

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL APLICADAS A LA VENTILACIÓN DE GASES EN MINAS SUBTERRÁNEAS

(Design and construction of a teaching prototype for the study of control strategies applied to the ventilation of gas in underground mines)

John Jairo Niño Tec\*, Marlon Mauricio Moreno\*\*, Juan Diego Nova\*\*, Juan Mauricio Salamanca PhD\*\*\*

\*Escuela de Ingeniería de Minas UPTC. Grupo de investigación DSP-UPTC, john.ninomerchan@uptc.edu.co, \*\*Escuela de Ingeniería Electrónica. Grupo de investigación DSP-UPTC,

\*\*\* Docente Escuela de Ingeniería Electrónica, director Grupo DSP-UPTC. Juan.salamanca@uptc.edu.co

(Recibido: el 3 de Febrero de 2014 y aceptado 14 de Mayo de 2014)

<p><b>Resumen:</b> El presente artículo muestra el diseño y construcción de un prototipo didáctico para el estudio y control de la generación de gases en las minas. Está organizado de la siguiente forma: revisión del estado de la cuestión sobre el sensado de gases en la ventilación de minas, descripción del prototipo, obtención de las curvas de reacción de la respuesta de los sensores del gas, diseño e implementación de la estrategia de control, análisis de los resultados y conclusiones.</p>	<p><b>Abstract:</b> This paper shows the design and construction of a teaching prototype for the study and control of gas generation in mines. It is organized in the following way: review of the state of the art on the sensing of gases on mines ventilation, description of prototype, obtaining of the curves of reaction of the response of the gas sensors, design and implementation of the control strategy, analysis of results and conclusions.</p>
<p><b>Palabras clave:</b> ventilación de minas, sensores de gas, prototipo, estrategia de control.</p>	<p><b>Keywords:</b> mine ventilation, sensing of gases, prototype, control strategy.</p>

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio del fenómeno de la ventilación de minas contempla variables como el cálculo de caudales de aire necesarios para el bienestar y la salud de los trabajadores mineros, el manejo de la humedad y temperatura de un punto de la mina, como también el control de gases en los frentes de explotación. En la actualidad existen *softwares* (VnetPc Pro. VnetPC PRO-Ventsim- Ventsim Visual) (Fytas, 2002) que pueden simular y calcular las anteriores variables. Estos programas tienen limitaciones pues emplean métodos numéricos para aproximar y calcular la dinámica de los gases, la cual es bastante compleja de modelar, si se consideran fenómenos de turbulencia (Witrant, Johansson & the HynX team, 2008; Viorel, 2011).

La evacuación de gases en las minas es uno de los fenómenos que más riesgo genera en una explotación minera, ya que existen minas como las de carbón que por su naturaleza no pueden escapar a las emanaciones de gas metano que trae consigo el carbón (Reed & Taylor, 2007; Ingeominas, 2011). Para la prevención de dicho riesgo, actualmente existe en el mercado una gran variedad de sensores que pueden realizar la medición de gases en puntos determinados de la mina que son de prioridad para la seguridad de los mineros (Witrant, Niculescu & Marchand, 2008). Estos sensores permiten tener una lectura real del nivel de gas en el interior de la mina, dando así una garantía de seguridad a los mineros. Las lecturas se pueden realizar en el punto de ubicación del sensor y en una estación de control principal, la cual por lo general está instalada en superficie, donde se conoce el nivel de gas en cada punto de la mina donde exista un sensor (Witrant et al., 2008).

Otra estrategia es el empleo de multidetectores de gases manuales, los cuales son asignados a cada minero como un implemento más para su seguridad. En el contexto nacional, las minas colombianas han sufrido las graves consecuencias de no emplear un buen sistema de control de gases, ya que los accidentes por explosiones a causa de gas metano han estado en aumento (Viorel, 2011).

El control de gases debe ser una prioridad para la industria minera, pero, a causa del retraso tecnológico que existe en el país, la forma de medir los niveles de gas es aún poco confiable. En las minas colombianas la forma de sensado de los gases es realizada por un minero (encargado de la ventilación) o un trabajador común, quien, en algunos casos, no tiene conocimientos básicos sobre ventilación y seguridad minera. La herramienta empleada para medir el nivel de gas en las minas es un multidetector de gases, el cual puede medir cuatro gases, por lo general, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub>. El tipo de gas que se genera en la explotación depende de las características de cada mina y del mineral extraído.

El proceso que realiza el operario es el siguiente: cuando el límite permisible del gas sobrepasa los valores seguros, el multidetector genera una alarma indicándole el nivel de gas presente en el sitio. Este procedimiento debe realizarse cada tres veces en un turno de trabajo. Las desventajas que trae este sistema de medición, consisten en que no son continuas, ya que solo la hace el operario en tiempos determinados, con el riesgo de que se pueda incrementar el nivel de algún gas peligroso (Reed & Taylor, 2007) como el metano, y esto puede suceder en instantes en que no se esté efectuando la medición.

Otra desventaja es que el operario está expuesto directamente al riesgo de la inhalación de gases tóxicos, debido a que en algunas ocasiones las lecturas dadas por el multidetector son erróneas, puesto que estos equipos deben ser calibrados cada tres meses. Por todo lo anterior, la ventilación es esencial para la operación minera subterránea y para la construcción de edificios inteligentes. Por ello es necesario el diseño de prototipos didácticos para el estudio, la simulación y control de los fenómenos de la ventilación en ductos, recintos cerrados y cavidades (Witrant, Johansson & the HynX team, 2008; Olaru, Sandou, Witrant & Niculescu, 2008). Una de las acciones más importantes en el proceso de la ventilación es el control de los gases generados en el interior de la mina, especialmente en minas de carbón, las cuales son las principales afectadas por este problema, que genera un alto riesgo para quienes trabajan en ellas (Reed & Taylor, 2007; Ministerio de Minas y Energía, 2005; Ingeominas, Salamanca, Niño & Martínez, 2011).

Debido a la importancia del fenómeno de generación de gases en las minas, la academia, que prepara a los profesionales encargados de trabajar y estudiar las mejores maneras de realizar la minería, debe contar con las herramientas necesarias para enseñar a tratar y controlar este fenómeno. Para un buen aprendizaje del problema de control de gases en las minas, se requiere que las universidades e institutos técnicos cuenten con prototipos reales a escala de las minas, ductos y cavidades, con los que se pueda estudiar la emisión de gases y los efectos de las estrategias de control para una ventilación adecuada.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA MINA PROTOTIPO



Figura 1. Vista de la entrada a un túnel de la mina El Uvo Acerías Paz del Rio Boyacá Colombia.

Como referencia para este diseño se analiza la mina de hierro El Uvo. El prototipo funciona con dos ventiladores principales axiales, ubicados en el exterior de la mina, que ingresan un caudal de aire a las dos galerías por medio de ductos de ventilación. Este sistema se emplea en casos donde un frente de explotación no puede recibir aire de forma natural, ya sea porque no está comunicado con otra labor minera o porque está demasiado alejado del circuito de ventilación principal. Estos tipos de frentes o galerías se denominan frentes ciegos.

En el prototipo se tienen sensores de gas CH<sub>4</sub> y CO, los cuales están ubicados en cada galería de la mina. En estas se inyecta gas butano para simular la generación de gases en un frente de explotación minera. Se decide emplear estos sensores, ya que el gas CH<sub>4</sub> y el CO son los gases más letales que existen en minería. En las figuras 2 y 3 se observa el prototipo implementado y en la Tabla 1 se muestran las principales características de los sensores utilizados. Es importante aclarar que estos sensores se emplean didácticamente. En condiciones reales, los sensores deben estar encapsulados y aislados del ambiente minero, para protegerlos de las duras condiciones de la mina. Los sensores deben cumplir con las norma "ATEX" (Appareils destinés à être utilisés en ATmosphères EXplosives) o la EExl, las cuales regulan el funcionamiento de un equipo en condiciones y ambientes explosivos. Los equipos eléctricos que operan en minas deben estar aislados de los gases, para prevenir que se produzca una explosión.

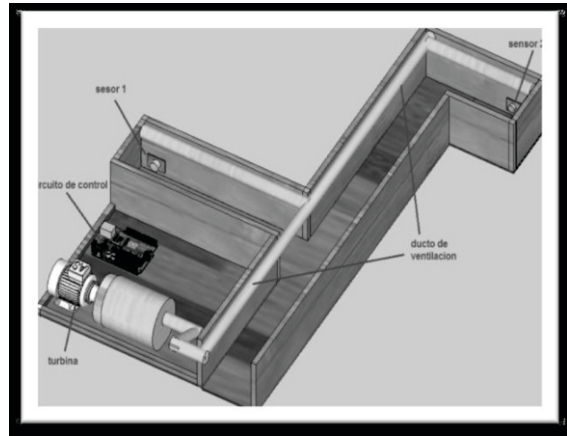


Figura 2. Prototipo diseñado.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del Sensor de gases utilizado

Model No.		MQ-2	
Sensor Type		Semiconductor	
Standard Encapsulation		Bakelite (Black Bakelite)	
Detection Gas		Combustible gas and smoke	
Concentration		300-10000ppm (Combustible gas)	
Circuit	Loop Voltage	V <sub>c</sub>	≤24V DC
	Heater Voltage	V <sub>H</sub>	5.0V±0.2V AC or DC
	Load Resistance	R <sub>L</sub>	Adjustable
Character	Heater Resistance	R <sub>H</sub>	31Ω±3Ω (Room Tem.)
	Heater consumption	P <sub>H</sub>	≤900mW
	Sensing Resistance	R <sub>s</sub>	2KΩ-20KΩ (in 2000ppm C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )
	Sensitivity	S	R <sub>s</sub> (in air)/R <sub>s</sub> (1000ppm Isobutane) ≥5
Condition	Slope	α	≤0.6 (R <sub>s</sub> 5000ppm/R <sub>s</sub> 1000ppm CH <sub>4</sub> )
	Tem. Humidity		20°C±2°C ; 65%±5%RH
	Standard test circuit		V <sub>c</sub> : 5.0V±0.1V ; V <sub>H</sub> : 5.0V±0.1V
	Preheat time		Over 48 hours

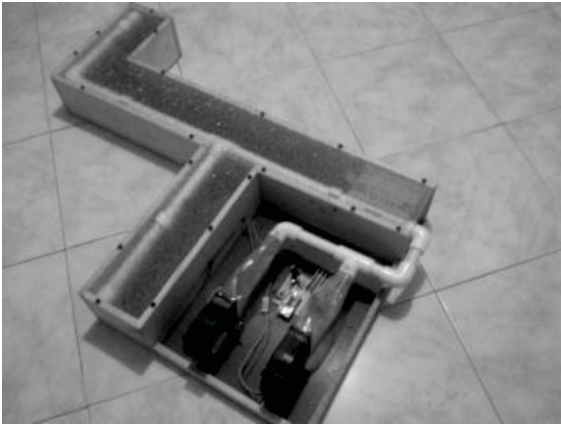


Figura 3. Prototipo diseñado

### 3. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE REACCIÓN

Para la obtención de las curvas de reacción de los sensores frente a una emisión de gases, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Obtención de un caudal nominal de aire.
2. Generación de una perturbación por emisión espontánea de gases en dos frentes.
3. Medición del comportamiento del gas bajo estas condiciones nominales.
4. Respuesta del comportamiento del gas frente a un aumento y a una disminución porcentual de la velocidad de los ventiladores.
5. Las curvas de reacción se obtuvieron al realizar contaminación de cada uno de los frentes de trabajo por separado con gas butano. La inyección del gas se hizo durante un intervalo de tiempo igual. Las turbinas operaron a una velocidad constante durante el proceso de contaminación, y la concentración del gas se reduce hasta cero. La curva resultante del promedio de este procedimiento se ilustra en la Figura 4. En esta gráfica se deduce que la dinámica de los sensores corresponde a un sistema de primer orden.

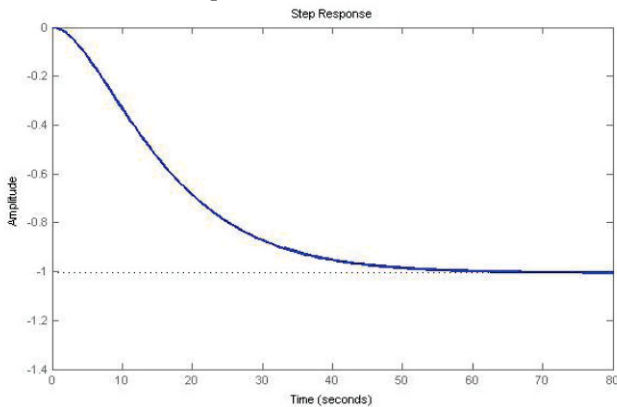


Figura 4. Curva de reacción del proceso.

De la curva de reacción se obtiene la función de transferencia generada por cada sensor (Witrant & Johansson, 2008).

$$G_1(s) = \frac{-0.104}{s + 0.1026} \quad (1)$$

Función de transferencia generada por el sensor 2

$$G_2(s) = \frac{-0.138}{s + 0.138} \quad (2)$$

De acuerdo con lo anterior podemos combinar en cascada las dos funciones de transferencia para generar la función de transferencia total, conservando el signo negativo relacionado con el comportamiento de los sensores frente a la inyección de aire.

$$G_2(s) = \frac{-0.357}{s^2 + 0.241s + 0.0142} \quad (3)$$

Para propósitos de diseño del controlador, la ganancia de la función de transferencia debe normalizarse por un factor de 2.5 generando la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{-0.01428}{s^2 + 0.241s + 0.0142} \quad (4)$$

### 4. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIGITAL

El controlador que se implementó es un PID digital, el cual se diseñó a partir de la función de transferencia en tiempo continuo y luego se discretizó utilizando el método de la aproximación trapezoidal.

La ecuación del PID continuo está dada por

$$u(t) = k_p \left[ e(t) + \frac{1}{\Gamma_i} \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau + \Gamma_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (5)$$

La correspondiente función de transferencia del PID es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{k_D s^2 + k_p s + k_I}{s} : \text{ Donde } k_D = k_p \Gamma_d \text{ y}$$

$$k_I = k_p / \Gamma_i \quad (6)$$

La aproximación trapezoidal del PID, en tiempo continuo, genera una ecuación discreta recursiva del PID.

$$u(nT_m) = u(n-1T_m) + \beta_0 e(nT_m) + \beta_1 e(n-1T_m) + \beta_2 e(n-2T_m) \quad (7)$$

Donde se definen los parámetros del PID digital:

$$\beta_0 = K_p \left[ 1 + \frac{\Gamma_D}{T_m} + \frac{T_m}{2\Gamma_I} \right] :$$

$$\beta_1 = -K_p \left[ 1 + 2\frac{\Gamma_D}{T_m} - \frac{T_m}{2\Gamma_I} \right] : \quad (8)$$

$$\beta_2 = \frac{K_p \Gamma_D}{T_m}$$

El PID digital se puede implementar como un filtro digital como se ilustra en la Figura 5.

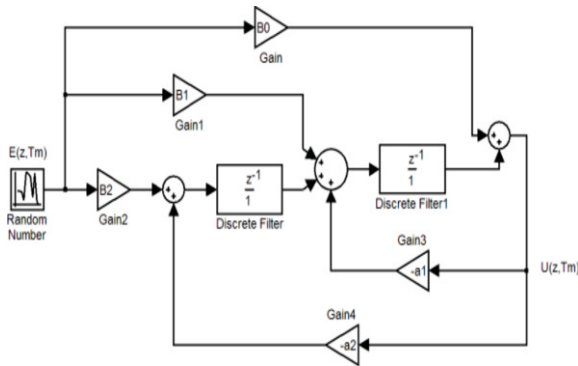


Figura 5. Estructura del PID digital en forma de filtro digital.

Esta ecuación se puede implementar en cualquier procesador digital con características básicas y con una buena selección del periodo de muestreo. Para el proyecto se utilizó el microcontrolador PIC 18f2455, cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 2. Especificaciones del microcontrolador PIC18F2455

**PIC18F2455/2550/4455/4550**

TABLE 1-1: DEVICE FEATURES

Features	PIC18F2455	PIC18F2550	PIC18F4455	PIC18F4550
Operating Frequency	DC - 48 MHz	DC - 48 MHz	DC - 48 MHz	DC - 48 MHz
Program Memory (Bytes)	24576	32768	24576	32768
Program Memory (Instructions)	12288	16384	12288	16384
Data Memory (Bytes)	2048	2048	2048	2048
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	19	19	20	20
I/O Ports	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	1	1
Enhanced Capture/Compare/PWM Modules	0	0	1	1
Serial Communications	MSSP Enhanced USART	MSSP Enhanced USART	MSSP Enhanced USART	MSSP Enhanced USART
Universal Serial Bus (USB) Module	1	1	1	1
Streaming Parallel Port (SPP)	No	No	Yes	Yes
10-Bit Analog-to-Digital Module	10 Input Channels	10 Input Channels	13 Input Channels	13 Input Channels
Comparators	2	2	2	2
Resets (and Delays)	POR, BOR, <small>RESET</small> Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, <small>RESET</small> Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, <small>RESET</small> Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, <small>RESET</small> Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
Programmable Low-Voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC	28-pin PDIP 28-pin SOIC	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP

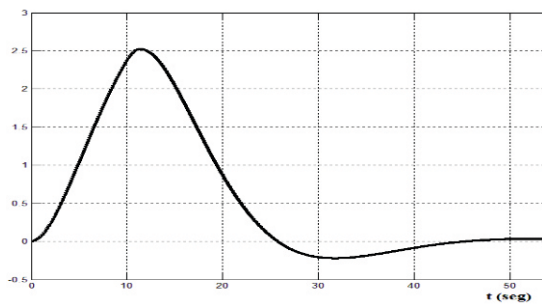


Figura 6. Señal de salida del sensor de gases con control PID.

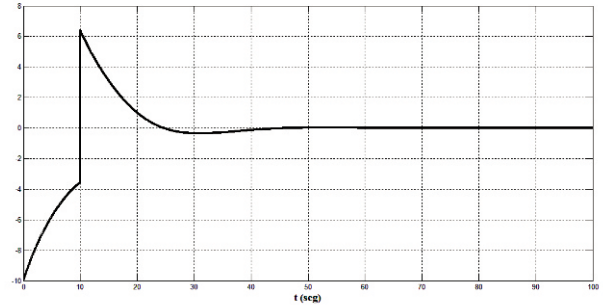


Figura 7. Señal de control a los ventiladores bajo control PID.

En las figuras 6 y 7 se ilustran las señales de salida y de control para el prototipo de ventilación bajo control PID digital. En ellas se observa la reducción de los gases desde un valor inicial alto hasta cero. Se nota el efecto de la dinámica de los dos túneles que derivan aire del eje principal de ventilación. Esta dinámica se aproxima a un sistema de segundo orden. El controlador PID digital funcionó adecuadamente en este caso.

**5. CONCLUSIONES**

Para la seguridad de los trabajadores que laboran en los frentes de extracción en las minas subterráneas es de vital importancia contar con un buen suministro de aire puro y un sistema que evacúe los gases generados en la explotación (Grau, Robertson, Mucho, García & Smith, 2002; Fytas, 2002).

Para la enseñanza y la comprensión de la dinámica de gases en una mina subterránea es primordial tener prototipos que permitan simular las condiciones de generación de gases en los frentes de extracción y la manera como se pueden evacuar de forma efectiva (Bandyopadhyay, Chaulya & Mishra, 2010; Witrant, Niculescu & Marchand, 2008).

El control digital es una buena herramienta para vigilar los ventiladores en un sistema de ventilación en una mina, debido a la facilidad de implementación en procesadores digitales. [8], [9], [11] (Witrant et al., 2008; Witrant, Johansson & the HynX team, 2008; Di Benedetto, D'Innocenzo, Serra & Witrant, 2008).

**REFERENCIAS**

Bandyopadhyay, L.K., Chaulya, S.K. & Mishra, P.K. (2010). *Wireless Communication in Underground Mines RFID- Based Sensor*. New York: Networking Springer.

Di Benedetto, M., D'Innocenzo, A., Serra, E. & Witrant, E. (2008). Automatic verification of wireless control in a mining ventilation system. *IEEE CASE*. Invited paper.

Fytas, K. (2002). *Développement d'un modèle intégré informatique pour la planification de la ventilation dans les mines souterraines Études et recherches / Rapport R-291*. Montréal: IRSST, 63 pages.

- Grau, R.H., Robertson, S.B., Mucho, T.P., García, F. & Smith, A.C. (2002). *NIOSH ventilation research addressing diesel emissions and other air quality issues in nonmetal mines*. USA: National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH).
- Ingeominas. 2011, agosto). Seguridad y salvamento minero. En *Congreso Internacional de Minería*. Medellín.
- Ministerio de Minas y Energía. (2005, nov.). *Distritos mineros: exportaciones e infraestructura de transporte*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética -UPME-.
- Olaru, S., Sandou, G., Witrant, E. & Niculescu, S. (2008). Receding horizon climate control in metal mine extraction rooms. *IEEE CASE*. Invited paper.
- Reed, W. & Taylor, C. (2007). *Factors affecting the development of mine face ventilation systems in the 20th century*. Pittsburgh, PA: National Institute for Occupational Safety and Health.
- Salamanca, J. M., Niño, J. J. & Martínez, O. H. (2011). Sistemas de control automático en la ventilación de minas. Importancia en la minería subterránea y su desarrollo en Colombia. En *IX Congreso Internacional de Electrónica y Tecnologías de Avanzada*.
- Viorel, B. (2011). *Stabilization of Navier Stokes Flows*. London: Springer Verlag.
- Witrant, E., Niculescu, S.I. & Marchand, N. (2008, June 25-27). A Real-Time Control Approach for Mine Climate Regulation. In *7th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (ICNPAA 2008), Genoa (Italy)*. Invited paper.
- Witrant, E., D'Innocenzo, A., Isaksson, A.J., Di Benedetto, M.D., Johansson, K.H., Santucci, F. & Strand, M. (2008, August 23-26). Mining ventilation control: a new industrial case for wireless automation. In *IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2008)*, Washington DC, USA, Invited paper.
- Witrant, E. & Johansson, K.H. (2008, August 23-26). Air Flow Modeling in Deepwells: Application to Mining Ventilation. In *4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering*.
- Witrant, E., Johansson, K. & the HynX team. (2008). Air flow modelling in deep wells: application to mining ventilation. *IEEE CASE*, Invited paper.