

Developement of a radio-controlled mobile robot applied to underground mining

J.G. Rodríguez-Ortiz¹, C. Morales–Morales¹, R. Espinoza-Castro¹, J. Navarrete–Damián¹

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, C.P. 76800, San Juan del Río, Querétaro, México.

juan.ro@sjuanrio.tecnm.mx, cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx, dir_sjuanrio@tecnm.mx, jaime.nd@sjuanrio.tecnm.mx

Abstract— Mining, as a productive sector, is a high-risk activity for the safety and health of the miner. In underground copper, silver, and zinc mines, the presence of toxic gas such as carbon monoxide (CO) during the excavation phase is common, while in coal mines, the presence of explosive gas, such as methane (CH₄), is common. The presence of these gases becomes a potential danger to the workers themselves due to inhalation or explosion in the absence of prevention. The latest official public report from the Camara Minera de Mexico (Mexican Mining Chamber) provides a figure of 322 deaths in underground mines during the period from 2010 to 2015 in national territory. Therefore, the use of a radio-controlled mobile robot equipped with instruments for exploration, supervision, and monitoring inside an underground mine is proposed in order to minimize the risk to the physical integrity of the miners. The W methodology developed by Nattermann Roland was used in the construction of the prototype. The project consists of the integration of a commercial robotic structure, a radio control system for aeromodelling, an infrared vision wireless system, a wireless video monitor, a methane gas sensor (MQ4), a carbon monoxide sensor (MQ7), a relative humidity sensor (HMZA-331), a temperature sensor (LM35), a Tx-Rx radio communication system with XBee® technology, a digital control system with PIC microcontroller, and a portable data receiver module. The portable module displays measurements of gas concentration, relative humidity, temperature, and includes an audible alarm and a visible red light alarm. The results obtained so far consist of a radio-controlled mobile robot with track traction and differential movement, equipped with instruments capable of detecting the presence of toxic (CO) or explosive (CH₄) gas in the environment with an average displacement speed of 0.31 m/s, an average communication range of 600 m outdoors and 250 m indoors, and an average autonomy of 40 min. The use of a radio-controlled mobile robot in underground mines is considered a useful technological tool in hostile and high-risk environments. The results achieved so far have demonstrated that the radio-controlled mobile robot is a viable option in the mining industry in Mexico; but also, it is a fertile area of research to implement other types of technologies such as developement with machine learning.

Keywords— Robot, Mines, Mining, Methane, Exploration, Monitoring.

Desarrollo de un robot móvil radiocontrolado aplicado a la minería subterránea

J.G. Rodríguez-Ortiz¹, C. Morales-Morales¹, R. Espinoza-Castro¹, J. Navarrete-Damián¹

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Av. Tecnológico No. 2, Quintas de Guadalupe, C.P. 76800, San Juan del Río, Querétaro, México.

juan.ro@sjuanrio.tecnm.mx, cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx, dir_sjuanrio@tecnm.mx, jaime.nd@sjuanrio.tecnm.mx

Resumen—La minería, como sector productivo, es una actividad de alto riesgo para la seguridad y la salud del trabajador minero. En minas subterráneas de cobre, plata y zinc es común la presencia de gas tóxico durante la fase de excavación como el monóxido de carbono (CO) mientras que, en minas de carbon mineral, es común la presencia de gas explosivo, como el gas metano (CH₄). La presencia de estos gases se convierte en un peligro potencial para el propio trabajador por inhalación o por explosión ante la falta de prevención. El último reporte oficial publicado por la Cámara Minera de México da una cifra de 322 muertes en minas subterráneas durante el periodo 2010 al 2015 en territorio nacional. Por tanto, se propone el uso de un robot móvil radiocontrolado, dotado de instrumentos para realizar tareas de exploración, supervisión y monitoreo al interior de una mina subterránea, a fin de minimizar el poner en riesgo la integridad física de los trabajadores mineros. En la construcción del prototipo se utilizó la metodología W desarrollada por Nattermann Roland. El proyecto consiste en la integración de una estructura robótica comercial, un sistema de radiocontrol para aeromodelismo, un sistema inalámbrico de visión infrarrojo, un monitor de video inalámbrico, un sensor de gas metano (MQ4), un sensor de monóxido de carbono (MQ7), un sensor de humedad relativa (HMZA-331), un sensor de temperatura (LM35), un sistema de radiocomunicación Tx-Rx con tecnología XBee®, un sistema de control digital con microcontrolador PIC y un módulo portátil receptor de datos. El módulo portátil muestra las mediciones de concentración de gases, humedad relativa, temperatura, e incluye una alarma audible y alarma mediante luz visible en color rojo. Los resultados hasta ahora obtenidos consisten en un robot móvil radiocontrolado de tracción por orugas con movimiento diferencial, dotado de instrumentos capaz de determinar la presencia de gas tóxico (CO) o explosivo (CH₄) en el medio ambiente con una velocidad de desplazamiento promedio de 0.31 m/s, un alcance de comunicación promedio de 600 m en exterior y 250 m en interior y una autonomía promedio de 40 min. El uso de un robot móvil radiocontrolado en minas subterráneas supone ser una herramienta tecnológica útil en ambientes hostiles y de alto riesgo. Los resultados alcanzados hasta ahora han permitido demostrar que el robot móvil radiocontrolado es una opción viable en la industria minera en México; pero también, es un área fértil de investigación para implementar otro tipo de tecnologías como el desarrollo con machine learning.

Palabras clave— Robot, Minas, Minería, Metano, Exploración, Monitoreo.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

I. INTRODUCCIÓN

La minería en México se considera una industria de alto riesgo; debido a que el trabajador minero tiene que trabajar en ambientes de constante transformación [1,2]. Según cifras de la Cámara Minera de México (CAMIMEX) reportadas en el anuario 2016 [3], la tasa de incidencia de accidentes en minas subterráneas es del orden de 3.2, según se muestra en la Fig. 1.

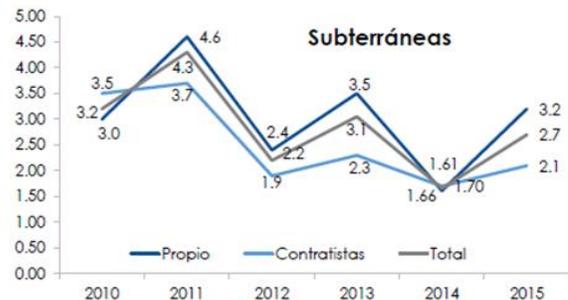


Fig. 1. Tasa de incidencia de accidentes en minas subterráneas en México.

Esto significa que, durante el periodo de los años 2010 al 2015, se produjeron 3.2 accidentes de trabajo por cada 100 trabajadores en activo en las empresas del sector afiliadas a la CAMIMEX.

Por otra parte, el número de accidentes fatales del 2010 al 2015 en México reportados por la CAMIMEX del anuario 2016, y cuya estadística a detalle fue la última comunicada de manera pública a la fecha, fué de 322 trabajadores muertos, según se muestra en la Fig. 2.

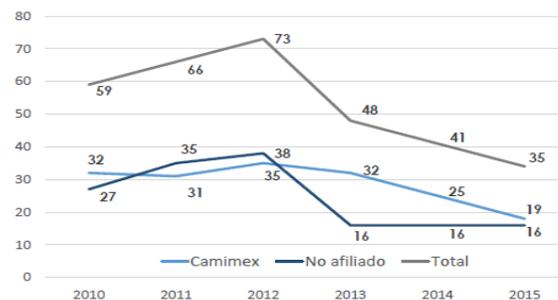


Fig. 2. Número de accidentes en minas subterráneas en México.

Ante esta situación, la CAMIMEX ha optado por implementar mecanismos para garantizar la seguridad en las minas subterráneas, como: la elaboración de normas oficiales mexicanas específicas para la industria minera, norma mexicana NOM-032-STPS-2008 [4], donde en su apartado 12.2 y 12.6 establece la necesidad de elaborar un análisis de riesgo de presencia de gas letal y elaboración de un plan de trabajo para prevenir los riesgos derivados de la explotación de la mina [5]. Actualmente han sido desarrollados tecnologías para la elaboración de un análisis de riesgos para la inspección a través de inspección *in situ* utilizando equipos portátiles medidores de gases tóxicos (monóxido de carbono) y/o explosivos (metano) que son transportados y operados por el mismo [6]. El inconveniente de este método tiene que ver con la dificultad de ingresar a zonas donde las condiciones físicas de acceso sean complicadas o riesgosas causadas por la orografía del terreno o por la presencia de gas tóxico o explosivo.

En México, la CAMIMEX reporta en su anuario 2021 [5], que existen en territorio nacional 119 unidades mineras de tipo cielo abierto y subterráneas que albergan un total de 94,444 trabajadores en activo; siendo el estado de Coahuila quien contiene aproximadamente el 95% de las reservas carboníferas de México [7]. En la Fig. 3 se muestra el estadístico de los fallecimientos y siniestros mineros en el estado de Coahuila y, en especial, en su región carbonífera [8].



Fig. 3. Número de accidentes y siniestros mineros en Coahuila, México al 2020.

Ante los problemas desafiantes que implica el trabajo minero en México y el mundo, las tecnologías se convierten en un hito tecnológico que pueden coadyuvar a prevenir riesgos de accidentes y mejorar las condiciones de seguridad del trabajador en minas, en este sentido, desarrollar robots móviles es una área de oportunidad tecnológica para reducir los accidentes en la minería [9,10,11].

II. ESTADO DEL ARTE

En Latinoamérica, se han realizado algunas investigaciones referentes a la aplicación de los robots móviles dentro de la industria minera como una alternativa tecnológica que coadyuve a presentar propuestas de solución que permitan disminuir la incidencia de accidentes en minas a cielo abierto y aquellas que se encuentran bajo tierra. A continuación, se muestra un panorama general del estado que guarda el desarrollo de los robots móviles clasificados en función de su sistema de locomoción utilizado para desplazarse: a) con

ruedas, b) con orugas o c) con patas [12,13] y que han sido diseñados para aplicaciones donde se requiere monitorear las condiciones del medio ambiente en cuanto a la presencia de gases tóxicos y/o explosivos.

A. Proyectos internacionales.

En Perú, se realizó un proyecto de investigación titulado “Estudio para el Diseño de un Robot Móvil Autónomo para Medición de Contaminantes del Aire y Suelo en el Corredor Minero del Sur” [14], mencionando que la industria minera provoca daños al medio ambiente, por contaminación, por lo que, propone diseñar un robot móvil autónomo capaz de medir los contaminantes del aire y suelo, de modo que se pueda acceder a esta información mediante el uso de una estación remota. Los contaminantes en el suelo a detectar fueron Arsénico (As), Cromo (Cr), Plomo (Pb), entre otros. Mientras que en el aire se detectaba Dióxido de Azufre (SO₂), Cobalto (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), entre otros. Los datos de los contaminantes, se envían a una plataforma en la nube (GoogleCloud®).

En Bolivia, los autores Helguero y Medinaceli [15], realizaron un estudio titulado: “Robot Minero: Sistema Detector de Gases utilizando Sensores en Tiempo Real MIN - SIS 1.0 SDG-STR”. Se trata de un prototipo mecatrónico móvil controlado mediante bluetooth®, con la capacidad de enviar imágenes por video y medir la concentración de gas tóxico (monóxido de carbono). Como resultado, los autores reportan que se tuvo un prototipo operativo adecuado para la aplicación a la que está dirigido. Sin embargo, mencionan que se hace necesario realizar más pruebas de campo a fin de garantizar el funcionamiento y la calidad del modelo en condiciones reales de operación.

En Colombia, los autores Valencia y Alvear [16] realizaron un prototipo de sistema de monitoreo distribuido de concentración de gases en la industria minera subterránea de carbón. El problema detectado giró en torno al procedimiento utilizado para detectar la presencia de gases al interior de una mina subterránea de carbon, donde un minero recorre la mina y hace un registro manual con ayuda de un dispositivo multidetector de gases. El proyecto consistió en un sistema de sensores de gas metano conectados vía alámbrica mediante comunicación RS485 y, de manera inalámbrica, con tecnología ethernet para la visualización de datos. Como resultado se reporta que se logró medir concentraciones de gas metano en ambiente de laboratorio configurados en red y visualizar los datos en una PC.

B. Proyectos nacionales.

En México, se encontró reportada en la literatura el diseño e implementación de un dispositivo móvil Terrestre para la detección de compuestos orgánicos volátiles [17] para detector compuestos orgánicos volátiles (COV). El sistema propuesto consiste en un robot tipo tanque con orugas y está equipado con sensores de proximidad infrarrojos. Los datos son recibidos y enviados a una computadora personal. El gas a detectar es monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂). Como resultado se obtuvo un dispositivo móvil funcional, capaz de esquivar obstáculos terrestres, equipado con un módulo para

monitorear la concentración de monóxido y dióxido de carbono, y comunicarse mediante antenas de radiofrecuencia, para desplegar la información del estado del dispositivo, en una interfaz gráfica de usuario.

Por otra parte, en [18] presentan el diseño de un robot móvil tipo antrópodo para evaluación de espacios confinados, cuyo objetivo fue implementar un prototipo robótico para atender los problemas derivados de la contaminación por inhalación de gas tóxico que no son perceptibles al olfato humano y en espacios reducidos de difícil acceso. El tipo de robot diseñado fue una estructura zoomórfica tipo araña de seis patas, dotado de un sensor de gas capaz de detectar gas LPG, i-butano, propano, metano, alcohol hidrógeno y humo, temperatura y humedad; además de una cámara de video inalámbrica tipo wifi con imagen en tiempo real a recibirse en un dispositivo móvil. Como resultado, los autores reportan que se logró la construcción de un prototipo básico construido con material plástico PLA (ácido poliláctico), capaz de desplazarse en superficies planas y bajo condiciones controladas de laboratorio.

III. DESARROLLO TECNOLÓGICO

Este artículo propone un prototipo de robot móvil radiocontrolado construido para exploración, supervisión y monitoreo en minas subterráneas que permite obtener información en tiempo real de las condiciones al interior de una mina con la finalidad de planear protocolos de prevención para salvaguardar la integridad física del ser humano, como se muestra en la Fig. 4.



Fig. 4. Propuesta de desarrollo tecnológico.

En el diseño del prototipo se utilizó la metodología W desarrollada por Nattermann Roland, a fin de minimizar errores durante el proceso de desarrollo del robot [1]. El robot se controla vía radiofrecuencia y permite realizar mediciones, en tiempo real, de la presencia de acumulación de gas metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), así como temperatura (T) y humedad relativa (HR), registrando la información de manera inalámbrica, a distancia, en un dispositivo portátil con pantalla LCD.

El prototipo está compuesto por: 1. Un módulo portátil receptor (Rx) de datos, 2. Un módulo de radiocontrol transmisor (tx) robot móvil, 3. Un monitor inalámbrico de video y 4. Una estructura robótica con instrumentos y tracción por orugas, como se muestra en la Fig. 5.

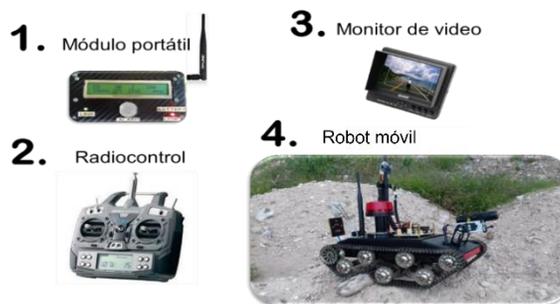


Fig. 5. Elementos del robot móvil para minería subterránea.

La Fig. 6 muestra la instrumentación incorporada en la estructura robótica, a fin de describir cada uno de los diferentes elementos que integran el proyecto.



Fig. 6. Pictografía de la instrumentación en el robot móvil para minería subterránea.

El módulo de radiocontrol (RC) utilizado para establecer comunicación y control de movimiento y velocidad con el robot móvil fue una unidad para aeromodelismo comercial modelo Optic 6 Sport de 6 canales a 2.4 Ghz de la marca HITEC® con su respectivo módulo receptor de radiofrecuencia [19].

El robot móvil es una estructura comercial llamada: T' Rex Metal Tank Robot Chassis ROHS marca DaguRobot® [20]. Está hecho de aluminio de alta resistencia y utiliza un par de orugas metálicas para su desplazamiento, utilizando la técnica de tracción diferencial para generar movimientos en los cuatro ejes coordenados [21].

El movimiento diferencial del robot se genera mediante una tarjeta electrónica controladora de motores de DC que se encarga de convertir las señales del RC a señales de movimiento. La tarjeta electrónica utilizada se llama: T' Rex Robot/Motor Controller de la marca Sparkfun® [22].

Sobre la estructura del robot móvil se monta un sistema de instrumentación con μ C de la marca MicroChip® que incorpora sensores de gas, temperatura, humedad relativa, un módulo transmisor de datos Xbee PRO S1®, antenas, torreta destellante en color rojo, un módulo generador de luz laser en color rojo, una lámpara de luz infrarroja, una batería LI-PO de 11.1 volts a 5000 mAh para la alimentación eléctrica de los motores de

corriente directa y una batería Li-PO de 7.4 volts a 2200 mAh para el sistema de control digital.

Así mismo, en el robot móvil se incluye un sistema de vision. Consiste en la incorporación de una cámara inalámbrica de video tipo alfiler infrarroja (IR) con lente CCD de 1/3", 1000 TVL, resolución HD, sistema de imagen NTSC con un ángulo de imagen de aproximadamente 85°, frecuencia de operación de 5.8 Ghz y alimentada a 5 volts de corriente directa [23].

La cámara de video se conecta directamente a un transmisor de video de la marca AOMWAY® modelo TX1000 de 5.8 GHz alimentado a 12 volts de CD y con una potencia de transmisión de 1000 mW [24], a fin de transmitir la señal de video y mostrarse en el monitor de soporte del usuario.

Un sistema de adquisición de datos constituye la instrumentación del robot móvil. El módulo de adquisición de datos se encarga de la lectura de las variables físicas a detectar por el robot; así como, del envío de datos de manera inalámbrica hacia un equipo portátil receptor. En general, este módulo "lee" de manera constante el valor presente en un sensor de temperatura LM35, un sensor de humedad relativa HMZ-331A, un sensor de gas metano MQ4 y un sensor de monóxido de carbono MQ7.

Las señales eléctricas analógicas de los sensores son recibidas a través del puerto A de un microcontrolador PIC 16F877A programado en PIC C®. Este microcontrolador PIC se encarga de convertir las señales analógicas leídas en cada sensor a datos comprensibles por el usuario; una vez hecho esto, el microcontrolador PIC envía los datos en protocolo RS232 TTL (a través de la USART del PIC) hacia un módulo electrónico de transmisión de datos digitales llamado XBee Pro S1®, como se muestra en la Fig. 7.

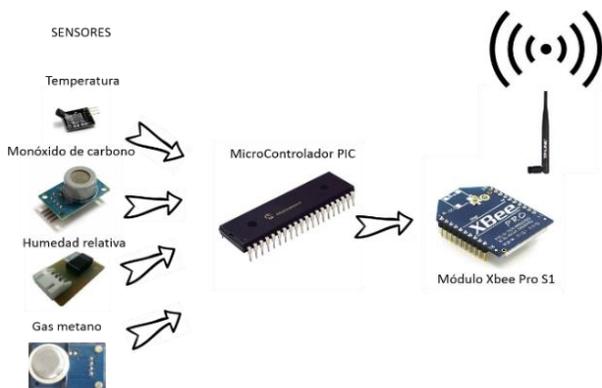


Fig. 7. Instrumentación electrónica del robot móvil para minería subterránea.

Las altas temperaturas constituyen un peligro tanto para los trabajadores de minas subterráneas como aquellas a cielo abierto. En las minas subterráneas la principal fuente de calor es la propia roca. La temperatura de la roca aumenta aproximadamente en 1 °C por cada 100 m de profundidad; además, la actividad física de los trabajadores, la cantidad de aire en circulación, la temperatura y humedad del aire en el ambiente, así como el calor generado por los equipos que se utilizan, son factores que influyen en la cantidad de calor que se genera en la mina [25]. Por lo anterior, para el monitoreo y

medición de la temperatura al interior de la mina se utiliza un sensor electrónico; el circuito integrado LM35. Se trata de un circuito integrado con una salida de voltaje analógica linealmente proporcional a la temperatura en la escala centígrada: 10 mV/°C. Su rango de medición es de -55 a 150 °C y no requiere calibración externa. El voltaje de alimentación de este dispositivo es de 4 a 20 VCD. [26].

Así mismo, la humedad relativa, al igual que la temperatura, es un factor importante en cuanto a la salud y desempeño de las actividades realizadas por los mineros. Es aquí donde la humedad relativa juega un papel fundamental, ya que el valor de la humedad relativa afecta al confort de las personas, lo que se puede traducir desde el punto de vista físico, en un golpe de calor, calambres por calor y agotamiento por sudoración excesiva, aumentando concentraciones plasmáticas en la sangre y agotamiento por la mala reposición de la pérdida de sales.

La medición de humedad relativa se lleva a cabo por medio del módulo HMZ-433A que utiliza un sensor HCZ y un circuito integrado para proveer una salida de voltaje de CD lineal para un rango de humedad de 20-95%. Este dispositivo opera a un voltaje de 5 VCD ±5% con un consumo de corriente de 5 mA máximo. La señal de salida se conecta al microcontrolador a través de una resistencia de 50 kΩ que funge como "carga" al sensor para así, garantizar el voltaje de salida del dispositivo [27].

Ahora bien, en minas subterráneas, el gas metano (CH₄) se produce o es liberado por el estrato en minas de metal y carbón cuando el esquisto carbonífero es penetrado, y ocasionalmente cuando la roca carbonífera es contactada o está en la cercanía. Además, puede producirse también en grandes cantidades por estallidos de roca repentinos. Es importante mencionar que el monitoreo del gas metano debe realizarse cuidadosamente ya que es potencialmente explosivo. Para que el robot móvil haga la medición de la concentración de gas metano, se utiliza el sensor MQ-4. Este sensor tiene alta sensibilidad al metano en un amplio rango y tiene una salida digital a través de un comparador con umbral ajustable y una salida analógica; cuenta con voltaje de suministro (V_{in}) 5VCD ± 5%, un consumo de corriente eléctrica de 5mA max; condiciones estándares de detección: temperatura: 20°C ±2°C, V_c: 5V ± 0.1, humedad relativa: 65% ± 5% V_h: 5V ± 0.1. Con un rango de alcance de concentración de gas: 200-10000 ppm [28].

Por su parte, el monóxido de carbono (CO) es un gas tóxico y mortal cuando se combina con las células rojas de la sangre (hemoglobina) del ser humano, las células que normalmente acarrear oxígeno a los tejidos del cuerpo. Una vez que las células han tomado CO, ya no tienen la capacidad de llevar oxígeno. No se necesita mucho CO para interferir la capacidad del acarreo de oxígeno de la sangre debido a que el gas, se combina con la hemoglobina de 200 a 300 veces más rápido que el oxígeno.

Para detectar la presencia de este gas en la mina, se utiliza el sensor MQ-7. Este dispositivo puede detectar concentraciones de gas en el rango de 20 a 2000 ppm. El módulo posee una salida analógica que proviene del divisor de voltaje que forma el sensor y una resistencia de carga. También tiene una salida digital que se calibra con un potenciómetro, esta salida tiene un led indicador de detección de gas [29].

Para el procesamiento de datos provenientes de los sensores se utiliza el circuito integrado PIC16F877A del fabricante Microchip® [30]. Este microcontrolador PIC se encarga de convertir las señales analógicas leídas en cada sensor a datos comprensibles por el usuario. El diagrama eléctrico completo se muestra en la Fig. 8.

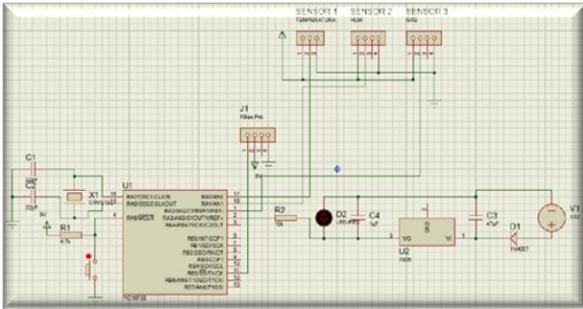


Fig. 8. Diagrama del sistema de adquisición de datos con µC
Nota: Diagrama realizado en PROTEUS®

El sistema de adquisición de datos con microcontrolador PIC envía los datos en protocolo RS232 (a través de la USART del PIC), hacia un módulo electrónico de transmisión de datos digitales llamado: XBee Pro S1® de la marca DIGI® [31]. El módulo XBee PRO S1® tiene un alcance de radiofrecuencia de 1.6 Km en espacio abierto. Los datos de instrumentación se envían al módulo portátil de adquisición de datos operado por el usuario. El diagrama eléctrico correspondiente se muestra en la Fig. 9.

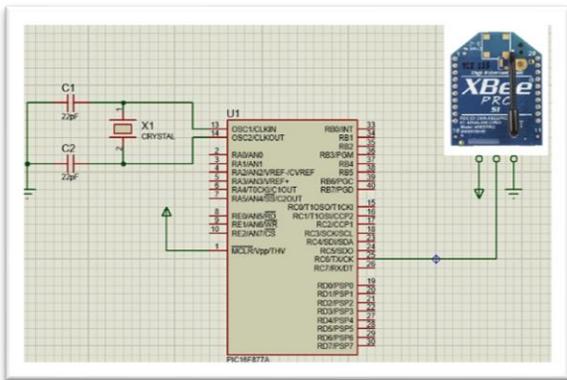


Fig. 9. Diagrama del sistema de transmisión de datos con el módulo XBee PRO S1®
Nota: Diagrama realizado en PROTEUS®

Cabe señalar que para usar los módulos XBee PRO S1® fue necesario su configuración; para esto, se utiliza el software XCTU®, el cual es gratuito y puede descargarse desde la página oficial de DIGI® [32]. Este software nos permite conectar los módulos y configurarlos en modo transmisor y receptor de datos digital a través del puerto USB de una computadora personal.

En cuanto a el módulo inalámbrico portátil de recepción de datos, este permite visualizar la lectura de los valores de las variables físicas de temperatura (T), humedad relativa (HR), gas metano (CH₄) y monóxido de carbono (CO) presentes en la

zona de exploración y monitoreo del robot que, en todo momento, se están sensando, según se muestra en la Fig. 10.

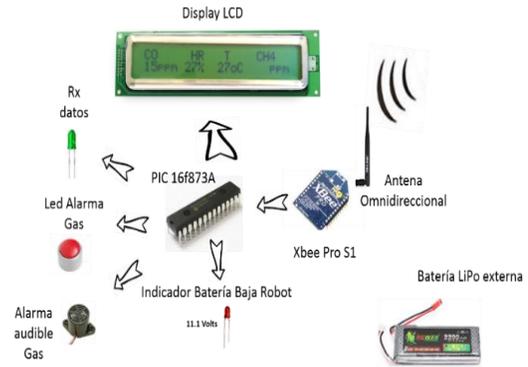


Fig. 10. Componentes del módulo portátil de adquisición de datos.

El módulo inalámbrico portátil recibe las señales de sensado (señal de información) provenientes del módulo de adquisición de datos ubicado en la estructura del robot. El módulo XBee PRO S1® configurado como receptor (Rx) recibe la señal inalámbrica a través de una antena omnidireccional de 16 dBi de ganancia. La señal de información se envía a un microcontrolador PIC 16F873A vía USART del PIC que se encarga de interpretar la señal de información.

El elemento de visualización de datos en el módulo portátil receptor es una pantalla LCD 24x2. En este LCD se muestra el valor de temperatura en unidades de grados centígrados (0 a 100 °C), la humedad relativa en unidades de porcentaje (20 a 99%), el valor de gas metano presente en unidades de partes por millón (0 a 500 ppm) y la presencia de monóxido de carbono en unidades de partes por millón (0 a 500 ppm).

El entorno de desarrollo utilizado para la programación del microcontrolador fue PIC C Compiler®; se trata de un compilador para lenguaje C con bibliotecas que son específicas a los registros de los microcontroladores PIC, a manera de ejemplo, se muestra una fracción de la programación de la pantalla LCD en la Fig. 11.

```
// Mensaje en pantalla lcd
//Directivas
#include <16f873a.h>
#fuses xt,nowdt,noprotect
#use delay(clock=4000000)
#use standard_io(B)
#include <lcd.c> //librería de habilitación pantalla lcd

//programa principal
void main () {
  lcd_init(); //habilita el uso de la pantalla lcd
  delay_ms(200); //
  lcd_gotoxy(1,1);
  lcd_putc("MEDICION SENSORES");
  lcd_gotoxy(3,2);
  lcd_putc("Temp 24° GAS 0PPM ");
}
```

Fig. 11. Programa de configuración pantalla LCD

Por otra parte, el diagrama eléctrico de la conexión de la pantalla LCD, el microcontrolador PIC y el modulo XBee PRO S1®, se muestra en la Fig. 12.

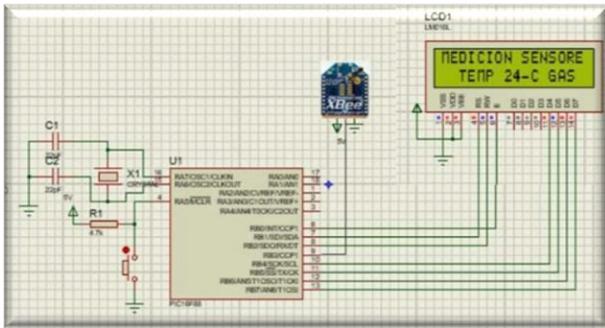


Fig. 12. Diagrama eléctrico del LCD, el μC y el XBee PRO®
Nota: Diagrama realizado en PROTEUS®

IV. RESULTADOS

A. Diseño general.

El robot móvil radiocontrolado para detección de gas tóxico (CO) o explosivo (CH4) en minas subterráneas de México, se muestra en la Fig.13.



Fig. 13. Robot móvil radiocontrolado para detección de gas tóxico (CO) o explosivo (CH4) en minas subterráneas de México.

Las dimensiones del robot móvil se obtienen a partir de las características físicas de la estructura T-Rex tank chassis de la marca DAGU® [20] y se muestran en la tabla I.

TABLA I
DIMENSIONES DEL ROBOT MÓVIL

Variable	Medida
Ancho	265 mm
Longitud	355 mm
Altura total	130 mm
Altura del piso	70 mm
Masa	3.7 Kg

Las pruebas iniciales de operación realizadas con el vehículo se realizaron bajo condiciones controladas en laboratorio. Mecánicamente se pudo constatar que el sistema de locomoción es capaz de mover una masa total de 3.61 Kg definida por las masas de los accesorios incorporados en el robot móvil.

La potencia eléctrica que se obtiene de la fuente de alimentación se calcula mediante la ley de Ohm (1), matemáticamente:

$$\text{Voltaje (V)} * \text{Corriente (A)} = \text{Potencia (W)} \quad (1)$$

Con una batería LiPo de 3S a 5000 mAh y 11.1 Volts, se obtiene una potencia de 55.5 Watts, en un cálculo previo de la fase de modelado matemático, se encontró que el robot móvil requiere de una potencia de 27.45 Watts; por lo tanto, la potencia obtenida por la fuente de alimentación es suficiente para proporcionar la energía que el robot móvil consume.

B. Velocidad de desplazamiento.

La medición de la velocidad del robot móvil se realizó en laboratorio sobre una superficie plana con dos líneas horizontales de referencia separadas 1 m y, con el uso de un cronómetro de mano, se realizaron treinta y seis repeticiones, donde el robot móvil recorría esa distancia de referencia, registrando el resultado de cada una a fin de determinar la velocidad promedio. La Fig. 13 muestra el gráfico correspondiente a la prueba de tiempo.

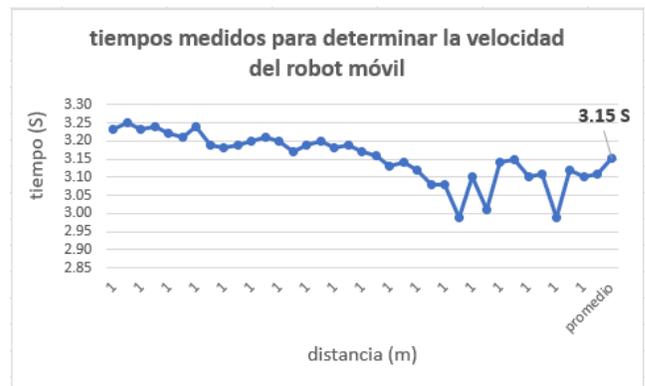


Fig. 13. Tiempo promedio del robot móvil para recorrer un metro.

El tiempo promedio en el que avanza un metro de distancia el robot móvil es de 3.15 segundos. Ahora bien, la velocidad es la razón que existe entre distancia y tiempo (2), matemáticamente:

$$\frac{\text{distancia (m)}}{\text{tiempo (s)}} = \text{Velocidad} \left(\frac{m}{s}\right) \quad (2)$$

Los datos promedio de los tiempos registrados para que el robot móvil avance un metro se utilizan para determinar la velocidad promedio del robot móvil y se muestran en la tabla II.

TABLA II
VELOCIDAD PROMEDIO DEL ROBOT MÓVIL

Distancia	Tiempo	Velocidad promedio
1 m	3.15 s	0.31 m/s

Se puede observar que la velocidad promedio que se alcanza con el robot móvil es de 0.31 m/s; Cabe señalar que esta velocidad se alcanza con máxima carga en la batería de alimentación eléctrica. A medida que la carga eléctrica disminuye en el tiempo, también lo hace la velocidad promedio del robot móvil.

C. Desplazamiento en pendiente.

Las pruebas de desplazamiento en pendiente se realizaron en laboratorio; para ello se utilizó una rampa metálica con ajuste de inclinación. Con ayuda de un inclinómetro digital marca Kkamon, modelo 4*90°, IP54, LCD [33], se ajustó la rampa a diferentes ángulos de pendiente. La tabla III muestra las pendientes utilizadas en esta fase de experimentación.

TABLA III
VALORES DE INCLINACIÓN PARA LA PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO EN PENDIENTE

Ítem	Valor de inclinación	Prueba superada
1	5°	Si
2	10°	Si
3	15°	Si
4	20°	Si
5	25°	Si
6	30°	Si
7	35°	No

Las pruebas realizadas de desplazamiento en pendiente muestran que el robot móvil es capaz de subir una pendiente de hasta 30°. Al superar este valor, el vehículo ya no es capaz de desplazarse y tiende a caer

Por otra parte, se realizó una prueba de desplazamiento en campo abierto del robot móvil y se constató que es capaz de desplazarse sobre superficies lisas, lodosas, con grava, arena e incluso pequeños fangos de agua; según se muestra en la Fig. 14.



Fig. 14. Desplazamiento del robot móvil en terrenos irregulares.

D. Distancia de radiocomunicación.

La distancia máxima de radiocomunicación en exterior fue de 600 m en línea recta utilizando un transmisor de 2 watt con antenas tipo panel de 14 dBi a una frecuencia de 5.8 Ghz. Los movimientos del robot móvil adelante, atrás, izquierda y derecha se realizan con el modulo de radiocontrol; mientras que con el monitor de video externo se visualiza en tiempo real el recorrido del robot móvil, como se muestra en la Fig. 15.



Fig. 15. Radiocontrol de desplazamiento, velocidad y monitor de video.

Por otra parte, se realizaron pruebas de operación en minas de ópalo existentes en el municipio de Tequisquiapan, Querétaro, México, distantes 10 Km de la ciudad de San Juan del Río, Querétaro. Las pruebas realizadas al interior de una mina real permitieron confirmar las pruebas realizadas bajo ambientes controlados.

Al interior de la mina se obtuvo una distancia máxima de radiocomunicación de aproximadamente 250 m. para control y adquisición de datos. El control de avance, giros y retroceso se logro realizar utilizando el módulo de radiocontrol destinado para tal fin; además de la imagen que proporciona una cámara de video HD infrarroja colocada en el robot y cuya imagen se transmite a un monitor de video colocado en el radiocontrol para ser operado por el personal de seguridad de la mina; según se ilustra en la Fig. 16.



Fig. 16. Prueba de radiocontrol del robot móvil para minas subterráneas.

Así mismo, se pudo verificar el sistema de identificación del robot a total obscuridad consistente en cintas reflejantes a incidencia de luz, luz estrobo de torreta en color rojo y un haz de luz tipo rayo láser, como se muestra en la Fig. 17.



Fig. 17. Luz laser y cinta reflejante del robot móvil en el interior de una mina subterránea.

E. Módulo portátil de recepción de datos.

Ahora bien, con el módulo portátil de visualización de datos, se realizaron pruebas de operación de los sensores electrónicos MQ7 (monóxido de carbono), MQ4 (gas metano), LM35 (temperatura) y HMZA-331 (humedad relativa) para verificar la correcta operación del sistema receptor de datos. Se logró visualizar el resultado de las mediciones en la pantalla LCD del módulo portátil; como se muestra en la Fig. 18.



Fig. 18. Módulo portátil de recepción de datos.

Cabe señalar que, cuando los sensores de gas metano (CH₄) y monóxido de carbono (CO) detectan altos niveles de concentración en partes por millón (ppm), inmediatamente el módulo portátil se “alarma”. Es decir, mediante una luz led de mayor tamaño en color rojo que destella, se avisa al usuario sobre una condición de riesgo en la atmósfera de la mina donde se ubique el robot en ese momento. Al mismo tiempo, se activa un zumbador que funciona como alarma audible para que el usuario tenga una opción más de aviso.

El nivel de exposición permitido de monóxido de carbono (CO) de acuerdo a la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), por sus siglas en inglés, es de 25 partes por millón (ppm); mientras que, la medición del gas metano (CH₄) se da en unidades porcentuales, siendo el nivel máximo permitido del 5%. Valores superiores generan problemas de salud en el ser humano [34].

F. Ficha técnica del robot móvil para minería subterránea.

Finalmente, el tiempo de autonomía promedio del robot es de 40 min. a trabajo constante y cuando las baterías del robot se encuentran en su límite de carga inferior, el robot envía un aviso al módulo portátil mediante leds indicadores de “batería baja”. Así, el usuario tiene en todo momento el control del robot y su estado de operación.

La ficha técnica del robot móvil para detección de gas tóxico (CO) o explosivo (CH₄) para minas subterráneas en México se desglosa en la tabla IV. Aquí se puede observar las características técnicas más importantes de este vehículo robotizado.

TABLA IV
FICHA TÉCNICA DEL ROBOT MÓVIL PARA MINAS SUBTERRÁNEAS

Parámetro	Valor
Dimensiones	355 mm largo X 265 mm ancho X 130 mm altura
Masa de arrastre	3.61 Kg
Potencia de consumo	27.45 Watts
Velocidad promedio	0.31 m/s
Pendiente máxima de subida	30°
Alcance máximo radiocontrol	600 m en espacio abierto
Altura máxima de obstáculo	10 cm
Voltaje del motor	12 Vcd
Voltaje de los instrumentos	5 Vcd
Torque del motor	11 Kg/cm ²
Duración de la batería principal	40 min
Rango de medición de temperature LM35	0 a 150 °C
Rango de medición de humedad relativa	20 al 90%
Rango de medición del sensor de gas metano (MQ4)	200 a 10000 ppm
Rango de medición del sensor de monóxido de carbono (MQ7)	20 a 2000 pm

G. Discusión de resultados.

Diversas investigaciones en México y en el extranjero, dan cuenta de la necesidad de implementar tecnología robótica en la industria de la minería con la finalidad de minimizar los riesgos inherentes de trabajo para el personal minero. El desarrollo e implementación de tecnología robótica con fines de inspección y monitoreo de las condiciones ambientales en el interior de minas subterráneas resulta incipiente en México; motivo por el cuál, los proyectos de desarrollo tecnológico como el robot móvil para detección de gas tóxico (CO) o explosivo (CH₄) para minas subterráneas en México cobra vital importancia en la industria minera.

El uso de vehículos robotizados para aplicaciones en la industria minera, sin duda, es un campo de oportunidad para la investigación académica. Las posibilidades de desarrollo e investigación de la robótica móvil en aplicaciones dentro de la industria minera son amplias. En este sentido, el proyecto presentado se puede abordar con la implementación de la tecnología machine learning para identificar patrones con los datos y elaborar predicciones. Gracias al desarrollo de la robótica en el diseño de robots móviles se ha logrado que hoy en día sea posible llevar a cabo tareas de exploración con el fin de evitar poner en peligro la vida del ser humano o conseguir

acceso a entornos en los que el hombre no puede llegar. Con los resultados obtenidos hasta ahora, se sienta una base experimental para el diseño y la construcción de vehículos robotizados con aplicaciones en minería en México.

V. CONCLUSIONES

En México y otros países, recurren al desarrollo de tecnologías robóticas aplicadas a la industria de la minería para inspeccionar y monitorear las condiciones ambientales al interior de las minas subterráneas, esto con la finalidad de reducir riesgos en el personal minero, lo cual motiva a desarrollar nuevas versiones de vehículos móviles, capaces de transitar sobre terrenos hostiles, tal como es la propuesta del robot móvil radiocontrolado aplicado a la minería presentado en este artículo.

Este robot móvil radiocontrolado presentó desafíos de diseño, energía, velocidad, comunicación inalámbrica y capacidad de maniobra en terrenos mineros, lo cual fueron resueltos y cumpliendo el requisito de funcionalidad en ambientes mineros, donde fue probado experimentalmente.

En trabajos futuros esta mejorar la comunicación inalámbrica ante problemas de latencia, reemplazar los sensores y robustecer el diseño de la estructura del robot móvil teleoperado aplicado a la industria de la minería.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México (TecNM), al Instituto Tecnológico de San Juan del Río (ITSJR), a la H. Academia de Ingeniería Electrónica del ITSJR y al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ) por el apoyo otorgado para la realización del presente proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Y. Tejeda García y L. Pérez-Floriano. La ampliación social del riesgo: evidencias del accidente en la mina Pasta de Conchos. *Comunicación y sociedad*, Vol. 15, pp. 71-99, 2011.
- [2] H.M. Palermo, y C. León-Salazar. Trabajo, disciplina y masculinidades: un análisis comparado entre dos industrias extractivas de Argentina y México. *Nueva antropología*, Vol. 29, Núm. 85, 53-74, 2016.
- [3] Anuario de "Seguridad y Salud en la Minería". CAMIMEX 2016.
- [4] Diario oficial de la federación. NOM-032-STPS 2008. "Seguridad para minas subterráneas de carbón".
- [5] Manual de "Requisitos Básicos de Seguridad para Trabajar en una mina subterránea de carbón". Secretaria del Trabajo y Previsión Social (STPS). En línea www.stps.gob.mx/bp/anexos/minas2012/minero_140113.pdf
- [6] R. Robles-Berumen, y G. Foladori. Una revisión histórica de la automatización de la minería en México. *Problemas del desarrollo*, Vol. 50, Núm. 197, 2019, pp 157-180.
- [7] M. D. C. Juárez Gutiérrez y L.S. Padilla-Sotelo. Una visión espacial de los aspectos socioeconómicos de la población en la zona carbonífera de Coahuila, México. *Investigaciones geográficas*, Vol. 32, 1996, pp 69-99.
- [8] O. Ohlson. Contesting Mexico's Necropolitics: Necrogovernance and Subversive Necropower in Two Cases. *Latin American Perspectives*, Vol 48, Núm, 1, 2021, pp. 245-259.

- [9] C.J.M. Martínez, R.C. Salguero, R. Palomares, J. Cornejo (2020). Mechatronics Development of Terrestrial Mobile Robot for Exploring and Monitoring Environmental Parameters at Mine Analogue Sites using IoT Platform. In 2020 IEEE XXVII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), pp. 1-4.
- [10] C. Casetti (2022). The challenges of universal broadband connectivity [mobile radio]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 17(3), pp. 5-11.
- [11] J. Szrek, J. Jakubiak, R. Zimroz (2022). A mobile robot-based system for automatic inspection of belt conveyors in mining industry. *Energies*, 15 (1), pp. 327.
- [12] A. Ollero Baturone (2001). *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Editorial Marcombo, Alfaomega, pp. 28-33.
- [13] D. Zhu, Y. Zhang, J. Wang, K. Ren, K. Yang (2022). Evaluation of Motion Planning Algorithms for Underground Mobile Robots. In *China Intelligent Networked Things Conference*, Springer Nature Singapore, pp. 368-379
- [14] E.W. Rodríguez De La Cruz (2020). Estudio para el diseño de un robot móvil autónomo para medición de contaminantes del aire y suelo en el corredor minero del sur. Tesis de Licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [15] H.L. Helguero Velásquez, R. Medinaceli Tórez (2020). Robot Minero: Sistema Detector de Gases utilizando Sensores en Tiempo Real MIN-SIS 1.0 SDG-STR. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 5(1), pp. 35-39.
- [16] A.L. Pérez Valencia, R.D. Alvear de La Ossa, (2022). Implementación de un prototipo de Sistema de Monitoreo Distribuido de Concentración de Gases en la Industria Minera Subterránea de Carbón. Tesis de Licenciatura. Universidad Libre, Colombia.
- [17] I. García Rodríguez (2021). Diseño e implementación de un dispositivo móvil terrestre para la detección de compuestos orgánicos volátiles. Tesis de Doctorado, Universidad Veracruzana.
- [18] F. Libertad, J.S. Farias Hinojoza (2020). Diseño antropodo en robots móviles para evaluación de espacios confinados. *Cómputo Aplicado*, Vol 4, Num 13.
- [19] <https://hitecrd.com/products/>
- [20] <https://dagurobot.com/RS035>
- [21] Figueroa, Junior., Montalvo, William y Bayas, Marcia. *Cinématica y Dinámica de Robots Móviles con Ruedas*. Editorial CILADI. 2023, pp. 83-85.
- [22] <https://www.sparkfun.com/products/12075>
- [23] <https://www.amazon.com.mx/ZCMMF-peque%C3%B1a-alfileres-tornillo-bricolaje/dp/B0CPVRS7X>
- [24] <https://hobbyking.com/es-es/aomway-5-8ghz-1000mw-tx1000-video-transmitter.html?store=es-es>
- [25] Díaz, Marcelo., *Salud y Seguridad en Trabajos de Minería*. Editora Aulas y Andamios. 2009, p. 27.
- [26] Corona, Leonel., Abarca, Griselda., Mares, Jesús. *Sensores y Actuadores*. Editorial Patria. 2015, p. 189.
- [27] <https://teknomovo.com.mx/producto/sensor-de-humedad-y-temperatura-hmz-433a/>
- [28] <https://uelectronics.com/producto/mq-4-detector-de-gas-metano/>
- [29] <https://uelectronics.com/producto/mq-7-detector-de-monoxido-de-carbono/>
- [30] García, Eduardo., *Compilador C CCS y Simulador PROTEUS para Microcontroladores PIC*. AlfaOmega. 2008, pp. 55-59.
- [31] <https://es.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/rf-modules/2-4-ghz-rf-modules/xbee-802-15-4>
- [32] <https://es.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/digi-xbee-tools/xctu>
- [33] <https://es.aliexpress.com/i/1005003903602493.html>
- [34] https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/presentacion_multidetectors_ibrid-mx6.pdf