

DETECCIÓN Y CONTROL DE ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS EN MINAS SUBTERRÁNEAS DE CARBÓN USANDO PROGRAMACIÓN ESTRUCTURADA

DETECTION AND CONTROL OF EXPLOSIVE ATMOSPHERES IN UNDERGROUND COAL MINING USING STRUCTURED PROGRAMMING

Daniel Restrepo Echeverri, Sergio Hernán Ríos Cano, Jovani Alberto Jiménez Builes
Universidad Nacional de Colombia, Medellín (Colombia)

Resumen

Este artículo presenta un aplicativo desarrollado como una alternativa de solución propuesta al problema que representa detectar y controlar el ambiente al interior de la mina de carbón subterránea para la comunidad minera internacional. Esta alternativa puede evitar situaciones que colocan en peligro la vida de los mineros e incluso la seguridad general de la mina, como es el caso de una concentración de gases que llegue a ser explosiva. El aplicativo se fundamenta en los métodos: triángulo de Coward y diagrama de Bureau of Mines, al cual se le adiciona un módulo de muestreo y captura de concentraciones al interior de la mina, para concluir en tiempo de ejecución si la mezcla es explosiva o no. Los resultados arrojados por el uso del aplicativo demuestran que es una alternativa de bajo costo y que puede ser usada ampliamente.

Palabras clave: monitoreo de atmósferas explosivas, triángulo de Coward, diagrama explosividad Bureau Mines, control de atmósferas explosivas, programación estructurada, minería ilegal

Abstract

This paper presents an application developed with an alternative solution to the problem posed to the International Mining Community, in detecting and controlling the environment inside an underground coal mine. This approach may avoid situations that risk miners' lives and even the overall safety of a mine, as is the case of gas concentration that can become explosive. The application is based on the following methods: Coward's triangle and Bureau of Mines diagrams, then a module of capture and sample are added of the concentrations within the mine to conclude at runtime if the mixture is explosive

or not .The final results from the use of this application show that it is a low-cost alternative which can be extensively used.

Keywords: monitoring explosive atmospheres, Coward’s triangle, explosive diagram of Mines Bureau, explosive atmospheres control, structured programming, illegal mining

1. Introducción

En la actualidad, la minería es una labor que cobra anualmente muchas vidas humanas. La gran mayoría de empresas que practican esta labor no cuentan con medios de detección que garanticen la seguridad de los trabajadores al interior de la mina. Las medidas de alerta permiten evitar accidentes fatales que terminan con una gran suma de pérdidas humanas, materiales, daños sociales y un sinnúmero de problemas consecutivos a una catástrofe de esta magnitud,

como lo es una explosión de gases, principalmente generada por la concentración de metano. Con el correr del tiempo tanto a nivel nacional como global, se han presentado accidentes de este tipo. Uno de los más recientes y fatales en Colombia fue el sucedido en la mina de carbón San Fernando en el municipio de Amagá (Antioquia, Colombia) en junio de 2010, donde murieron 73 mineros.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de algunos accidentes ocurridos en Colombia y China:

Tabla 1. Resumen de accidentes en Colombia y China.

FECHA	LUGAR	MUERTES Y HERIDOS	FUENTE
14-07-1977	Mina Industrial Hullera, municipio de Amagá	86 Muertos	El mundo, 18 Junio de 2010
03-02-2007	Minas San Roque y La Preciosa, Norte de Santander	32 Muertos	El Pais, 05 febrero de 2007
16-06-2010	Mina San Joaquín, municipio de Amagá	73 Muertos	El Mundo, 18 Junio de 2010
17-06-2012	Mina de Carbón, Sutatausa, Cundinamarca	3 Muertos	El Colombiano, 17 de junio de 2012
01-09-2012	Mina Xiaojiawan, Sichuan, China	43 Muertos	El Universal, 01 de Septiembre de 2012

En la actualidad, el 95% de las minas subterráneas de carbón en Colombia no cuenta con un sistema de detección de las atmósferas en tiempo real. En la gran mayoría de estas minas se hace un control de manera periódica a diferentes horas durante el turno de trabajo. Esto no garantiza la seguridad de la atmósfera debido a que una bolsa de gases puede encontrarse en cualquier momento durante la excavación y rápidamente convertirse en un entorno potencialmente peligroso que bajo las condiciones adecuadas provoca una explosión con serias consecuencias.

Se ha identificado que las explosiones debidas a la concentración de gases se originan básicamente con

la concentración del metano. Pero existen tres factores que son indispensables para que se dé una explosión (Mcperson, 1993), a saber:

- Cuando los gases explosivos forman una mezcla cuya concentración resulta peligrosa (composición total de la mezcla, no solo el metano).
- Cuando el contenido de oxígeno en la atmósfera es el requerido por los gases explosivos presentes.
- Cuando la temperatura, la llama o la chispa son suficientes para encender la mezcla de gases.

Si alguno de los anteriores factores está ausente, no se puede producir una explosión. No obstante

se debe reconocer que las explosiones en las minas subterráneas de carbón tienen una dinámica muy rápida. La explosión del metano puede limitarse a una pequeña deflagración (con velocidades de onda hasta de 100 m/s). En otros casos los efectos mecánicos pueden ser violentos provocando una onda de choque que es seguida de un frente de reacción de llama que puede provocar una explosión (velocidades de onda superiores a 500 m/s), la cual trae consigo consecuencias devastadoras (Zhu Chuanjie et al., 2010).

En las minas subterráneas de carbón en el municipio de Amagá (Colombia), los pequeños mineros llevan un escaso control de las atmósferas, donde las mediciones se hacen antes de empezar cada turno laboral en cada 12 horas. Las minas ilegales no tienen control de las atmósferas. En las grandes empresas se lleva un control más detallado de las atmósferas, el cual se realiza de la siguiente manera: un minero lleva consigo un detector de gases programado para leer los datos de la atmósfera cada determinado tiempo (entre 1 y 3 minutos). El detector está programado con límites permitidos para los gases. Si en algún momento capta un gas que está por encima del rango programado cuenta con una alarma sonora que alertará al minero portador del detector, al tiempo que este minero camina por la mina mientras se guarda cada registro en la memoria interna del dispositivo. Después de terminar la caminata por el túnel, se vuelve a la oficina de control para conectar el dispositivo a un computador que descargará el reporte de medidas que es exportado en un archivo de MS-Excel. Esta rutina se repite al inicio y final de cada turno cada 12 horas.

Como se puede notar hay un tiempo muerto muy grande entre cada toma de datos, teniendo en cuenta que las mediciones durante la excavación se hacen antes y después de cada voladura porque ese el momento en el cual se puede perforar una bolsa de gases en un manto y cambiar drásticamente el contenido de metano en el sitio de trabajo, generando una atmósfera explosiva. El control de la explosividad con base a los límites no es seguro del todo, ya que hay combinaciones de gases que generan una mezcla explosiva, aun cuando todos los gases se encuentren en los rangos permitidos.

Con el fin de brindar una solución que permita salvaguardar las vidas humanas, mitigar los impactos

sociales, económicos y ambientales generados por la falta de prevención y seguridad ocupacional en las minas de carbón, se plantea y desarrolla el aplicativo *Atmósferas Explosivas 1.0®*, para la detección y control de las atmósferas explosivas subterráneas utilizando los métodos de Coward y Bureau of Mines. El artículo está distribuido de la siguiente manera: en el siguiente capítulo se presenta la metodología. El capítulo tres muestra los materiales y métodos. El capítulo cuarto exterioriza los resultados y la discusión, para finalmente presentar las conclusiones.

Metodología

Los gases a controlar en una mina subterránea de carbón son el oxígeno, metano, monóxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, dióxido de carbono; porque son los gases que se encuentran fácilmente en los ambientes subterráneos y contribuyen a formar una atmósfera explosiva. Los gases explosivos son el metano, monóxido de carbono y el hidrógeno.

Los métodos implementados en el algoritmo son:

- El método de Triángulo de Coward (ver Figura 1) (Coward y Jones, 1952).
- El método del Bureau of Mines US (ver Figura 2) (Zabetakis et al, 1959).

En síntesis, los métodos consisten en un diagrama cartesiano, donde están zonificados los tres posibles estados de la mezcla de gases, con los cuales se tomarán las respectivas decisiones. Más adelante se detallan los métodos.

Por su parte, los estados son:

- Mezcla segura.
- Mezcla explosiva si se mezcla con aire.
- Mezcla explosiva.

Los diagramas implementados se muestran en las Figuras 1 y 2.

La detección se usa para solucionar las dos grandes deficiencias del método de monitoreo “convencional” empleado en las minas del municipio de Amagá. La implementación del aplicativo que captura los

datos permite solucionar el inconveniente de la detección de la explosividad por rangos de gases combustibles como se realiza actualmente en la minería colombiana. Para garantizar una seguridad

de la mezcla de gases presentes que determinan el estado de explosividad se evalúan los datos obtenidos con métodos de predicción avanzados (Ver Figuras 1 y 2).

Figura 1. Diagrama de explosividad Triangulo de Coward (Castro y Martínez, 2000)

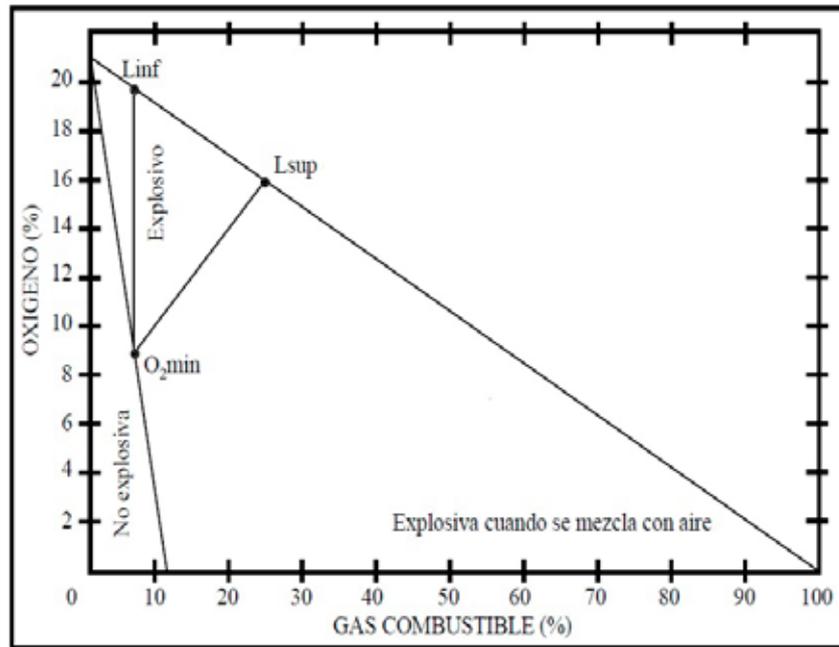
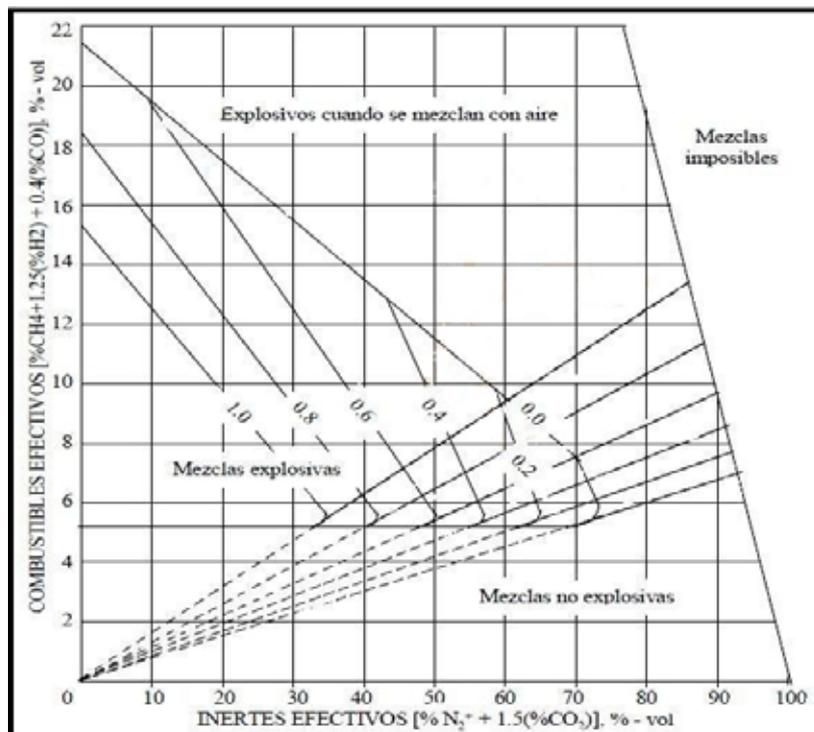


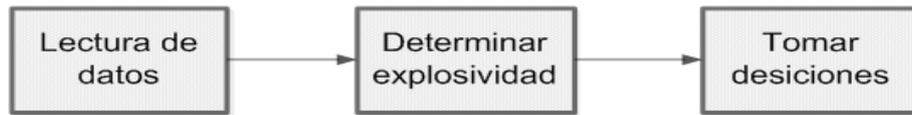
Figura 2. Diagrama de explosividad de Bureau of Mines (Castro y Martínez, 2000)



El aplicativo sigue la secuencia dada por la (Figura 3). Para determinar la explosividad se emplean los dos métodos por separado, cada uno de ellos programados

con las respectivas ecuaciones para validar el estado de la mezcla. La lógica de programación que usa cada método se representa en la Figura 4.

Figura 3. Diagrama general de monitoreo de las atmosferas.

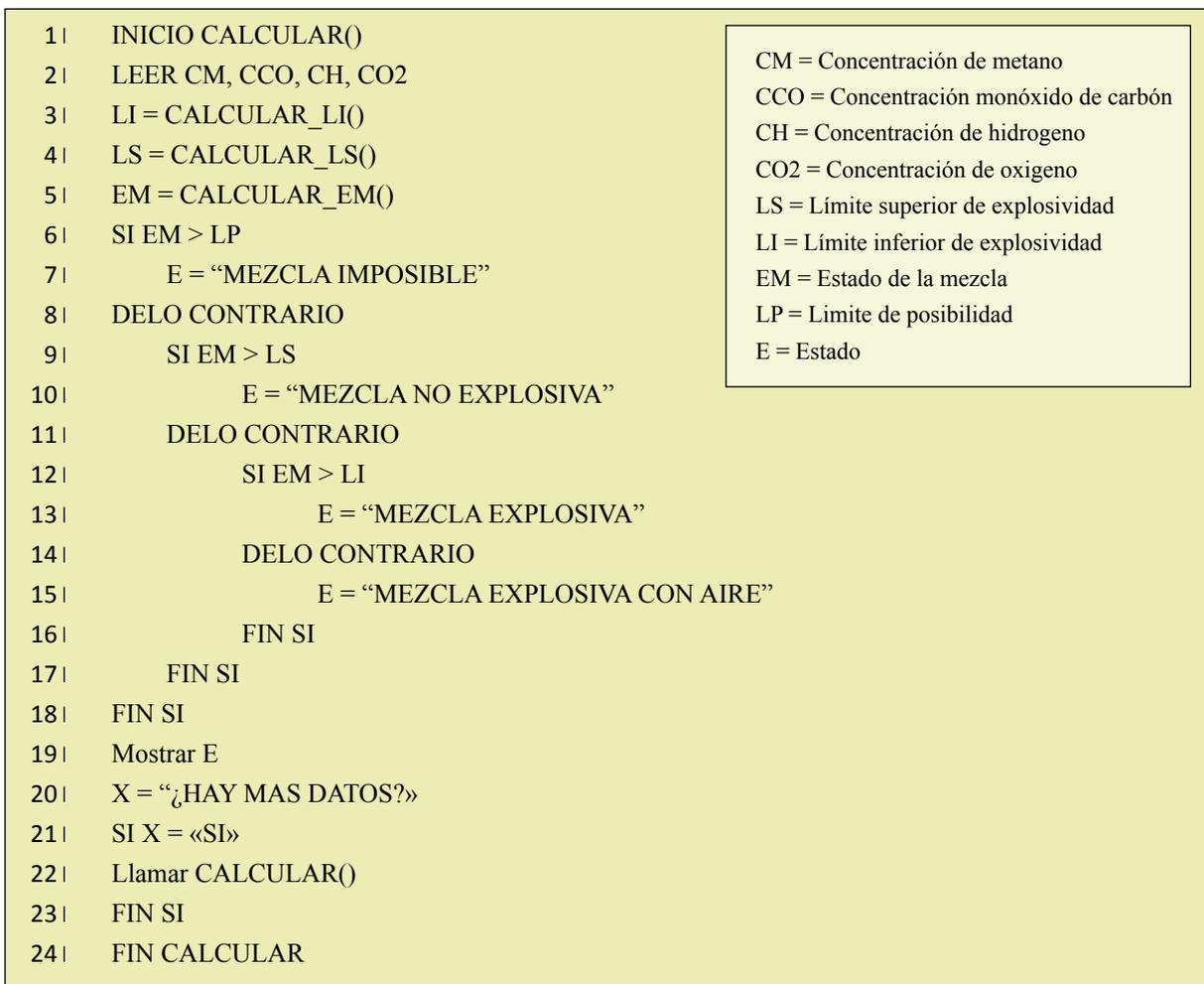


Autor: Construcción propia

En otras palabras, para determinar la explosividad de la mezcla, se diseñó un algoritmo que funciona con el orden de ideas descrito a continuación: se leen los datos correspondientes de las concentraciones de los gases de interés para cada método (CH₄, CO, H₂,

O₂ para el Triángulo de Coward) y (CH₄, CO, H₂, O₂, N₂, CO₂ para Bureau of Mines). Con base en los rangos de explosividad establecidos el aplicativo determina la explosividad de la atmosfera y se publican los resultados (Ver tabla 2).

Figura 4. Pseudocódigo del algoritmo para calcular el estado de la mezcla en cada método.



Autor: Construcción propia

Tabla 2. Límites de Explosividad de gases combustibles (Mcpherson, 1993)

GAS	SÍMBOLO QUÍMICO	LÍMITE DE EXPLOSIVIDAD	
		INFERIOR (%)	SUPERIOR (%)
METANO	CH ₄	5	14
MONÓXIDO DE CARBONO	CO	12.5	74.2
HIDRÓGENO	H ₂	4	74.2
SULFURO DE HIDRÓGENO	H ₂ S	4.3	45.5
ETANO	C ₂ H ₆	3	12.4
ETILENO	C ₂ H ₄	2.7	36
PROPANO	C ₃ H ₈	2.1	9.5

Tabla3: Volumen de nitrógeno que debe ser adicionado para controlar la explosividad de los gases (Mcpherson, 1993)

GAS	SÍMBOLO	m ³ (Nitrógeno)/ m ³ (Gas)
Metano	CH ₄	6.07 (N _{CH₄})
Monóxido de Carbono	CO	4.13 (N _{CO})
Hidrógeno	H ₂	16.59 (N _{H₂})

Métodos

Para determinar la explosividad, se tienen en cuenta los dos métodos:

Método del Triángulo de Coward (Coward y Jones, 1952): se determina la cantidad total de gases combustibles (Ecuación 1) y el porcentaje relativo de cada uno de estos en la mezcla (Ecuación 2), partiendo de los límites teóricos de explosividad para los gases, se determinan los límites de explosividad de la mezcla, usando las relaciones propuestas por Coward con base en los principios de Chatelier para gases.

$$P_t = P_{CH_4} + P_{CO} + P_{H_2} \quad (1)$$

Donde:

P_t concentración total de gases combustibles en la atmósfera.

P_{CH_4} , P_{CO} , P_{H_2} : Concentración de gas metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) respectivamente.

$$\frac{P_t}{L_m} = \frac{P_{CH_4}}{L_{iCH_4}} + \frac{P_{CO}}{L_{iCO}} + \frac{P_{H_2}}{L_{iH_2}} \quad (2)$$

Donde:

L_m : Límite de explosividad de la mezcla de gases combustibles.

L_{iCH_4} , L_{iCO} , L_{iH_2} : Límites inferior o superior de explosividad para el Metano (CH₄), Monóxido de carbono (CO) e Hidrógeno (H₂) respectivamente. (Ver tabla 2)

Se calcula el nitrógeno en exceso que se debe agregar para llevar a que la mezcla no sea explosiva (Ecuación 3), con este valor se determina el oxígeno mínimo (Ecuación 4).

$$N_R = \frac{L_m}{P_t} \times (N_{CH_4} \times P_{CH_4} + N_{CO} \times P_{CO} + N_{H_2} \times P_{H_2}) \quad (3)$$

$$O_{2min} = 0.2093 \times (100 - N_R - L_m) \quad (4)$$

Donde:

N_R : Nitrógeno requerido para estabilizar la atmósfera explosiva.

N_{CH_4} , N_{CO} , N_{H_2} : Nitrógeno requerido para estabilizar el metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) respectivamente (Ver Tabla 3)

Conocidos estos tres valores (límites inferior y superior de explosividad, oxígeno mínimo) se procede a graficar el triángulo de explosividad cuyos vértices están ubicados sobre estos valores.

Con el punto de la mezcla dado por la concentración de oxígeno y concentración de los gases combustibles, se hace el análisis de la posición de este punto con respecto al triángulo graficado y se concluye de la siguiente manera (Ver Figura 1):

- Si está en el interior del triángulo la mezcla “Es explosiva”.
- Si esta hacia el lado izquierdo la mezcla “No es explosiva”.
- Si esta hacia la derecha la mezcla puede llegar a ser “Explosiva si se mezcla con aire”.

Adicional: en caso de que exista la posibilidad de que la mezcla llegue a ser potencialmente explosiva se adicionó el Índice de Alarma Temprana (IAT), en el cual se determina qué tan cerca está del triángulo, luego evalúa en términos de porcentaje para concluir cuán peligrosa es la mezcla. Si la posibilidad de que se pase a ser explosiva es muy alta (mayor al 60%) el aplicativo la toma como explosiva (Cheng y Yang, 2011).

Método de Bureau of Mines (Zabetakis et al, 1959): se determina la cantidad de nitrógeno vigente debido a la presencia de oxígeno y se estima el nitrógeno en exceso requerido.

Total de gases combustibles (Pt):

$$P_t = CH_4 + CO + H_2 = 17\% \quad (5)$$

Relación de combustibles R:

$$R = \frac{\text{Metano}}{P_t} = 0.41 \quad (6)$$

Exceso de Nitrógeno:

$$E_{N_2} = N_{2Presente} - O_2 * \left(\frac{79.04}{20.93}\right) = 46.12 \quad (7)$$

Inertes efectivos (eje X)

$$X = E_{N_2} + 1,5 * (CO_2) = 65.62\% \quad (8)$$

Combustibles efectivos (eje Y):

$$Y = CH_4 + 1.25H_2 + 0.4CO = 14.4\% \quad (9)$$

En este método las gráficas de los triángulos de explosividad son fijos y están en función de la relación del metano respecto los gases combustibles de la mezcla. Se calcula la relación del metano y se procede a ubicar el punto sobre el grafico. Se analiza dependiendo del valor de la relación de metano y se concluye de la siguiente manera (ver Figura 2):

- Si cae al interior del triángulo la mezcla “Es explosiva”.
- Si cae en la parte inferior al triángulo “No es explosiva”.
- Si cae hacia la derecha del triángulo La mezcla puede llegar a ser “Explosiva si se mezcla con aire”.

Adicional: se calcula la cantidad de aire con la cual la atmosfera puede llegar a ser explosiva conocida como MAO (Máximo contenido Admisible de Oxígeno) (Timko y Derick, 2006). (Ver recuadro de la Figura 6)

Para la concentración de gases se calcula el índice de Jones-Trickett con el fin de determinar si existe la posibilidad de un incendio al interior de la mina y cuál es su posible causa (Morris, 1986).

Finalmente se publican los resultados obtenidos. El aplicativo compara las predicciones de ambos métodos. En caso de que los dos métodos tengan una respuesta diferente se lanza dicha alarma, publicando las dos

predicciones y por seguridad se recomienda hacer caso a la predicción más crítica desde el punto de vista de peligro de explosión. Los datos y los resultados son almacenados en una base de datos propia del programa, para verificar y analizar en periodos pasados cuales eventos han sucedido y como han variado las concentraciones de gases en el tiempo.

Para la detección básicamente son necesarios tres componentes, donde operan de manera directa (ver Figura 5.)

- Sensor: que toma las respectivas mediciones de las concentraciones de gases.
- Aplicativo: que toma los datos capturados por el sensor y los evalúa, para generar los resultados.
- Computador: indispensable para ejecutar el aplicativo

El esquema de monitoreo que se presenta en la figura 5, tiene limitaciones desde el punto de vista técnico, ya que se presenta las siguientes dificultades:

1. Dificultad para transmitir los datos directamente del sensor al computador a largas distancias, ya que los frentes de excavación en las minas subterráneas de carbón llegan fácilmente a estar entre 900 y 1000 metros de profundidad.
2. Dificultad para medir todos los gases, ya que un solo sensor que mida todos los gases es difícil de encontrar y muy costoso.
3. Las decisiones las toma el operario.

Para solucionar estas dificultades se plantea un esquema simplificado del sistema de monitoreo ideal, mostrado en la Figura 8. Allí el aplicativo interactúa de manera directa con elementos de control (Heather, 2011) que a su vez manejan los elementos mecánicos que influyen sobre la atmósfera de la mina subterránea, tales como ventiladores, compuertas de aireación y túneles. Se nota la presencia de varios sensores, donde éstos están ubicados en sitios estratégicos en el área que se quiere monitorear, y están representados de varios tipos para medir variedad de gases. Como estos sensores están en el fondo de la mina se hace necesario el uso de antenas y otros dispositivos para mejorar el transporte de la información hasta la torre de control o PLC.

Figura 5. Imagen del aplicativo con los resultados para el análisis del triángulo de Coward

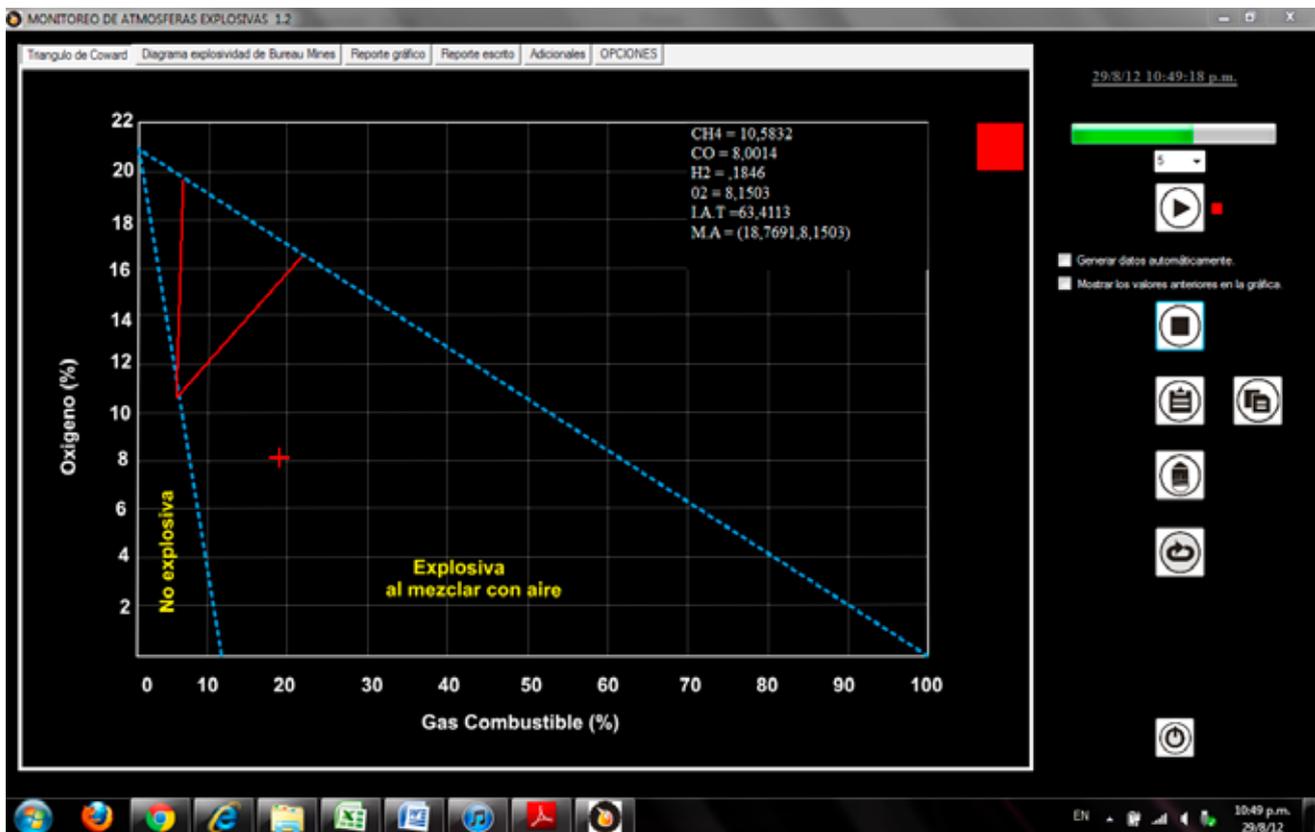


Figura 6. Imagen del aplicativo con los resultados para el análisis del método de Bureau of Mines

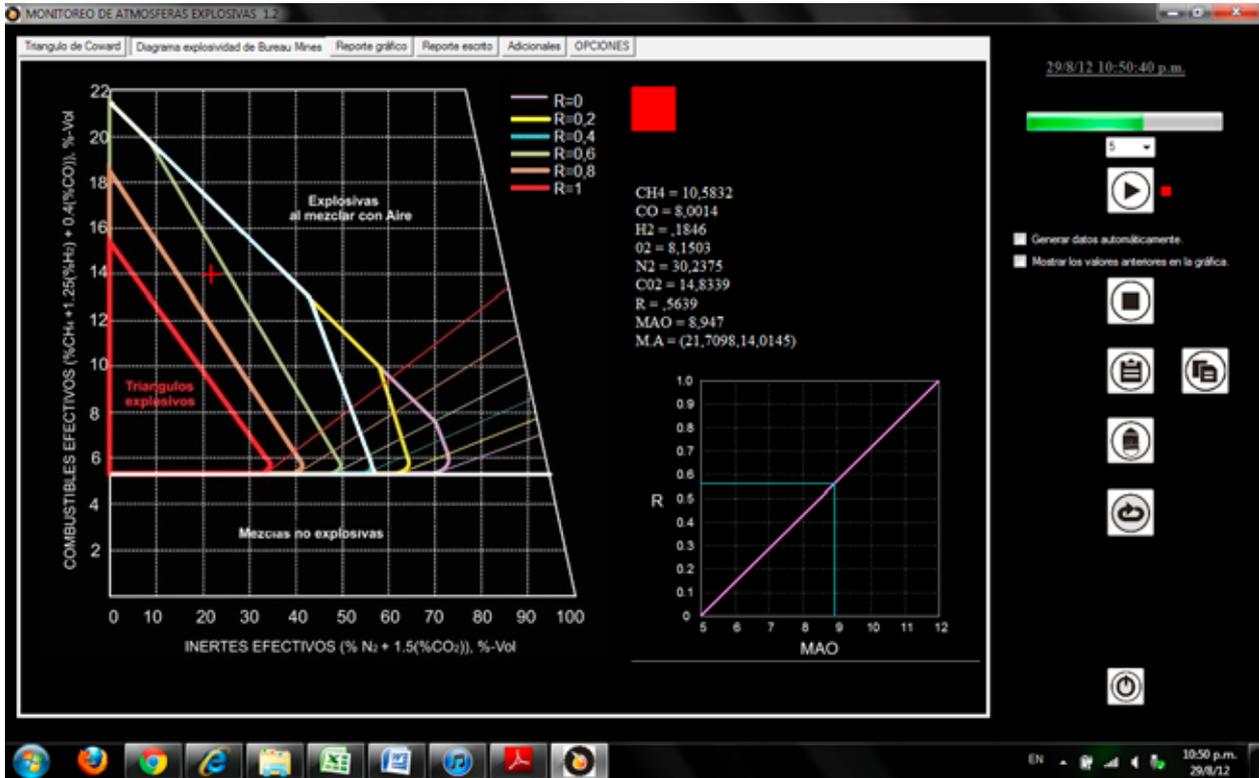
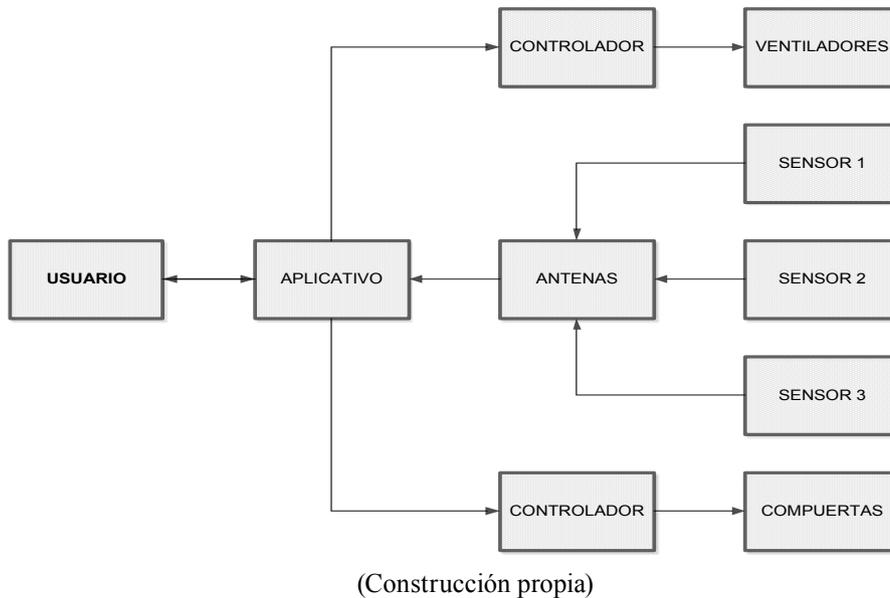


Figura 7. Esquema de funcionamiento del sistema



Figura 8. Esquema de control Sistema monitoreo completo automatizado



Resultados

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de una “Atmósfera Explosiva Cuando se Mezcla con Aire” detectada por el aplicativo Atmósferas Explosivas 1.0®, utilizando el modelo de Coward (Coward y Jones, 1952). Se observa cada una de las concentraciones de gases de la atmósfera junto con el Índice de Alarma Temprana (IAT) (Cheng y Yang, 2011) y la coordenada de la Mezcla Actual de gases (MA).

En la Figura 6 se observa el ejemplo de una atmósfera “Explosiva” donde la coordenada de mezcla actual cae dentro de los triángulos de explosividad del modelo desarrollado por la U.S. Bureau of Mines (Zabetakis et al, 1959). En el centro de la figura se observan seis líneas de diferentes colores que indican la relación de gases combustibles (Ver ecuación 6).

En la parte derecha de las Figuras 5 y 6 están dispuestas las opciones de encendido apagado, exportar e importar archivos, borrar, actualizar o apagar el programa. En la parte superior derecha se observan la hora de ejecución y una opción para introducir el tiempo entre mediciones de explosividad que se requiera.

En la Figura 8 se encuentra el esquema de control para un sistema de monitoreo automatizado completo.

Discusión

El *software* “Vybuchovy Trojuhelnik”, analiza la explosividad únicamente por medio del modelo de Coward (Janovsky, 2007). El *software* Atmósferas Explosivas 1.0®, registra la explosividad del ambiente confinado realizando una comparación entre los modelos de Coward (Coward y Jones, 1952) y el de la U.S. Bureau of Mines (Zabetakis et al, 1959). Además cuenta con otros aditamentos para el control de la explosividad como son el IAT (Cheng y Yang, 2011), el MAO (Timko y Derick, 2006) y el Índice de Jones Trickett (Morris, 1986).

La concentración de gases en porcentaje de volumen para un punto de medición aleatorio que toma el aplicativo son: $\text{CH}_4=10.3\%$, $\text{CO}=8.0\%$, $\text{H}_2=0.19\%$, $\text{O}_2=8.2\%$ y $\text{N}_2=73.1\%$. Esta concentración de gases

genera una atmósfera potencialmente explosiva. El $\text{IAT}=63.41$ es mayor que el 60%, luego el aplicativo considera la atmósfera como “Explosiva” como lo indica el recuadro de color rojo (ver Figura 5).

El programa Atmósferas Explosivas 1.0®, demarca con una línea blanca el $R=0.4$. Desde el código se programó, que cuando calcule los valores de R intermedios entre 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1, marque con la línea blanca el que está por debajo, es decir el inferior (Ver figura 6). Lo anterior es para efectos de seguridad, ya que al tomar el valor inferior aumenta el área del triángulo de explosividad. En este caso, al inyectar 3.9 m^3 de oxígeno, la atmósfera pasa de ser “Potencialmente explosiva” a “Explosiva”.

Para la detección en tiempo real de las atmósferas explosivas se requiere de:

- Modulo de sensado: se compone de equipos estacionarios de medición de polvo de carbón, gases inertes, tóxicos y explosivos, distribuidos a lo largo de la excavación estratégicamente en las zonas de producción, en zonas de retorno de aire viciado y en menos proporción en las zonas de ingreso de aire dentro de una mina subterránea de carbón. Los equipos deben estar calibrados para mediciones en unidades de % de volumen o LEL. (Ver figura 7).
- Modulo de proceso: se compone de una torre de control fuera de la mina subterránea, que permita el análisis y validación de la información transmitida por los sensores por medio de un PLC. En la torre se encuentran los equipos de cómputo donde se instalará el aplicativo Atmósferas Explosivas 1.0®, acompañado de otros aplicativos para el control de equipos, producción y seguridad ocupacional, todo en tiempo real.

Finalmente, llega la información al usuario por medio del encendido de un semáforo de color rojo, amarillo y verde que indica respectivamente la explosividad, potencialidad y no explosividad de la atmósfera subterránea.

Conclusiones

Con los estudios necesarios y las herramientas disponibles es posible anticiparse a una situación

que se cree que es “imposible de predecir” como una explosión al interior de una mina subterránea de carbón. Se pueden controlar las variables que se requieren para una explosión y verificar el estado del ambiente mediante el monitoreo continuo, ya que el monitoreo por muestreos programados no garantiza la seguridad, debido a la concentración de los gases puede cambiar rápidamente durante la perforación.

Se pueden obtener resultados inmediatos de la explosividad del ambiente minero subterráneo utilizando valores de concentraciones de gases para posteriormente procesarlas con el aplicativo *Atmósferas Explosivas 1.0®*, por dos métodos: el triángulo de Coward y el método de la U.S. Bureau of Mines. Estos resultados se caracterizan de tres maneras: “Atmósfera Explosiva”, “Atmósfera Explosiva cuando se mezcla con aire” y “Atmósfera No Explosiva”.

Otras variables de explosividad como el IAT, El MAO y el índice de Jones Trickett también pueden ser medidos utilizando el aplicativo. El IAT (Cheng y Yang, 2011) indica que tan cerca o lejano se encuentra el verdadero punto de mezcla medido del límite de explosividad de la mezcla. Con el MAO (Máximo Oxígeno Admisible) (Timko y Derick, 2006) se puede determinar cuanta

cantidad de oxígeno requiere una mezcla de gases para convertirse en explosiva. El Índice de Jones Trickett (Morris, 1986) determina incendios subterráneos y la causa eventual de una explosión, si fue por combustión de polvo de carbón, por combustión de gases combustibles o por combustión de otros agentes como madera, caucho o plástico.

El programa también puede ser utilizado para el análisis de explosividad en otros ambientes confinados que contengan la presencia de gases combustibles como metano CH₄, Monóxido de Carbono CO e Hidrógeno y oxígeno.

Agradecimientos

El presente artículo hace parte del trabajo dirigido de grado en ingeniería mecánica del ingeniero Daniel Restrepo Echeverri. Se agradece especialmente a la Magíster en geología estructural Ana María Abad Posada quien fue la gestora primaria de la idea. Igualmente, se agradece al Geólogo Oswaldo Ordóñez Carmona, el cual con el apoyo del grupo de investigación en Georrecursos, Minería y Medio Ambiente incentivaron la realización de este artículo.

Referencias

- Castro Marín, P. Martínez G. (2000). Explosividad de gases desprendidos en los incendios subterráneos en minas de carbón. *Dyna* 129(2000), 51- 58.
- Cheng, J. W., & Yang, S. Q. (2011). Improved Coward explosive triangle for determining explosibility of mixture gas. *Process Safety and Environmental Protection*, 89(2), 89-94.
- Coward, H. F., & Jones, G. W. (1952). *Limits of flammability of gases and vapors* (No. BM-BULL-503). Bureau of Mines Washington D.C.
- Dougherty, H. N., & Özgen Karacan, C. (2011). A new methane control and prediction software suite for longwall mines. *Computers & Geosciences*, 37(9), 1490-1500.
- Janovsky, B., & Zigmund, J. (2007). “Vybuchovy trojuhelnik”: A software tool for evaluation of explosibility of coal mine atmosphere. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20(4), 517-522.
- McPherson, M. J. (1993). *Subsurface ventilation and environmental engineering* (Vol. 131). London: Chapman & Hall.
- Morris, R. (1987). *Spontaneous combustion in coal mines and the interpretation of the state of a mine fire behind the stoppings* (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
- Timko, R. J., & Derick, R. L. (2006, April). Methods to determine the status of mine atmospheres—an overview. In *SME Annual Meeting and Exhibit*. Preprint, 06-062.
- Zabetakis, M. G., Stahl, R. W., & Watson, H. A. (1959). *Determining the explosibility of mine atmospheres*. US Dept. of the Interior, Bureau of Mines.
- Zhu, C., Lu, Z., Lin, B., & Jiang, B. (2010). Effect of variation in gas distribution on explosion propagation characteristics in coal mines. *Mining Science and Technology (China)*, 20(4), 516-519.

Sobre los autores

Daniel Restrepo Echeverri

Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente labora en la empresa Tepsa
drestrepoe@unal.edu.co

Sergio Ríos Cano

Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia. Tecnólogo en Construcciones Civiles del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Actualmente se desempeña como contratista de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Ha sido gestor del proyecto de innovación tecnológica como “*Monitoreo de atmósferas explosivas subterráneas en minería de carbón Distrito Minero de Amagá*” y “*Monitoreo de atmósferas explosivas subterráneas en minería de carbón Distrito Minero del Norte de Boyacá*” ambos financiados por la Facultad de Minas. También

ha participado en la elaboración de proyectos del sector minero.
shrios@unal.edu.co

Jovani Alberto Jiménez Builes

Profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Doctor en Ingeniería - Sistemas, Universidad Nacional de Colombia. Pasantía doctoral Grupo de Inteligência Artificial, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Magister en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia. Licenciado en Docencia de Computadores, Universidad de Medellín, Colombia. Ha realizado dos pasantías de investigación después de finalizar su doctorado, en Massachusetts Institute of Technology - MIT, Estados Unidos y Universidad Autónoma de Madrid, España. De igual manera, llevó a cabo una visita académica y tecnológica a nueve laboratorios de seis universidades en varias ciudades de Japón.
jajimen1@unal.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.