

# SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO AUTOMATIZADO PARA GASES EN MINAS DE CARBÓN

Ing. Dr. Mont. Carlos Guillermo Carreño Bodensiek

## *Resumen:*

El presente artículo describe el desarrollo de un sistema de monitoreo y control de los principales gases que se producen al interior de las minas de carbón. Este desarrollo se basa en una aplicación de la instrumentación virtual. Se divide en tres partes fundamentales: la adquisición de los datos en tiempo real de cada uno de los gases a controlar, en segundo lugar el diseño del sistema de monitoreo que consiste en una aplicación de software que permite el ajuste de los rangos permisibles de los gases y la generación de reportes de control; y por último, el sistema de control de la ventilación, para reducir los niveles críticos de gases que perjudican al personal de trabajo. Este trabajo de investigación en el área de aplicación tecnológica hace parte los proyectos realizados por el grupo de Investigación GENTE, de la Escuela de Ingeniería Electromecánica, UPTC – Duitama.

## *Palabras Clave:*

Minas de carbón, Monitoreo y Control, Instrumentación virtual, Sensores.

## *Abstract:*

The present article describes the development of a system of monitoring and control of the principal gases that take place to the interior of the coal mines. This development is based on an application of the virtual instrumentation. It divides in three fundamental parts: the acquisition of the real time information of each one of the gases to controlling, secondly the design of the system of monitoring that consists of an application of software that there allows the adjustment of the permissible ranges of the gases and the generation of reports of control and finally the system of control of the ventilation, to reduce the critical levels of gases that they harm to the personnel of work. This research work in the area of technological application does there divide the projects realized by the research group GENTE, of the School of Electromechanical Engineering, UPTC - Duitama.

## *Keywords:*

Coal mines, Monitoring and control, Virtual Instruments, Sensors.

Profesor Asociado, Grupo de Investigación GENTE, Escuela de Ingeniería Electromecánica, UPTC – [carrenobodensiek@gmail.com](mailto:carrenobodensiek@gmail.com)  
Ing. Hernando Mesa Rodríguez, Grupo de Investigación GENTE, Escuela de Ingeniería Electromecánica, UPTC

## I. INTRODUCCIÓN

Las minas de carbón del país cuentan con un sistema de monitoreo y control de gases deficiente lo que redundo en que la labor en el frente de trabajo sea de muy alto riesgo. Este informe presenta una alternativa para solucionar el problema y así lograr que las empresas administradoras de las minas de carbón puedan cumplir con lo establecido en el decreto N° 1335 de julio 15 de 1987 (Ministerio de Minas y Energía, 1987) expedido por el Ministerio de Minas y Energía el cual hace referencia al reglamento de seguridad en las labores subterráneas, especialmente en el título 2, que hace referencia a ventilación en el ambiente de trabajo en el capítulo 1, artículo 26.

En primer lugar se enuncian las características, origen y efectos de los cuatro principales gases que se producen en los frentes de trabajo, seguidamente se presenta un informe de los niveles de esos gases, calculados en diferentes minas de la empresa Cooproval, finalmente se expone el diseño del sistema de monitoreo y control describiendo los diferentes componentes y aplicaciones usados y la forma en que éste sistema opera.

## II. CARACTERÍSTICAS DE LOS GASES

Los principales gases que se encuentran en el frente de trabajo de las minas de carbón son el monóxido de carbono (CO), el grisú (CH<sub>4</sub> + Aire), el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y el oxígeno (O). Se presentan a continuación las características de cada uno de estos gases, su origen y los efectos fisiológicos que pueden presentarse por la inhalación o falta de estos.

1. Monóxido de Carbono (CO): Es un gas muy venenoso, sin color, sin sabor, sin olor; soluble en agua y presenta gran afinidad con la hemoglobina de la sangre, reduciendo el oxígeno en los tejidos.

Se compara a un anestésico local y ocasiona intoxicación y debilidad que impide movilizarse del sitio de trabajo. Su límite máximo permisible en la sangre es de 0.005%, 50 ppm (ICONTEC, 1996). Se origina a partir de trabajos con explosivos, funcionamiento de motores diesel y de combustión, incendios y explosiones de grisú, oxidación del carbón y a partir del uso de lámparas de carburo o de llama abierta.

2. Grisú (CH<sub>4</sub> + Aire): Es un gas incoloro, inodoro e insípido, no es venenoso, pero si incómodo para la respiración. En concentraciones mayores al 30% produce asfixia por falta de oxígeno, en condiciones normales el metano es inerte. Su principal propiedad es la de ser altamente combustible al mezclarse con el aire. Si se enciende una llama en una mezcla de grisú y aire con menos del 5%, el metano que entra en contacto con la llama se va quemando, aumentando su luminosidad y se rodea de un color azul; sin que la combustión del grisú se propague al resto de la mezcla. El índice de explosividad del grisú oscila entre el 5% y 14%; dependiendo de la temperatura, presión, mezcla con otros gases y forma de la galería o túnel. La combustión perfecta corresponde a 9% CH<sub>4</sub> y 91% de aire. Se origina a partir de emanación del carbón y rocas acompañantes, previa transformación sufrida por grandes masas de restos vegetales. El grisú puede encontrarse en las grietas, poros y superficie del carbón o formando parte de una estructura sólida del mismo según sea la presión.

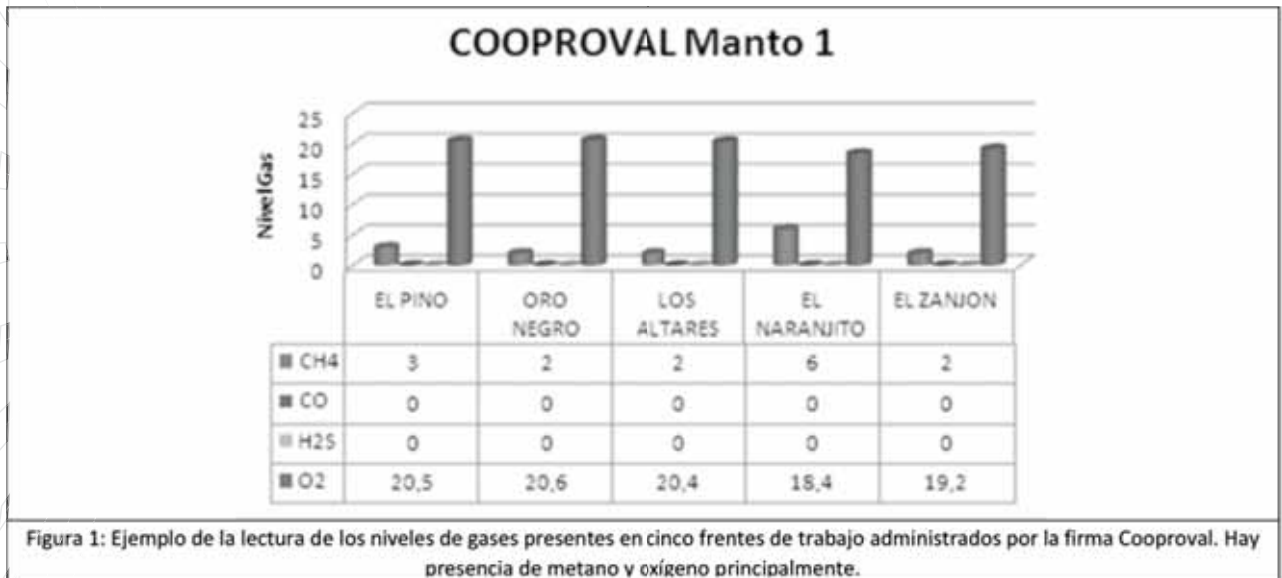
No tiene acción nociva sobre los organismos por no ser tóxico pero su presencia en porcentaje elevado disminuye el oxígeno produciéndose por ello asfixia. Los límites máximos permisibles, según el decreto 1335 son: En labores de explotación: 1.0% 10.000 ppm, en retornos principales de aire: 1.0% - 10.000 ppm, en el retorno de aire en los tajos: 1.5% - 15.000 ppm, en el retorno de labores de desarrollo y preparación 1.5% - 15.000 ppm. En sitios donde sea detectada una concentración de metano igual o mayor al 2%, deben ser evacuados de inmediato el personal que labore en estos frentes.

3. Acido Sulfhídrico ( $H_2S$ ). Es un gas incoloro, soluble en agua, venenoso, fácil de reconocer por su olor a huevos podridos. Arde y es explosivo cuando su concentración es del 6%. Se produce por descomposición de la madera, descomposición de la pirita y de minerales que contengan azufre. Por ser soluble en agua se encuentra en aquellas aguas que acompañan al carbón y en gases producidos por incendios. Su inhalación produce irritación en vías respiratorias y conjuntivitis, catarro, vómitos y cólico. Produce la muerte después de media hora de efecto en niveles de 0.05% - 0.06%, pérdida del conocimiento y muerte en pocos minutos, 1.0%. Su límite máximo permisible es de 0.002% (20 ppm.)

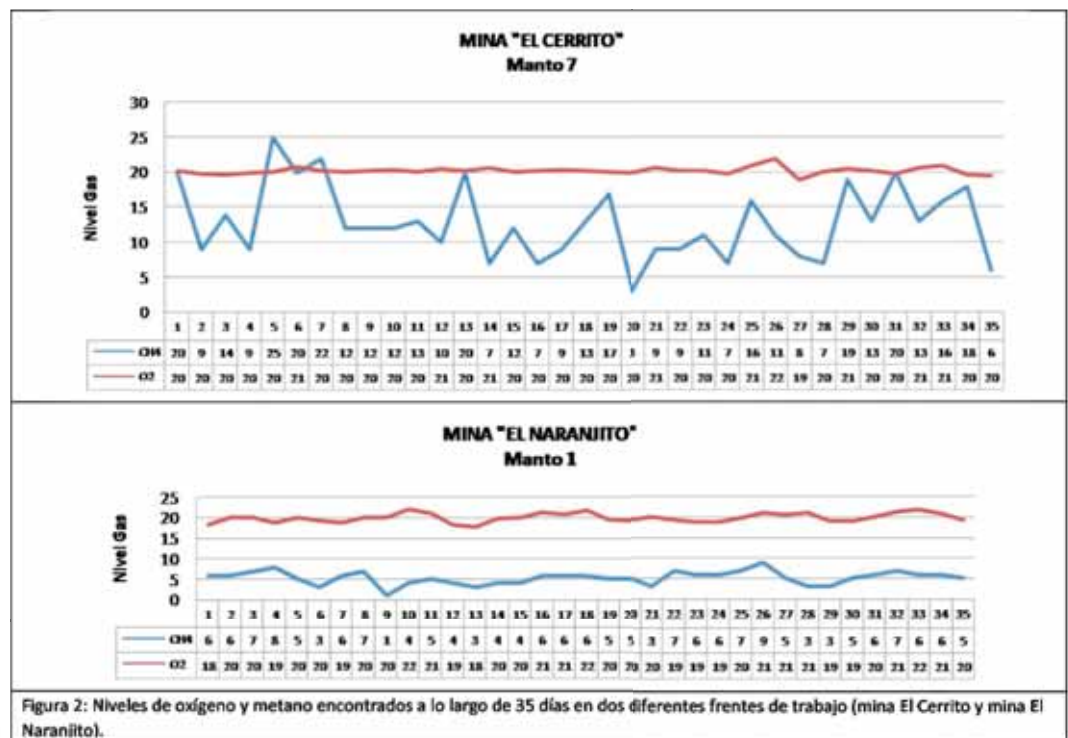
4. Oxígeno ( $O_2$ ): Es un gas incoloro, inodoro e insípido. El efecto en la respiración radica en la disminución de su concentración. Las principales causas de reducción son la oxidación y absorción del carbón. Según el trabajo realizado, una persona consume de 0.25 a 2.5 litros por minuto de oxígeno, aspirando de 7 a 60 litros de aire por minuto y expulsando de 0.2 a 2.4 litros por minuto de  $CO_2$  (OIT, 2006). Los efectos fisiológicos a la baja concentración aumenta el ritmo respiratorio, 18% - 12%. Se presenta vómito, respiración baja y rápida, espasmo respiratorio en niveles por debajo de 10% - 6%. Ocasiona la muerte en corto tiempo cuando su presencia es inferior al 5%. Si se presenta una concentración menor al 18%, se debe cerrar el frente de trabajo.

#### I. MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS GASES EN LA MINA

Se realizaron lecturas en cada una de las minas activas administradas por la empresa y se determinaron los niveles de los gases a lo largo de 35 días. En las minas de Cooproval, el gas de mayor incidencia es el Metano ( $CH_4$ ), como se presenta en la figura 1.



La figura 2 presenta los niveles medidos de metano (CH<sub>4</sub>) y Oxígeno (O<sub>2</sub>) a lo largo de 35 días en dos frentes de trabajo diferentes (mina El Cerrito y mina El Naranjito). Se puede notar que en la mina El Cerrito los niveles de oxígeno descienden a un mínimo de 19% de concentración y los niveles de metano alcanzan el nivel máximo de 25% de concentración en un solo instante de medición. Los datos encontrados en la mina El Naranjito son más estables mostrando que los niveles de oxígeno no descienden por debajo de 17% de concentración y la concentración de metano nunca está por encima de 8% de concentración.





La figura anterior muestra claramente que la variabilidad de la concentración de los gases nocivos como el metano es considerable. Estos registros justifican la importancia de desarrollar un sistema de control y monitoreo que proporcione una alternativa de solución en **seguridad laboral minera, que además es un requerimiento inamovible para el desarrollo del trabajo de minería según**, el decreto N° 1335 de julio 15 de 1987 expedido por el Ministerio de Minas y Energía, y el registro y estadística de accidente de trabajo y enfermedad profesional estipulado en la norma NTC 3701 1995 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC, 1995).

## I. SENSORES

En el siguiente capítulo se hace referencia a los principios de funcionamiento de cada uno de los sensores pertinentes para el desarrollo del sistema de control y monitoreo automatizado para gases y los métodos de selección de los sensores dependiendo de las necesidades requeridas (Biel, D. Lázaro, M. 2002).

1. *Electroquímicos:* Los dispositivos de detección electroquímicos (figura 3a) consisten básicamente de electrodos envueltos en una solución electrolítica detrás de una membrana permeable. Las moléculas de gas pasan a través de la membrana para entrar en la interfaz electrodo/electrolito donde reacciones químicas y electroquímicas ocurren para generar un flujo de corriente eléctrica medible. El flujo de corriente está directamente relacionada con la concentración de gas sobre el rango de detección específico. En ausencia del gas a monitorear, se produce un flujo de corriente despreciable, en consecuencia se alcanza y mantiene un cero definitivo (sin corrimiento del cero). Una combinación de electrodos y química electrolítica mayormente determina el tipo de gas a detectar y provee selectividad química inherente.

1. *Catalíticos:* Los sensores catalíticos para gases combustibles (figura 3b) consisten en filamentos calientes (elemento activo y referencial) detrás de un arrestador de flama sinterizado de acero inoxidable. El elemento activo es tratado con un catalítico para efectivamente quemar u oxidar el gas mientras el elemento referencial no es reactivo y provee compensación para las condiciones ambientales; temperatura y humedad. Los dos elementos están configurados en un puente Wheatstone donde la exposición de gases combustibles crea un desbalance en el puente y genera una salida eléctrica directamente relacionada con la concentración de gas. El sensor de gas catalítico no es selectivo y detecta numerosos gases y vapores combustibles.

De estado sólido: Un sensor de estado sólido consiste en uno a más óxidos de metal de los metales de transición (figura 3c). Estos óxidos de metal se preparan y procesan para formar un sensor de película delgada. Se introduce un calentador dentro del sensor para mantenerlo a una temperatura óptima para la detección de gas.

Ante la presencia de un gas, el óxido de metal hace que el gas se disocie en iones cargados con el resultado de una transferencia de electrones. Un par de electrodos parcialmente embebidos en el óxido de metal mide el cambio de conductividad del sensor.

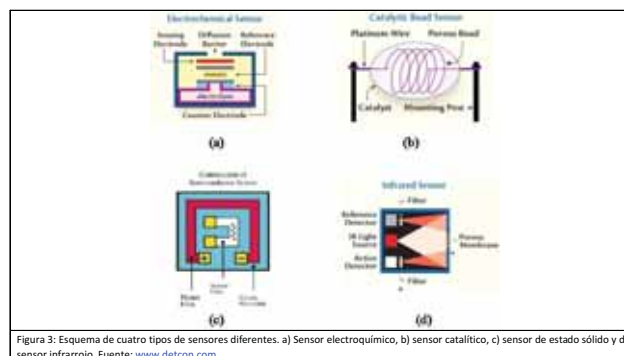


Figura 3: Esquema de cuatro tipos de sensores diferentes. a) Sensor electroquímico, b) sensor catalítico, c) sensor de estado sólido y d) sensor infrarrojo. Fuente: [www.detcon.com](http://www.detcon.com)

1. *Infrarrojos (NDRI)*: Los detectores infrarrojos (figura 3d) están basados en el principio de absorción infrarroja por moléculas de gas a longitudes de onda específicas en la región infrarroja. El sensor utiliza una lámpara infrarroja y dos detectores; activo y referencia. El detector activo es cubierto por un filtro óptico el cual permite la transmisión de radiación infrarroja a una longitud de onda específica donde se conoce que el gas a medir absorbe. El elemento de referencia es cubierto por un filtro que transmite longitudes de ondas fuera de la banda de absorción. Este arreglo provee compensación por cambios normales en la intensidad de la lámpara durante el tiempo.

El detector activo es cubierto por un filtro óptico el cual permite la transmisión de radiación infrarroja a una longitud de onda específica donde se conoce que el gas a medir absorbe. El elemento de referencia es cubierto por un filtro que transmite longitudes de ondas fuera de la banda de absorción. Este arreglo provee compensación por cambios normales en la intensidad de la lámpara durante el tiempo. El detector infrarrojo puede ser suministrado para medir hidrocarburos (LEL) o dióxido de carbono. A diferencia de los sensores catalíticos para detección de hidrocarburos, el sensor infrarrojo no es afectado por inhibidores catalíticos o envenenamiento.

2. *Foto-ionización (PID)*: El detector de fotoionización (PID) utiliza luz ultravioleta (UV) para ionizar las moléculas de gas. Puede detectar componentes orgánicos volátiles (VOCs). Una lámpara de construcción especial genera energía radiada UV. Esta energía ioniza las moléculas de gas. Los electrones libres resultantes colisionan con los electrodos del instrumento, produciendo una corriente. La magnitud de la corriente es proporcional a la concentración del gas.

## II. SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO

La instrumentación virtual permite poder realizar monitoreo en tiempo real de sucesos físicos (Lazaro, M, Fernández, J. 2005). Con la ayuda de la aplicación LabVIEW® se diseñó un software que es capaz de tomar decisiones de alerta y ventilación, cuando los niveles de gases como oxígeno y los gases tóxicos (ácido sulfhídrico, monóxido de carbono y metano) presentes en la mina de carbón sean perjudiciales o atenten con la integridad del trabajador. Además esta aplicación tiene la capacidad de almacenar dichos registros y mostrarlos periódicamente. Es una herramienta que trabaja con personal de control o automáticamente.

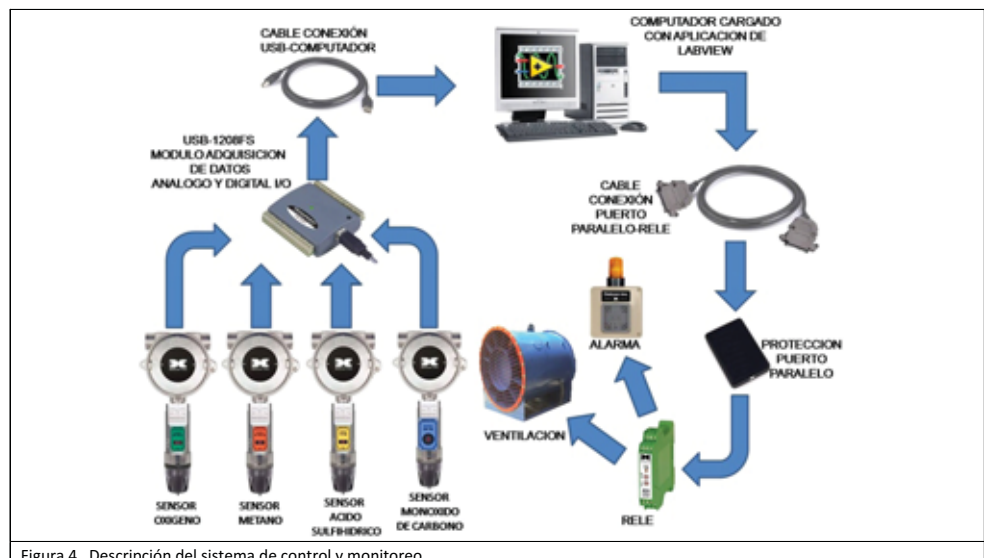


Figura 4. Descripción del sistema de control y monitoreo.

El sistema se fundamenta en la utilización de sensores dedicados a la detección de gases nocivos y niveles de oxígeno; estos niveles son reportados al sistema instalado en la PC a través de una tarjeta de adquisición de datos (Figura 4). Dependiendo del nivel crítico detectado, el sistema toma la decisión de activar la ventilación o alarma según corresponda. Es una herramienta que permite trabajar con personal vinculado a ella o automáticamente. La selección de sensores se realizó de acuerdo con los gases que se monitorean en la empresa Cooproval y dependiendo del tipo de gas, se obtuvo el tipo de sensor a utilizar como se presenta en la tabla 1.

GASES A MONITOREAR	TIPO DE SENSOR
Acido Sulfhídrico, H <sub>2</sub> S	Sensor de Estado Sólido
Metano, CH <sub>4</sub>	Sensor Infrarrojo
Monóxido de Carbono, CO	Sensor Electroquímico
Oxígeno, O <sub>2</sub>	Sensor Electroquímico

Tabla 1. Clasificación de los sensores de detección de acuerdo a tipo de gas a monitorear

Para el sistema de adquisición de datos se seleccionó una tarjeta de la firma Measurement Computing® que es una empresa que desarrolla tarjetas de adquisición de datos de bajo costo para interfaces ISA, PCI y USB para computadoras personales (figura 5). El software de control LabVIEW® proviene de la compañía National Instruments®. Una tarjeta de adquisición de datos de este tipo es el USB 1208FS que posee 8 canales de entrada analógica. Tiene una resolución de 12-BIT, 50 kilomuestras/segundo (tasa de muestreo), dos salidas de D/A y 16 Digital I/O, en una presentación miniatura. Todas las señales son accesibles con tornillos en las terminales laterales. Su conexión es por USB.



Figura 5. Tarjeta de adquisición de datos USB 1208FS

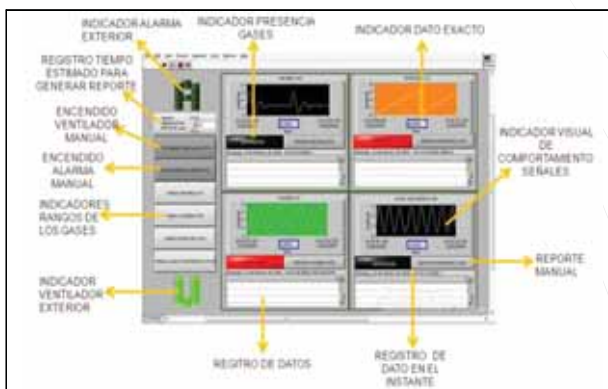


Figura 6. Descripción del panel frontal del sistema de control y monitoreo diseñado en LabVIEW para cuatro tipos de gases diferentes.

El software diseñado en LabVIEW 8.2, tiene la capacidad de monitorear cuatro canales en tiempo real, cada entrada está controlada en cinco niveles, los cuales están estratificados en nivel 1, nivel 2, nivel de precaución, nivel de alerta y nivel de peligro, los cuales se denotaron a partir del nivel máximo permisible para cada uno de gases a controlar y monitorear como se muestra en la tabla 2 y en la figura 6.

El sistema solo reconoce valores de 4–20 mA que son los transmitidos por los sensores, lo que significa que cada gas estará entre estos valores mínimos 4 mA y máximo 20 mA y así responderá la señal en el panel frontal del sistema. Los datos reales están de acuerdo con la calibración y rango de medida de cada sensor.

GAS	RANGO MEDICION SENSOR	RANGOS ESTIPULADOS PARA SOFTWARE
<b>Acido Sulfhídrico H<sub>2</sub>S</b> Límite Máximo Permissible: 0.002% (20ppm)	0-20 ppm	Nivel 1 < 0.001% (10ppm) Nivel 2 = 0.001% (10ppm) Nivel de precaución = 0.0015% (15ppm) Nivel de alerta = 0.002% (20ppm) Nivel de peligro = 0.0025% (25ppm)
<b>Metano CH<sub>4</sub></b> Límite Máximo Permissible: 1.0% (10000ppm) (5%-15% Mezcla explosiva)	0-100% LEL (Límite explosivo inferior)	Nivel 1 < 5 LEL Nivel 2 = 10 LEL Nivel de precaución = 20 LEL Nivel de alerta = 30 LEL Nivel de peligro = 40 LEL
<b>Monóxido de Carbono CO</b> Límite Máximo Permissible: 0.005% (50ppm)	0-100 ppm	Nivel 1 < 0.002% (20ppm) Nivel 2 = 0.002% (20ppm) Nivel de precaución = 0.003% (30ppm) Nivel de alerta = 0.004% (40ppm) Nivel de peligro = 0.005% (50ppm)
<b>Oxigeno O<sub>2</sub></b> Límite Mínimo Permissible: 18% (180000ppm)	0-25%	Nivel 1 < 19% (190000ppm) Nivel 2 = 19% (190000ppm) Nivel de precaución = 18.5% (185000ppm) Nivel de alerta = 18% (180000ppm) Nivel de peligro = 17% (170000ppm)

Tabla 2. Estipulación de los niveles de control para los cuatro gases a monitorear.

La activación de los sistemas de ventilación se realiza cuando cualquiera de los gases monitoreados alcanzan el Nivel 2 pudiéndose verificar en el panel frontal (Fig. 6) y la señal de alarma será activada cuando se alcance el nivel de peligro en cualquiera de los distintos registros siendo igualmente verificado en el panel frontal, estas dos decisiones tomadas por el sistema son ejecutadas por el puerto de control (puerto paralelo). La figura 7 describe el circuito del sistema de monitoreo y control de gases.

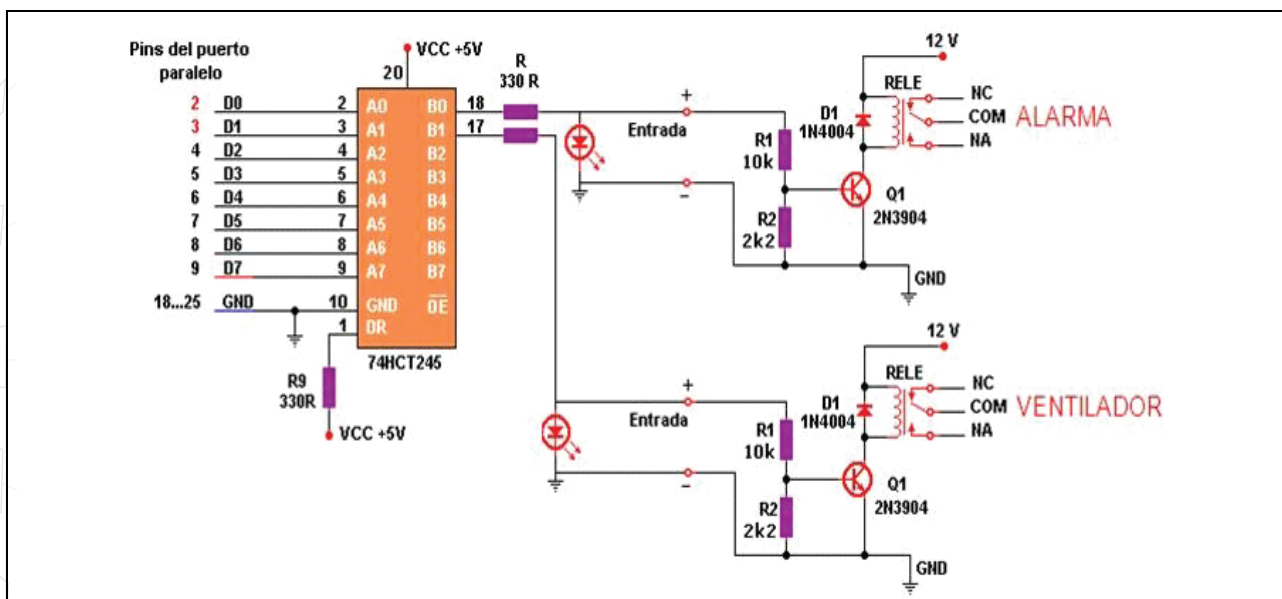


Figura 7. Circuito control sistema monitoreo.



En cuanto al registro de datos, el software permite almacenar hasta 30.000 datos en cada una de las listas de los paneles designados para cada gas. El software tiene la autonomía de generar reportes en el momento deseado o programado en el panel frontal en rangos deseados en fracciones de minutos. Para la generación de reportes por programación de tiempo, se debe especificar el tiempo deseado para la ejecución de dicha orden antes de arrancar el funcionamiento del software; por defecto tiene cero minutos.

### I. CONCLUSIONES

1. Con este estudio se logró el diseño de un sistema de control y monitoreo automatizado, de acuerdo con las concentraciones de los diferentes gases, para lo cual se realizó un seguimiento diario e inspección de los sistemas de ventilación.
2. El sistema se diseñó de acuerdo con las mediciones realizadas de las concentraciones de los gases teniendo en cuenta la toxicidad y explosividad de los mismos.
3. El proyecto se centró en lograr un sistema de monitoreo en tiempo real y control de ventilación con un sistema de relevos, que permitiera una operación efectiva, con bajos costos de operación, tratando al máximo de reducir las operaciones de manipulación por parte de los trabajadores.
4. El diseño del sistema de control y monitoreo condujo a la consecución de las mejores alternativas, tanto de sensores como de la instrumentación virtual que permitieran una mejor operatividad del sistema a bajo costo.
5. Para la verificación del software se realizó prueba de señales en la tarjeta de adquisición demo logrando así la observación en tiempo real de la respuesta del sistema a la salida del puerto paralelo.
6. El sistema de control y monitoreo no se puede aplicar a todas las minas sin antes realizar un seguimiento exhaustivo del comportamiento y condiciones de los gases presentes en ellas.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biel, D. Lázaro, M. (2002) Instrumentación Virtual, Adquisición, Procesado y Análisis de Señales. Edicions UPC.S.L. España.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (1995). Norma Técnica Colombiana, NTC 3701. Norma Técnica Colombiana NTC 3701: Higiene y seguridad. Guía para la clasificación, registro y estadística de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales. Bogotá.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (1996) Norma Técnica Colombiana, NTC 3701. Registro y Estadística de accidente de trabajo y enfermedad profesional. Bogotá.
- Lazaro, M, Fernández, J. (2005) LabVIEW 7.1, Programación Grafica para el Control de Instrumentación. Thomson Editores. España.
- Lajara, R. Pelegri, José. (2007) LabVIEW, Entorno Gráfico de Programación. Alfaomega Grupo Editores. México.
- Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (1987) Reglamento de Seguridad en Labores Subterráneas). Decreto 1335, Bogotá.
- ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL TRABAJO (2006). **Repertorio de recomendaciones prácticas sobre seguridad y salud en minas de carbón subterráneas. Ginebra.**