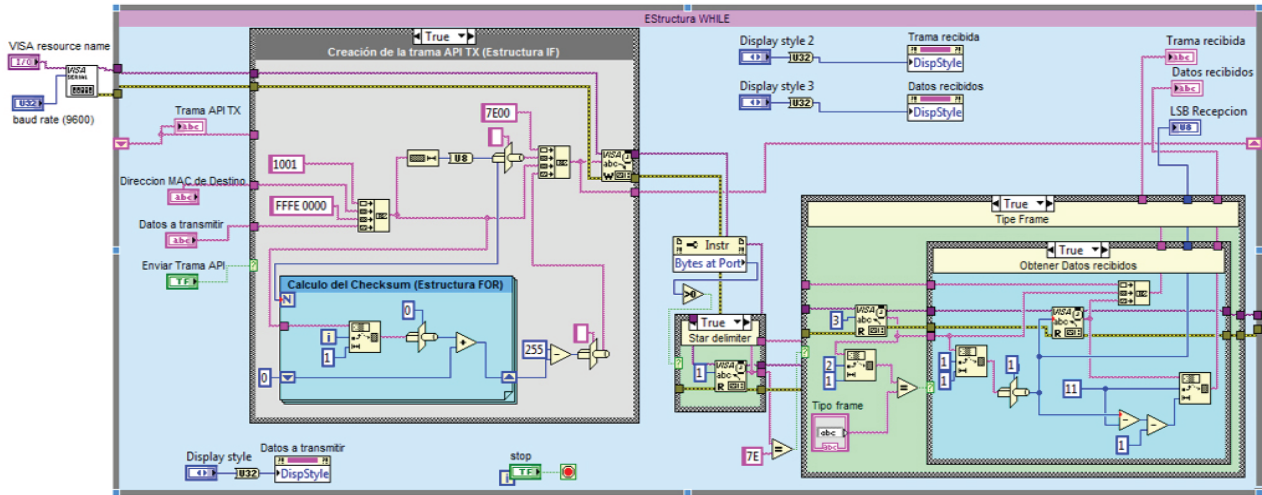


Figura 4. Estructura de programación para WSN en modo API

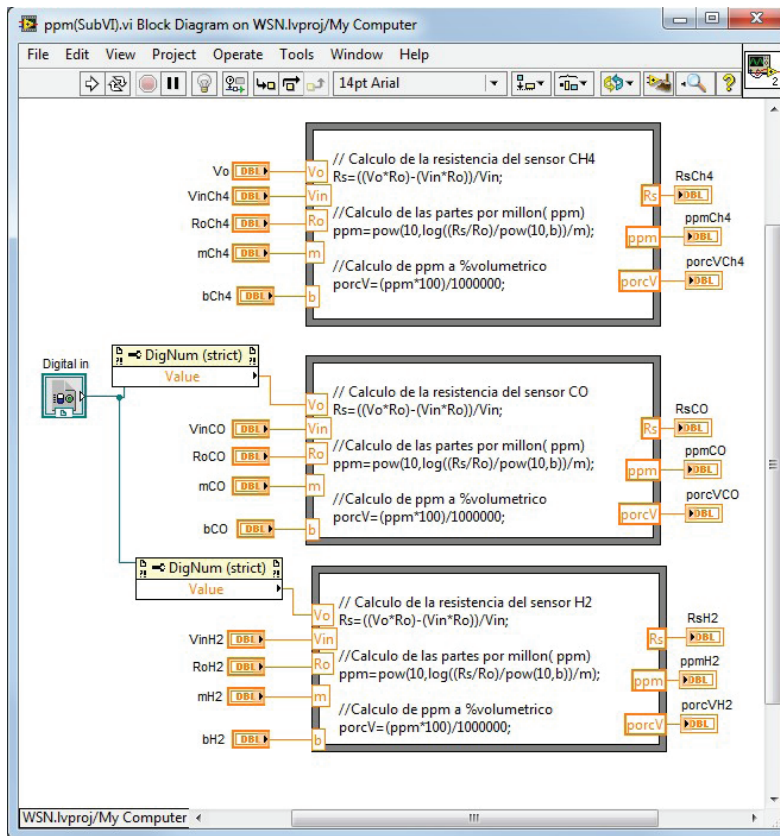


Figura 5. Estructura de programación para la conversión de datos de gases combustibles

Inicialmente cuando se recibe una trama de comunicación proveniente de la WSN, llega como dato de entrada al entorno de programación como código hexadecimal este se caracteriza por manejar de 0 a 255 valores por datos, por lo tanto una trama de comunicación en modo API, puede llegar a contener

17 datos hexadecimales, de los cuales se especifica de donde proviene el dato, los datos sobre la medición de los gases y el Checksum. Luego se extraer los datos de la medición obtenida por los sensores de gases combustibles, se continua con la conversión del dato hexadecimal a niveles de voltaje (0 a 5)V, de allí

encontrar la relación eléctrica de la medición del sensor con las partes por millón (ppm) encontradas por el sensor en el ambiente, para esto se debe tener en cuenta las curvas de la hoja de especificaciones del fabricante del sensor. Posteriormente las ppm se convierten a porcentajes volumétricos (% Vol) de la concentración de cada gas. De esta manera se logra obtener una variable consistente para el cálculo de los métodos de predicción y así determinara la identificación la zona de explosividad medibles para el Triángulo de Coward y la relación (R) para el diagrama de BuMines (Li *et al*, 2009).

En la Figura 5, se presentan los bloques, con las formulas encargados de convertir los niveles de voltaje dados por los sensores a concentración de los gases en ppm y posteriormente a % Vol.

4.2. Adquisición de datos

El reporte de datos, bajo un historial provee de un registro importante para un posterior análisis y seguimiento de las variables medibles, en este caso las gases combustibles y de esta manera encontrar puntos críticos y resultados, que proporcionen un mejoramiento continuo en un sistema de control de ventilación que pueda regular la calidad de aire en el ambiente, así como lograr determinar horas criticas y lugar donde se presente altos niveles de conformación de atmósferas explosivas. Por lo tanto en este trabajo se deja indicado el registro de datos en forma real a través del entorno de programación el cual facilita la adquisición de datos y registro en un formato compatible en Excel o Block de notas, de esta manera se puede presentar informes con resultados de hechos históricos (Westermo, 2005).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La adquisición de datos utilizando la red de sensores inalámbricos (WSN), integrado al entorno de programación en LabVIEW, mostro un buen rendimiento en la toma de datos, en el cual reporto un archivo compatible con Excel, con 5000 registros con 8 señales variables en un periodo de 30 segundos, además de haber recibido y extraído los datos de la trama de comunicación API, de igual forma calculo los métodos de predicción para dar una respuesta de alarma.

En la tabla 2, se reporta un resumen de los 5000 registros obtenidos. Esta tabla indica la utilización de 8 canales, 7 canales de entrada donde reporta los seis gases combustibles (CH₄, H₂, CO, O₂, CO₂ y N₂) %Vol., y el número de nodo (1) al cual pertenecen los datos obtenidos, también presenta un canal de salida asociado al reporte de la alarma (1, 2 y 3) que corresponde a tres niveles de alerta (baja, media y alta), en este caso se reporto la alarma 2, es decir una cercada conformación de atmósferas explosiva, en ese punto de medición.

En el reporte de datos se consideran dos franjas importantes, en la franja de color azul se logra identificar que el valor de porcentaje volumétrico del metano (CH₄), a los 9,72 segundos comienza aumentar de 0,12% a 0,14% (se estimuló esta medición al introducir gas butano, proveniente de un encendedor), y dos registros antes estaba por debajo del valor del gas combustible monóxido de carbono (CO) que se mantiene fijo a 0,13%. Luego se puede apreciar en la franja verde, que el valor del metano aumenta hasta alcanzar 0,20% a los 10,02 segundos, una diferencia muy pequeña en un tiempo de 0,29 segundos al pasar de 0,12% a 0,20%, los cual nos indica un cambio muy rápido en un corto tiempo cuando se introduce un gas que afecte la atmósfera y más aún cuando este gas es volátil.

Tabla 2. Reporte de datos gases combustibles

Channels 8								
Samples	1	1	1	1	1	1	1	1
Date	01/04/2013	01/04/2013	01/04/2013	01/04/2013	01/04/2013	01/04/2013	01/04/2013	01/04/2013
Time	04:52:45	04:52:45	04:52:45	04:52:45	04:52:45	04:52:45	04:52:45	04:52:45
	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.
End_of_Header								
X_Time	%CH4	%H2	%CO	%O2	%CO2	%N2	Alarma	Nodo
3,00	0,11	1,08	0,13	17,20	0,31	70,62	2	1
3,01	0,11	1,08	0,13	17,20	0,31	70,62	2	1
9,72	0,12	1,08	0,13	17,20	0,31	70,62	2	1

X_Time	%CH4	%H2	%CO	%O2	%CO2	%N2	Alarma	Nodo
9,76	0,14	1,08	0,13	17,20	0,31	70,62	2	1
9,77	0,14	1,08	0,13	17,20	0,31	70,62	2	1
9,99	0,17	1,08	0,13	17,20	0,31	70,62	2	1
10,00	0,17	1,08	0,13	17,20	0,31	70,62	2	1
10,01	0,20	1,08	0,13	17,20	0,31	70,62	2	1
10,02	0,20	1,08	0,13	17,20	0,31	70,62	2	1

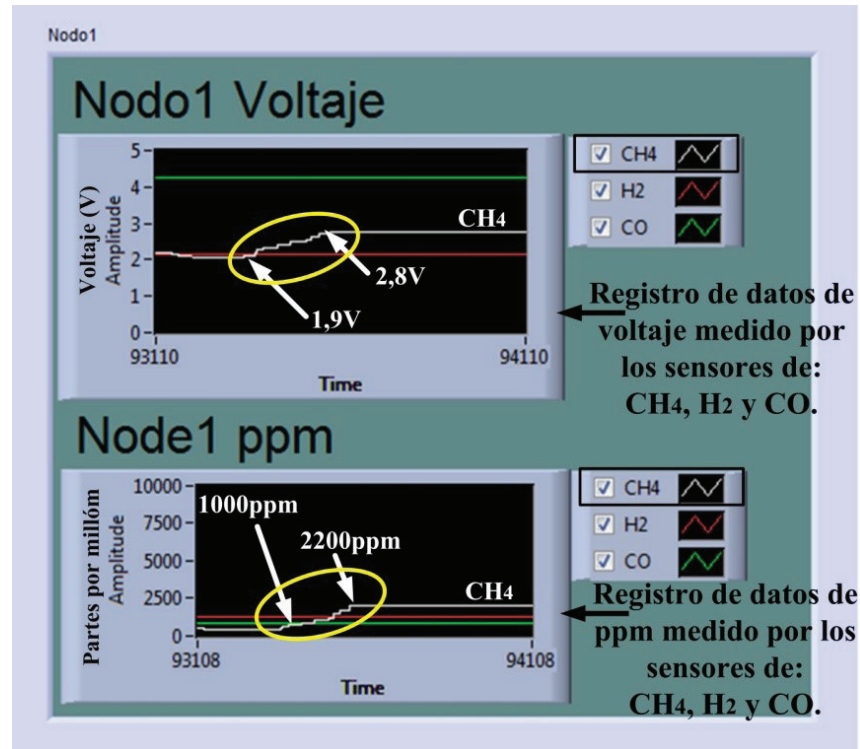


Figura 6. Interface gráfica de usuario, medición de gases combustibles

En la figura 6, se reportan la información relevante de la tabla 2, en la cual el entorno de programación en LabVIEW ofrece a modo de interface de usuario, la presentación de resultados que indiquen una interpretación más adecuada y de forma gráfica, pueda ofrecer una herramienta de primera mano al operario o central de monitoreo un reporte de las señales de los gases combustibles. En la interface gráfica se ilustra el nivel de voltaje que el sensor del gas específico en este caso (CH_4 , CO y H_2), debe estar midiendo en tiempo real el sensor, por lo tanto es una ventaja de tomar esta medición para lograr verificar que si se está realizando la medición correcta con solo medir el voltaje que entrega el sensor del respectivo y se compare con el reportado por el entorno de programación. Además de presentar los valores de voltajes analógicos captados

por los módulos *WSN*, muestra la concentración de los gases en ppm.

El reporte de datos obtenido como resumen en la tabla 2, corresponde a los reportados a través de la interface grafica de usuario (ver Figura 6), por lo tanto el cambio del gas metano (CH_4), se puede visualizar en el trazado de la línea blanca, indicando en punto mínimo y máximo alcanzado en voltaje y ppm respectivamente.

6. CONCLUSIONES

La adquisición de datos en tiempo real y de forma inalámbrica usando el protocolo *ZigBee*, provee de una herramienta dinámica y expandible, mediante la red de sensores inalámbricos (*WSN*), sin ocasionar obstáculos

físicos en el entorno laboral, por lo tanto la implementación de este esquema obtiene mejores resultados que un sistema con hilos, además cuenta con la ventaja de que estos sensores pueden ser tomados como nodos móviles dentro de la mina.

La implementación de nodos clúster en el diseño de la red de sensores inalámbricos (*WSN*), aporta considerablemente un mejor uso del recurso de los dispositivos remotos de monitoreo, además administras los canales de comunicación de una forma inteligente disminuyendo el tráfico de información que pueda incurrir en redundancias o pérdidas, esto también facilita el manejo de la información dentro de la red, y proporciona menos tramas de envío con la misma información, lo cual disminuye en consumo de energía en los dispositivos remotos de monitoreo.

El entorno de programación en lenguaje G, proporciona una herramienta de programación en bloques que agiliza la forma de estructurar el algoritmo, además cuenta con un modo de introducir ecuaciones con variables escritas en lenguaje natural (métodos de predicción y conversión de datos), de esta manera se convierte en una herramienta rápida para diseñar programas, que manejan tareas complejas y tratamiento de datos en tiempo real, que requiere la red de sensores inalámbricos (*WSN*), la ventaja de esta forma estructura de programación mediante diagrama de bloques, consiste en la facilidad de dar seguimiento a la ejecución del programa.

Como trabajo futuro, es posible integrar la red de sensores inalámbricos (*WSN*) con la instrumentación electrónica y sensorica en el casco minero, en el cual se logre un diseño portable, y de esta manera brindar una identificación en la conformación de atmósferas explosivas en punto de referencia del trabajador.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado gracias al Departamento Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, COLCIENCIAS por medio del proyecto de investigación "Sistema Sensorico para la Inspección de Autopartes en la Línea de Ensamble" aprobado en la convocatoria "569-2012 Banco de Proyectos elegibles de CTel".

REFERENCIAS

[1] Castro, W. & Martínez, C., 2000. Explosividad de gases desprendidos en los incendios subterráneos en minas de carbón, Dyna, Universidad Nacional de Colombia, Vol. 129, pp. 51-58.

[2] Cheng, J. & Yang, S., 2011. Improved Coward explosive triangle for determining explosibility of mixture gas, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 89, Nro. 2, pp. 89-94.

[3] Cheng, J; Yang, S. & Sun, Q., 2011. Calibrated explosive triangle for determining capacity of explosion of gas mixtures, Mining Science and Technology (China), Vol. 21, Nro. 4, pp. 567 – 571.

[4] Coward, H. & Jones, G., 1952. Limits of Flammability of Gases and Vapors, US Bureau of Mines Bulletin 503, U. S. Government Printing Office.

[5] Digi International Inc., 2012. XBee® / XBee-PRO® ZB RF Modules.

[6] Faludi, R., 2011. Wireless Sensor Networks. O'Reilly.

[7] Lajara, J. & Pelegrí, J., 2007. Labview Entorno Grafico de Programación, Alfaomega

[8] Li, M. & Liu, Y., 2009. Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks, ACM Trans. Sensor Netw, vol. 5, no. 2, pp. 10-29.

[9] National Instruments. Introducción a LabVIEW. Colombia. Consulta en línea [<http://www.ni.com/gettingstarted/labviewbasics/esa/>] Fecha de acceso: Junio de 2013

[10] Organización Internacional del Trabajo (OTI), 1998. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, Vol. 3, Madrid (España).

[11] Palanisamy, S; Kumar, S. & Narayanan, L., 2011. Secured wireless communication for industrial automation and control, Int. Conf. on Electronics Computer Technology (ICECTCH), pp. 168-171.

[12] Ray, S. et al., 2004. Assessing the status of sealed fire in underground coal mines, Journal of Scientific & Industrial Research, Vol. 63, pp. 579-591.

[13] Westermo, 2005. Industrial Data Communication Theoretical and General Applications, Quinta edición ed., pp. 14-36.

[14] Yang, W. & Huang, Y., 2007. Wireless Sensor Network Based Coal Mine Wireless and Integrated Security Monitoring Information System. Proceedings of the 6th International Conference on Networking (ICN'07).