

**PROTOTIPO DE UNA RED INALÁMBRICA ZIGBEE PARA LA MEDICIÓN DE  
NIVELES DE GASES EN MINAS DE CARBÓN**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingenieros de Telecomunicaciones**

**Juan David Buriticá Chaux**

**Mateo Alberto González Moreno**

**Director: Carlos Enrique Montenegro Narváez**

**Co-Director: Víctor Manuel Castro Ramírez**

**Universidad Santo Tomás  
Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones  
Bogotá  
2015**

## CONTENIDO

|        |                                         |    |
|--------|-----------------------------------------|----|
| 1.     | Introducción .....                      | 8  |
| 2.     | Planteamiento del problema .....        | 11 |
| 3.     | Justificación.....                      | 13 |
| 4.     | Objetivos .....                         | 17 |
| 4.1.   | Objetivo General .....                  | 17 |
| 4.2.   | Objetivos Específicos .....             | 17 |
| 5.     | Alcances y limitaciones.....            | 18 |
| 5.1.   | Equipos fijos:.....                     | 18 |
| 5.2.   | Equipos móviles: .....                  | 18 |
| 6.     | Marco teórico .....                     | 20 |
| 6.1.   | ZigBee .....                            | 20 |
| 6.1.1. | Principales ventajas de ZigBee .....    | 20 |
| 6.1.2. | Redes en mallas basadas en ZigBee ..... | 21 |
| 6.1.3. | Estándares ZigBee .....                 | 22 |
| 6.2.   | XBee .....                              | 23 |
| 6.2.1. | XBee Pro 900.....                       | 23 |
| 6.3.   | XBee Explorer .....                     | 25 |
| 6.4.   | XCTU .....                              | 26 |

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 6.5. Redes inalámbricas .....                                 | 26 |
| 6.6. Arduino .....                                            | 27 |
| 6.7. Arduino Uno .....                                        | 28 |
| 6.8. Sensor de gas metano MQ4 .....                           | 29 |
| 7. Estado del arte .....                                      | 31 |
| 7.1. ZigBee en minas .....                                    | 31 |
| 7.2. Domótica y ZigBee .....                                  | 33 |
| 7.2.1. Iluminación .....                                      | 34 |
| 7.2.2. Calefacción, ventilación y aire acondicionado .....    | 34 |
| 7.2.3. Sombras y cortinas .....                               | 34 |
| 7.2.4. Sistemas de seguridad para el hogar .....              | 34 |
| 7.2.5. Sistemas de detección de gases basados en ZigBee ..... | 34 |
| 8. Solución .....                                             | 37 |
| 8.1. Selección de tecnología inalámbrica .....                | 37 |
| 8.2. Arquitectura realizada .....                             | 38 |
| 8.3. Justificación de la arquitectura .....                   | 41 |
| 8.3.1. Programación red en malla XBee .....                   | 42 |
| 8.3.2. Primeras Pruebas .....                                 | 47 |
| 8.3.3. Conversión ADC .....                                   | 49 |
| 8.4. Calibración sensor MQ4 .....                             | 50 |

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 8.5. Pruebas finales y resultados..... | 52 |
| 9. Conclusiones .....                  | 55 |
| Referencias .....                      | 57 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Emergencias reportadas en el periodo 2004 a 31 de Julio de 2011 .....   | 14 |
| Tabla 2. Fatalidades ocurridas en el periodo 2004 a 31 de Julio de 2011 .....    | 14 |
| Tabla 3. Causas de los accidentes en el periodo 2005 a 31 de Julio de 2011 ..... | 15 |
| Tabla 4. Especificaciones tecnicas XBee Pro 900 .....                            | 24 |
| Tabla 5. Comparación tecnologías inalámbricas.....                               | 37 |
| Tabla 6. Datos tecnicos sensor MQ4.....                                          | 51 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Esquema general de topología malla .....                         | 22 |
| Figura 2. XBee Pro 900 .....                                               | 25 |
| Figura 3. XBee Explorer .....                                              | 26 |
| Figura 4. Tarjeta Arduino .....                                            | 29 |
| Figura 5. Sensor MQ4 .....                                                 | 29 |
| Figura 6. Característica de sensibilidad sensor MQ4 .....                  | 30 |
| Figura 7. Estructura Posicionamiento ZigBee Subterráneo .....              | 32 |
| Figura 8. Estructura diseño con tecnología ZigBee .....                    | 33 |
| Figura 9. Esquema de transmisión de información de proyecto .....          | 35 |
| Figura 10. Esquema de recepción de información de proyecto .....           | 36 |
| Figura 11. Arquitectura de red a implementar .....                         | 38 |
| Figura 12. Sistema de obtención y transmisión de medición de gases.....    | 40 |
| Figura 13. Equipo Router .....                                             | 40 |
| Figura 14. Representación de Base de datos de la red .....                 | 41 |
| Figura 15. Botón de búsqueda de módulos XBee .....                         | 42 |
| Figura 16. Resultado de búsqueda de dispositivos.....                      | 43 |
| Figura 17. Ventana de configuración de parámetros para XBee.....           | 43 |
| Figura 18. Detección de dispositivos y sus configuraciones.....            | 44 |
| Figura 19. Parte posterior de dispositivo XBee con dirección impresa ..... | 45 |
| Figura 20. Botón de escritura de programación para XBee .....              | 46 |
| Figura 21. Pantalla final de configuración de router .....                 | 46 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22. Pantalla final de configuración de coordinador .....          | 47 |
| Figura 23. Botón de registro de consola en XCTU .....                    | 47 |
| Figura 24. Botón para activación del dispositivo a la red .....          | 47 |
| Figura 25. Registro de la consola de equipo coordinador transmisor ..... | 48 |
| Figura 26. Registro de la consola del equipo router receptor.....        | 48 |
| Figura 27. Equipo router transmitiendo .....                             | 49 |
| Figura 28. Equipo coordinador recibiendo.....                            | 49 |
| Figura 29. Nivel en ambiente normal.....                                 | 52 |
| Figura 30. Nivel en presencia de gas metano.....                         | 53 |
| Figura 31. Verificación nivel.....                                       | 54 |

## **1. Introducción**

Los elevados índices de accidentalidad presentes al interior de las minas alrededor del mundo son un tema de preocupación para las empresas explotadoras de estos terrenos, para los trabajadores de dichos entornos y para la protección de la vida en general. Los casos de accidentes al interior de las minas no cesan y siguen siendo producidos por los mismos factores en la mayoría de los casos, ya sea acumulación de gases y que por inhalación excesiva o por sus compuestos que los hacen altamente explosivos generan sucesos trágicos durante la actividad minera.

Las condiciones laborales de los trabajadores al interior de las minas son siempre duras, ya que se encuentran en condiciones de poca luz, requieren elevado esfuerzo físico, es un trabajo de bajas condiciones de salubridad por las grandes cantidades de polvo generado por los minerales, los mineros deben recorrer largas distancias al interior de las minas en caminos que no son los más adecuados para que puedan moverse con facilidad y son constantemente afectados por derrumbes y explosiones que se pueden presentar dentro.

Uno de los casos más recientes en torno a la accidentalidad en minas de carbón en nuestro país se presentó el pasado 1 de Julio de 2015, en donde ocurrió una explosión producida por acumulación de gas metano en las instalaciones de una mina de carbón ubicada en el municipio de Samacá-Boyacá y según el alcalde de Samacá Luis Aponte, la mina propiedad de la empresa “Carbones Andinos SAS” operaba bajo control legal y era una de las minas más tecnificadas de la región, la explosión ocurrió y no pudo realizarse un control previo para evitar dicho inconveniente que dejó 5 víctimas mortales (CNN México, 2015).

Tan solo 54 días después de este hecho, el 25 de Agosto en Socha-Boyacá se presentó otra explosión por la misma razón en una excavación de carbón, dejando 4 trabajadores muertos y un proceso de rescate lento debido a los altos niveles de gas que se terminaron de acumular dentro de la mina. (El Tiempo, 2015)

En el mundo el panorama no es muy diferente, el pasado 13 de Mayo de 2014 se presentó en Soma-Turquía el peor accidente minero registrado en la última década en donde, 787 trabajadores se encontraban en sus labores y una explosión generada por acumulación de grisú; una combinación de gas metano con otros gases que en contacto con un corto eléctrico generado en un transformador, resultó en un trágico suceso que dejó más de 250 mineros muertos y más de 80 heridos. (La Nacion, 2014)

Para la protección de la vida de los trabajadores se han desarrollado a través del tiempo diversos proyectos relacionados con el sector TIC que mitigan los índices de accidentalidad, algunos de estos con resultados notablemente eficientes, desarrollados principalmente por medio de dispositivos inalámbricos con alta fiabilidad y efectividad. Estos proyectos se basan en la implementación de redes compuestas por dispositivos inalámbricos que transmiten información obtenida por sensores que miden algunos peligrosos gases dentro de las minas, estos son monitoreados y controlados a tiempo mediante alertas automatizadas que anuncian la evacuación a los trabajadores evitando así hechos trágicos.

El fundamento de este proyecto está orientado directamente hacia la detección de gases y a través este documento se mostrará el prototipo y diseño de una red inalámbrica que mediante tecnología ZigBee efectuará un monitoreo en tiempo real de los niveles de gas Metano, el cual presenta uno de mayores índices de accidentalidad por explosión en el

entorno minero. Este diseño permitirá que instrumentos portables sean cargados por los trabajadores de minas y partiendo de las mediciones que se obtengan con los dispositivos sensores, la información viajará a través de los “*Routers*” hacia un único “*Coordinador*” el cual tendrá la función principal de enviar la información al exterior de la mina hacia un equipo denominado “Centro de control de la mina”, y se recogerán los datos del monitoreo en tiempo real de dichos niveles de gas. Posteriormente se procesara la información en una base de datos que determinara la fiabilidad de la medición y en el instante en que se detecte que uno de estos peligrosos gases tiene un nivel que puede desencadenar un riesgo, se realizará un aviso general para controlar la situación y evitar accidentes de gran magnitud.

## **2. Planteamiento del problema**

El sector de las telecomunicaciones en general ha representado avances muy importantes en el desarrollo de la mayoría de países del mundo, dentro de los principales sectores en los cuales se puede destacar una gran influencia de las telecomunicaciones se encuentra la educación, sector comercial, industrial, transporte, minería, turismo y financiero. Específicamente en el sector minero los servicios que prestan las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC), se han desarrollado aplicaciones enfocadas a la protección y seguridad de la vida de los trabajadores de las minas que podrían vulnerarse por inhalación de gases, derrumbes, explosiones o temperaturas elevadas presentes al interior de estas y que como consecuencia final desencadene la muerte de los mineros.

En la exploración y explotación en minas de carbón se producen a menudo accidentes, principalmente generados por la falta de seguridad en su interior, por lo cual, la minería es considerada como una de las actividades más peligrosas a nivel mundial (Cutler, 2010). Por su parte la producción de carbón en Colombia aumenta considerablemente año tras año, lo que genera que no solamente aumente la producción de este mineral sino también la mano de obra demandada y la accidentalidad presentada (Martínez, 2009).

Los riesgos más comunes en minas; según el Ministerio de Minas y Energía Colombiano, son la presencia de los gases dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ), óxido de nitrógeno ( $\text{NO}$ ) y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) (Ministerio de Minas y Energía, 2010). Especialmente el metano y el dióxido de carbono son los causantes del mayor número de accidentes en las minas, debido a que el primero es una gas altamente explosivo y el

segundo un gas asfixiante, por lo que es de gran importancia monitorear los niveles de estos gases en las diferentes minas (Servicio Geológico Colombiano, 2010).

Para mitigar los niveles de accidentalidad en el interior de las minas se han buscado diversas soluciones con aplicaciones basadas en las TIC, que permitan transmitir información de manera segura y eficaz mediante dispositivos cada vez más pequeños y portables, sin embargo uno de los factores principales a tener en cuenta para estas aplicaciones es la frecuencia (Hz) a la que trabajan los dispositivos que se utilizarán en el prototipo de la red, ya que en ocasiones tienen una frecuencia muy elevada en donde la distancia de transmisión es corta y debe ser respaldada mediante el uso de dispositivos repetidores de información, dependiendo de la totalidad de espacio a cubrir se debe tener en cuenta la ubicación de estos dispositivos dentro de la red para evitar problemas de pérdidas de datos por distancia.

Usualmente en la minería no es común que se utilicen equipos de seguridad basados sensores inalámbricos en la que cada trabajador cargue consigo un equipo de transmisión, debido a que no se considera un factor indispensable para salvaguardar la vida, por lo que esta propuesta; junto con otras que se han elaborado en los últimos años en centros de investigación y proyección, pueden ir incursionando en el sector para elevar considerablemente los niveles de seguridad en minas.

Debido a lo anterior surge la pregunta ¿Cuál es la viabilidad de realizar un prototipo de una red con tecnología ZigBee como alternativa para realizar la medición de los gases metano presentes en minas?

### **3. Justificación**

Los múltiples beneficios que proporcionan las telecomunicaciones en el desarrollo de las sociedades son un aspecto que se encuentra en constante auge en la actualidad, mediante la creación e implementación de diversas soluciones y oportunidades de progreso para la mayoría de sectores económicos y sociales. En este trabajo se documentará el prototipo de una solución de bajo costo en un aspecto fundamental para el sector de la minería en Colombia, en donde mediante un sistema de comunicaciones inalámbricas se incrementará notablemente la seguridad de los trabajadores, dando solución a problemas generados por la presencia de algunos de los gases.

El Ministerio de Minas y Energía es la entidad pública nacional encargada de administrar los recursos naturales no renovables de Colombia, asegurando su mejor y mayor utilización, en el año 2011 se oficializó el documento de Política Nacional de Seguridad Minera, en donde se mostraron cifras estadísticas del número de emergencias presentadas en los años 2004 a 2011, además de la cantidad de fatalidades que ocurrieron y las causas que generaron los accidentes, en la Tabla 1 se muestra la totalidad de emergencias presentadas, en la Tabla 2 se presentan los datos de los fallecimientos y en la Tabla 3 los causales de los accidentes.

*Tabla 1. Emergencias reportadas en el periodo 2004 a 31 de Julio de 2011*

| <b>AÑO</b>   | <b>EMERGENCIAS</b> |
|--------------|--------------------|
| 2004         | 1                  |
| 2005         | 40                 |
| 2006         | 59                 |
| 2007         | 64                 |
| 2008         | 74                 |
| 2009         | 60                 |
| 2010         | 84                 |
| 2011         | 58                 |
| <b>TOTAL</b> | <b>440</b>         |

Fuente: Documento de Política Nacional de Seguridad Minera

*Tabla 2. Fatalidades ocurridas en el periodo 2004 a 31 de Julio de 2011*

| <b>AÑO</b>   | <b>FATALIDADES</b> |
|--------------|--------------------|
| 2004-2005    | 45                 |
| 2006         | 42                 |
| 2007         | 101                |
| 2008         | 82                 |
| 2009         | 58                 |
| 2010         | 173                |
| 2011         | 81                 |
| <b>TOTAL</b> | <b>582</b>         |

Fuente: Documento de Política Nacional de Seguridad Minera

*Tabla 3. Causas de los accidentes en el periodo 2005 a 31 de Julio de 2011*

| <b>AÑO</b>           | <b>2005</b> | <b>2006</b> | <b>2007</b> | <b>2008</b> | <b>2009</b> | <b>2010</b> | <b>2011</b> |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Explosión<br>CH4     |             |             |             |             |             | 2           |             |
| Derrumbe             | 6           | 6           | 3           | 7           | 8           | 7           | 8           |
| Deficiencia<br>O2    |             |             |             | 1           |             | 8           | 0           |
| Electromec<br>ánicos |             |             |             | 0           |             |             | 0           |
| Incendios            | 2           | 0           |             |             |             |             |             |
| Otros                |             | 1           |             | 3           | 0           | 8           |             |
| <b>TOTAL</b>         | <b>0</b>    | <b>9</b>    | <b>4</b>    | <b>4</b>    | <b>0</b>    | <b>4</b>    | <b>8</b>    |

Fuente: Documento de Política Nacional de Seguridad Minera

A raíz de estas cifras se observa que efectivamente las explosiones son causales de accidentalidad, por lo que para esta red se plantea el uso de equipos ZigBee que se caracterizan por ser de considerable bajo costo, elevadas prestaciones, son de tamaños reducidos; permitiendo la fácil portabilidad de la totalidad de la red y además la movilidad

de la red hacia otros lugares con condiciones similares donde se necesite aumentar los protocolos de seguridad.

La información de los niveles de gas se recopila mediante sensores especializados para esta labor, a partir de la transmisión de estos datos con los equipos ZigBee, se monitorean y procesan en el centro de control de la mina con el fin de generar alarmas a riesgos y emitir una alerta de evacuación para quienes estén en el interior.

En el marco de la seguridad en las minas, otro importante hito que se desea alcanzar es la reducción de uso de líneas de energía eléctricas que alimenten cualquier dispositivo al interior de la mina debido a que esto aumenta la probabilidad que se desencadenen explosiones por la acumulación de gases en contacto con cortos circuitos así como se presentó en el caso expuesto hace algunos días en Turquía, es por esto que la incursión en tecnologías totalmente inalámbricas es la mejor opción para la implementación de redes de seguridad.

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo General**

Realizar un prototipo de red basado en nodos de comunicaciones inalámbricas dentro de los lineamientos TIC con dispositivos ZigBee y a través de pruebas de laboratorio determinar la viabilidad de la red para la medición de niveles de gas metano presentes en entornos como el minero para evitar riesgos inminentes.

### **4.2. Objetivos Específicos**

- Configurar la totalidad de los dispositivos que comprenden la red mesh basados en tecnología inalámbrica ZigBee.
- Diseñar un prototipo de red mesh en un lugar externo que mida los niveles de gas presentes en el ambiente, para una futura adaptabilidad en minas.
- Ejecutar la implementación del prototipo de red propuesto a través de pruebas ejecutadas en un entorno para la transmisión de información y observar el comportamiento de los dispositivos de comunicación en este entorno.
- Realizar una correcta calibración del sensor de gas metano MQ4, de acuerdo a sus especificaciones técnicas para tener fiabilidad en la recolección de los datos entregados por el sensor.

## 5. Alcances y limitaciones

El diseño de la red a ZigBee para medición de gases en minas de carbón contempla la utilización de equipos fijos que almacenaran la información y de los equipos móviles cuya interconexión da origen a la red de obtención y transmisión de los niveles de gases.

### 5.1. Equipos fijos:

Se cuenta con el equipo de cómputo en el exterior de la mina, que se encargará de recibir la totalidad de los datos transmitidos por los equipos inalámbricos y cuya labor se centra en la recolección de información que permita mostrar los niveles de gas presente en los diferentes puntos de la mina, almacenándolos en una base de datos para su procesamiento y utilización para la generación de las señales de alerta en caso de ser necesario.

### 5.2. Equipos móviles:

En los equipos móviles se cuenta con dos dispositivos fundamentales, uno se comprende de la unión del terminal XBee Pro 900, la tarjeta ARDUINO 1, el sensor de gas y la fuente móvil de alimentación de estos dispositivos. Por otra parte se cuenta con equipos XBee Pro 900 con su fuente de alimentación móvil, en configuración *router* ubicados en diferentes partes al interior de la mina para efectos de redundancia sobre la información.

La utilización de estos dispositivos móviles y fijos se complementa con la programación de los mismos para su puesta en marcha, por un lado el equipo Arduino I programado el software *Arduino* que se encarga de realizar la conversión análoga digital de datos generados por el sensor MQ4 y enviarlos a la red tipo Mesh implementada en los dispositivos XBee Pro 900 mediante en el software *XCTU*.

En cuanto al alcance del proyecto, se propone únicamente el diseño de la red de medición de gases, esto debido a que para la implementación total de la red al interior de una mina se debe contar con permisos directos de los propietarios, protocolos de seguridad elevados que conlleva a la contratación de personal especializado que tenga certeza de cómo realizar la correcta instalación de los equipos enrutadores a lo largo de la mina evitando accidentes. Además de lo anterior, se ve la necesidad de la adquisición e instalación de una caja antideflagrante para cada router instalado en la mina, estas cajas se encargan de generar una protección a dispositivos que puedan generar detonaciones internas evitando propagaciones en atmosferas explosivas como la tratada en este proyecto.

## **6. Marco teórico**

### **6.1. ZigBee (Digi International, 2015)**

ZigBee es una tecnología de tipo inalámbrica, desarrollada como un estándar global de bajo costo y bajo consumo para redes máquina a máquina. El estándar utilizado para el funcionamiento de esta tecnología es la especificación IEEE 802.15.4 en las bandas de 868 MHz, 900 MHz y 2.4 GHz.

La especificación IEEE 802.15.4 se creó en el año 2003 por el instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos y se basa en ser un protocolo de radio basado en paquetes, cuya implementación y consumo energético son muy bajos, permitiendo entonces la comunicación entre diferentes topologías de redes. Además de esa diversidad de comunicación, ZigBee brinda la fiabilidad a los usuarios de una duración energética de varios años.

#### **6.1.1. Principales ventajas de ZigBee**

El protocolo ZigBee se diseñó para procesos de comunicación de datos en el ambiente de las radiofrecuencias las cuales son más utilizadas comercialmente a aplicaciones industriales. Dentro de las ventajas de este protocolo se encuentran:

- Posibilidad de implementar redes punto a multipunto.
- Implementación principalmente de redes en malla.
- Soporte de diferentes topologías de red punto a punto.
- Latencia baja.
- Codificación de canal mediante DSSS (Espectro ensanchado por secuencia directa).

- Más de 65000 nodos para cada red implementada.

ZigBee define principalmente tres dispositivos diferentes respecto al rol de cada uno en la red a implementar (Baronti, 2006):

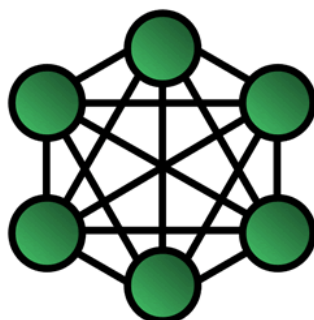
- Equipo *Coordinador* ZigBee: Este es el dispositivo más importante de la red, ya que actúa como el equipo central encargado de la gestión de la totalidad de la red.
- *Router* ZigBee: Es el dispositivo que se encarga de conectar entre sí a los dispositivos que se encuentren alejados en la red. En algunos dispositivos *coordinadores* el proceso de redundancia de la información puede ser realizado por el mismo.
- Equipo *Final*: Es el encargado de realizar la comunicación con el nodo del equipo *coordinador* o el equipo de interconexión de nodos. Estos equipos no transmiten información hacia los otros elementos de la red.

### **6.1.2. Redes en mallas basadas en ZigBee**

Una de las principales aplicaciones de ZigBee en comunicaciones es la posibilidad que brinda el protocolo para soportar la implementación de redes en malla, en estas redes los nodos se interconectan entre sí con los otros nodos de la red, de manera tal que existe una gran diversidad de caminos por donde la comunicación puede establecerse de un punto a otro generando redundancia total de la información.

Las redes en malla son descentralizadas desde su conformación, cada nodo tiene la capacidad de descubrirse a sí mismo dentro de la red, en el caso que un nodo desaparezca de la red la topología en malla se reconfigura de forma que se restablecen las rutas de

enrutamiento de acuerdo a la nueva topología que tenga la red. Las características de la red en malla brindan la opción de proveer estabilidad en condiciones cambiantes o en nodos que posean conflictos.



*Figura 1. Esquema general de topología malla  
Fuente: (Digi International, 2015)*

### **6.1.3. Estándares ZigBee**

En la actualidad se cuenta con 9 tipos de estándares ZigBee que se encuentran en el mercado, especificado diferentes aspectos fundamentales para hacer provecho de esta tecnología en diferentes sectores del mercado:

ZigBee Home Automation (Usado para casas inteligentes)

ZigBee Building Automation (Usado en edificios comerciales)

ZigBee Retail Services (Usado en compras inteligentes)

ZigBee Smart Energy (Usado para gestionar energías de consumo)

ZigBee Health Care (Monitorización del estado físico y la salud)

ZigBee Telecom Services (Usados como extras para equipos de telecomunicaciones)

ZigBee Remote Control (Controles remotos avanzados)

ZigBee Input Device (Usados como periféricos inalámbricos para ordenadores)

ZigBee 3D Sync (Usados para sistemas de video y visualización 3D)

## **6.2. XBee (Digi International, 2015)**

XBee y XBee-PRO son módulos de radio que proveen soluciones de comunicaciones inalámbricas para dispositivos de conexión de último punto. Estos módulos utilizan el protocolo de red IEEE 802.15.4 para comunicaciones punto-multipunto, proporcionando características de baja latencia, bajos costos, bajas potencias, gran facilidad de utilización y total interoperabilidad con todos los productos XBee que utilice la misma tecnología.

### **6.2.1. XBee Pro 900**

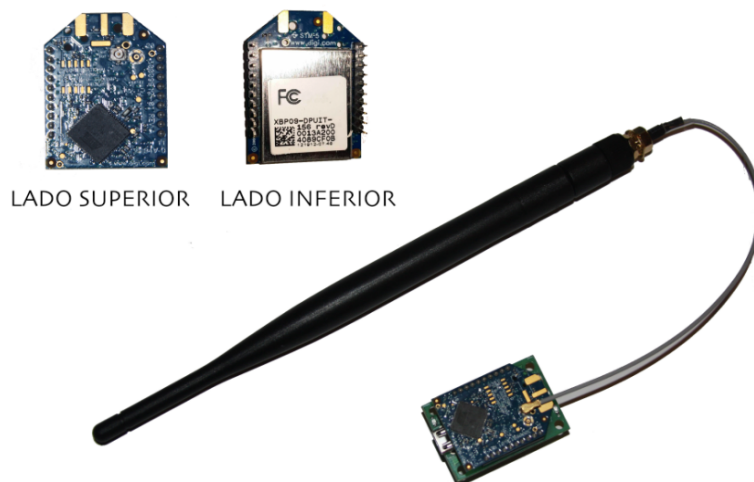
Los módulos XBee Pro 900 proporcionan lo mejor en su gama de conectividad inalámbrica, debido a que hacen uso del protocolo de comunicaciones de redes denominado “DigiMesh” con funcionamiento de red de carácter multipunto, especial para proyectos como el que se desarrolla en este documento en donde se plantea una topología en malla. El XBee Pro 900 es un dispositivo de fácil programación mediante el software libre XCTU de Digi.

Algunas de las especificaciones técnicas principales de este dispositivo se presentan en la siguiente tabla.

*Tabla 4. Especificaciones técnicas XBee Pro 900*

| <b>Característica</b>     | <b>XBee Pro 900</b>                                                   |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Banda de Frecuencia       | 902 hasta 928 MHz                                                     |
| RF Data Rate              | 10 Kbps o 200 Kbps                                                    |
| Rango en interiores       | 10Kbps mayor 610m, 200Kbps mayor 305m                                 |
| Rango en exteriores       | 10Kbps mayor 14 km, 200Kbps mayor 6.5km                               |
| Potencia de transmisión   | Superior a 24 dBm (250mW)                                             |
| Sensitividad de Recepción | -101 dBm a 200kBps, -110dBm a 10 Kbps                                 |
| Topologías de red         | DigiMesh, Punto a punto, Punto – multipunto, peer to peer, repetidora |
| Voltaje de alimentación   | 2.1 hasta 3.6 VDC                                                     |
| Corriente de Transmisión  | 215mA                                                                 |
| Corriente de Recepción    | 29 mA                                                                 |

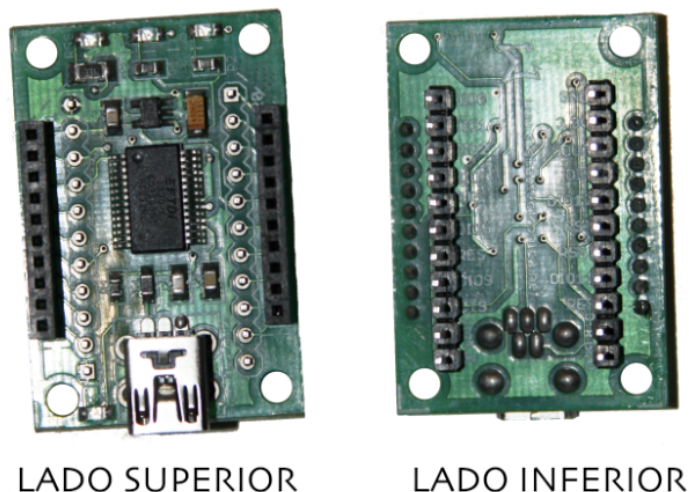
Fuente: (Digi International, 2015)



*Figura 2. XBee Pro 900*  
*Fuente: Propia*

### **6.3. XBee Explorer (Sigma Electronica, s.f.)**

El XBee Explorer USB permite realizar la conexión de cualquier módulo de la familia XBee directamente a un ordenador realizando la conversión USB a los pines seriales (UART) del módulo, toda la información es recibida al ordenador mediante el puerto USB y los datos son enviados y recibidos posteriormente a través del puerto serie para su posterior almacenamiento o tratamiento. Este dispositivo funciona para los módulos XBee Estándar y XBee Pro, mediante la conexión de esta tarjeta se realiza la programación del módulo XBee específico utilizando el software XCTU de la familia Digi International. En la actualidad numerosas compañías de electrónica fabrican diferentes modelos de este dispositivo, para este proyecto se utilizó el fabricado por la empresa Sigma Electronics ubicada en Bogotá.



*Figura 3. XBee Explorer*  
*Fuente: Propia*

#### **6.4. XCTU (DIGI, 2015)**

Es una aplicación gratuita desarrollada por la empresa Digi, permite a los usuarios programadores interactuar mediante una interfaz gráfica muy sencilla de usar y mediante las herramientas de configuración disponibles, lograr poner en marcha los módulos RF XBee de diversas maneras para la creación de redes de estos dispositivos y transmitir información de manera inalámbrica a elevadas frecuencias.

#### **6.5. Redes inalámbricas (Cisco, 2015)**

Se define una red inalámbrica como una herramienta fundamental para la conectividad en cualquier momento y lugar de un sistema de comunicaciones que transmite información mediante ondas electromagnéticas. Esto genera una notable reducción en costos de medios cableados pero también un aumento considerable en la robustez de la seguridad que debe tener la red.

Dentro de las principales ventajas que presenta una red inalámbrica se presentan:

- Asequibilidad: Elimina o reduce considerablemente los gastos de cableado, una red de tipo inalámbrica tiene un costo menor y es más sencilla de implementar o ampliar que una red cableada.
- Acceso: Mediante la conexión inalámbrica se pueden gestionar los recursos de la red desde cualquier ubicación en la que un usuario se encuentre.
- Facilidad de instalación y ampliación: Debido a que no existen medios físicos fundamentales para la conexión de los dispositivos, se reducen considerablemente los costos de instalación y de ampliación de un sistema de red inalámbrico específico.
- Seguridad: La mejora en los protocolos de seguridad de las comunicaciones inalámbricas han aumentado considerablemente en los últimos años, debido a que este tipo de tecnologías están en un constante auge. Es por ello que los nuevos protocolos de protección de información se encargan de cifrar los datos que fluyen por la red para poder desplazarnos de punto a punto evitando problemas de interferencias de terceros en la información transmitida.

#### **6.6. Arduino (Arduino, 2015)**

Arduino es una plataforma prototipo de códigos de carácter “open source”, que se basa en hardware y software fácil de usar. Las placas Arduino tienen la capacidad desde leer entradas análogas, encender LEDS, activar motores, publicar contenido en línea, o publicar en Twitter. Mediante el microcontrolador que se encuentra en las placas Arduino se pueden realizar conjuntos de instrucciones programadas para suplir las necesidades del

programador. Para esto se utiliza el lenguaje de programación que lleva el mismo nombre, basado en los lenguajes de programación Wiring y Processing.

Con el pasar de los años, Arduino se ha convertido en una pieza fundamental para el desarrollo de miles de proyectos de cualquier índole, desde proyectos caseros hasta proyectos científicos de alta complejidad.

Una característica de este lenguaje es que mediante la unión de comunidades de programadores, profesionales, artistas y aficionados de la programación se realizan contribuciones de conocimientos año tras año para popularizar y facilitar el uso de esta plataforma en cualquier nivel de complejidad.

#### **6.7. Arduino Uno (Arduino, 2015)**

La “Uno” es una placa electrónica que cuenta con 14 puertos de entradas/salidas en donde 6 son salidas PWM (Modulación por ancho de pulsos), 6 entradas analógicas, un cristal con frecuencia de 16MHz, posee conexión USB para la conexión al ordenador, conector de alimentación mediante un adaptador de corriente alterna o alimentación mediante baterías que brindan corriente continua.

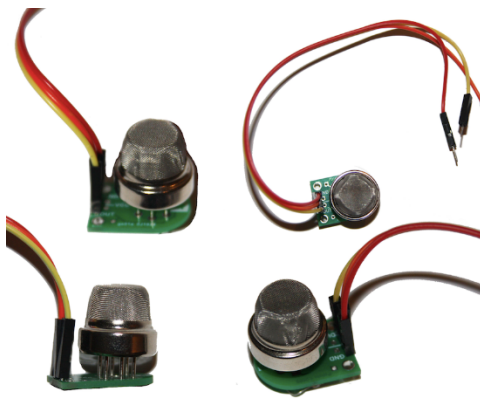
El nombre “Uno” se utilizó para conmemorar el lanzamiento de la primera versión del software de Arduino (IDE), es además el modelo de referencia para la plataforma Arduino.



*Figura 4. Tarjeta Arduino Uno*  
Fuente: Propia

### 6.8. Sensor de gas metano MQ4 (Hanwei, s.f.)

El MQ4 es un sensor de gas usado comúnmente para la detección de fugas de gas, en diversos ambientes, desde hogares hasta industrias. Tiene la capacidad de detectar Hidrógeno, gas licuado de Petróleo, gas Metano, Monóxido de Carbono y Alcohol. Este sensor posee la característica de respuesta rápida en el tiempo, tomando las muestras lo más rápido que sea posible. Esta sensibilidad puede ajustarse mediante el uso de un potenciómetro.



*Figura 5. Sensor MQ4*  
Fuente: Propia

Para la correcta utilización del sensor, se establece que el valor de la resistencia de carga que se utiliza debe estar entre  $10K\Omega$  y  $47K\Omega$ , sin embargo se recomienda que el valor de esta sea de  $20K\Omega$ .

En la hoja de datos del sensor se caracteriza como un dispositivo que posee su mayor respuesta de sensibilidad al gas metano ( $CH_4$ ) y va disminuyendo respecto a los otros gases que puede detectar. La característica de Sensitividad del MQ4 se presenta en la Figura 1.

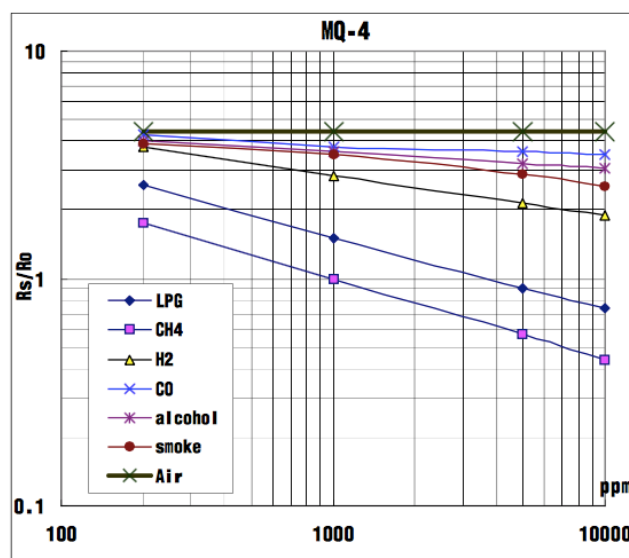


Figura 6. Característica de sensibilidad sensor MQ4  
Fuente: (Hanwei, s.f.)

## **7. Estado del arte**

### **7.1. ZigBee en minas**

La producción de carbón se ha convertido en una de las actividades con mayor demanda en el mundo, es por lo anterior que se crea la necesidad de proteger la integridad física de los trabajadores en las minas de carbón. Gracias al desarrollo de las TIC se han encontrado soluciones para prevenir accidentes que puedan afectar la integridad de los trabajadores, tal es el caso de las redes de área personal inalámbricas, definidas por el estándar IEEE 802.15.4 que hace referencia al protocolo ZigBee.

El carbón ha desempeñado un papel importante como fuente de ingresos para el desarrollo económico. Con el fin de garantizar la seguridad en minas de carbón, se han propuesto sistemas de monitoreo, que además ayudan a que la producción sea más eficiente, por lo que es importante la instalación de un nodo de monitoreo en los túneles de la mina para la detección de posibles riesgos en tiempo real. Sin embargo, existen algunas limitantes para la implementación del sistema de monitoreo tradicional, principalmente por los costos que conlleva el cableado que debe extenderse hasta el interior de la mina. En comparación con lo anterior, la utilización de un nodo de sensores inalámbricos puede facilitar el monitoreo al interior de las minas teniendo en cuenta la compatibilidad, en este caso de la tecnología de comunicación inalámbrica ZigBee, usada en sistemas de monitoreo en ambientes de minas de carbón (Yang, Chen, & Wang, 2011).

La tecnología ZigBee de comunicación inalámbrica a relativas cortas distancias trae consigo una serie de ventajas, es muy adecuada para lugares de trabajo como una mina o un lugar donde el espacio sea muy reducido y además donde el medio ambiente sea complejo. Con el fin de saber el posicionamiento de los mineros se utilizan sistemas de

posicionamiento de nodos con RSSI. Basado en la tecnología ZigBee se puede realizar la medición de distancia y dirección entre el punto de referencia y el punto de ubicación a partir de una serie de algoritmos que en el caso de que ocurra un accidente, el sistema pueda asegurar que las pérdidas en la comunicación sean mínimas y que los trabajadores que se encuentran al interior de la mina sean monitoreados con facilidad. En la figura 2 se puede observar la estructura de la red de posicionamiento ZigBee subterráneo de este proyecto (Zhang & Liu, 2012).

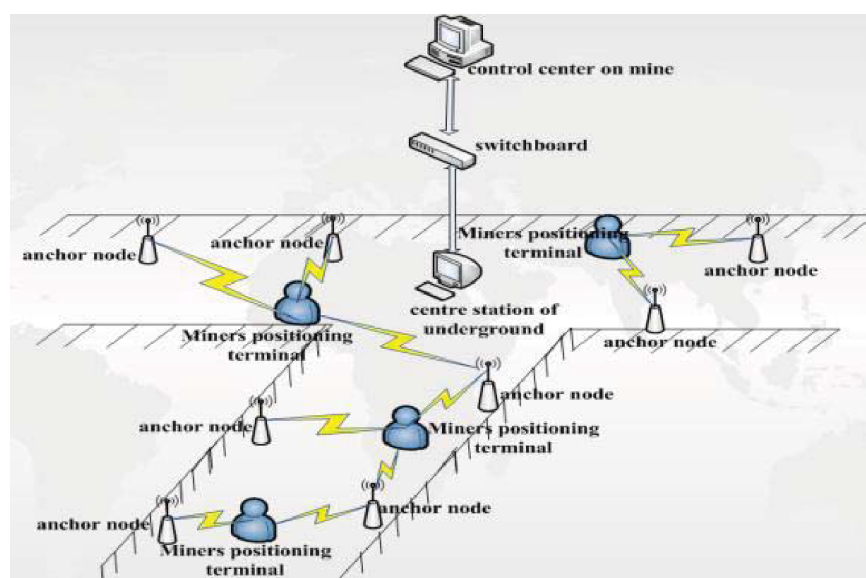


Figura 7. Estructura Posicionamiento ZigBee Subterráneo  
Fuente: (Zhang & Liu, 2012)

Siendo China uno de los mayores productores de carbón, en materia de seguridad en minas no está tecnificado, Por lo cual se diseña un sistema de monitoreo de posibles causales de accidentalidad al interior haciendo uso de una red de sensores inalámbricos de tecnología ZigBee. Con los sensores será posible recoger los datos de las condiciones bajo tierra, los cuales, una vez transmitidos serán enviados al computador que se encuentra por fuera de tierra, y con estos resultados establecer monitoreo de las condiciones al interior de

la mina para dar alarmas cuando se superen los límites de seguridad. La estructura del sistema diseñado se puede observar en la siguiente figura (Bian, 2010).

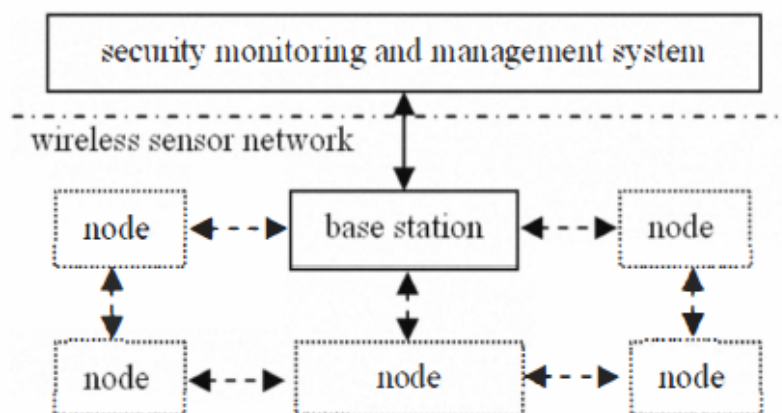


Figura 8. Estructura diseño con tecnología ZigBee  
Fuente: (Bian, 2010)

## 7.2. Domótica y ZigBee

En materia de implementación de dispositivos ZigBee en otros sectores, encontramos el estándar denominado “ZigBee Home Automation (HA)”, dedicado especialmente a la creación de redes inalámbricas de domótica que con el pasar del tiempo se han venido popularizando, a través de la integración de otras tecnologías inalámbricas avanzadas, el fundamento de este estándar ZigBee es realizar aplicaciones que logren comunicar dispositivos dentro del hogar, de maneras flexibles para realizar control de estos de manera remota, con capacidad de fácil expansión e instalación. (NXP, 2015)

En este estándar se definen 4 áreas fundamentales que funcionan con dispositivos móviles como celulares, computadores o Tablets. (NXP, 2015)

### **7.2.1. Iluminación**

Los sistemas de iluminación pueden ser implementados para ejecutar funciones de control de luces en varios lugares del hogar, modificando su intensidad, su color, switcheo, entre otras.

### **7.2.2. Calefacción, ventilación y aire acondicionado**

Control del aire acondicionado en varios puntos, así como de termostatos y sensores de temperatura. Controla también la temperatura de manera individual en habitaciones de acuerdo a la persona que la ocupe, logrando predefinir también grupos de calefacción / ventilación en los lugares del hogar.

### **7.2.3. Sombras y cortinas**

El control de sombras y cortinas puede ser implementado para ejecutar acciones de apertura o cerrado de cortinas total o parcial, establecer controles predefinidos para la apertura de estas dependiendo de las necesidades del usuario.

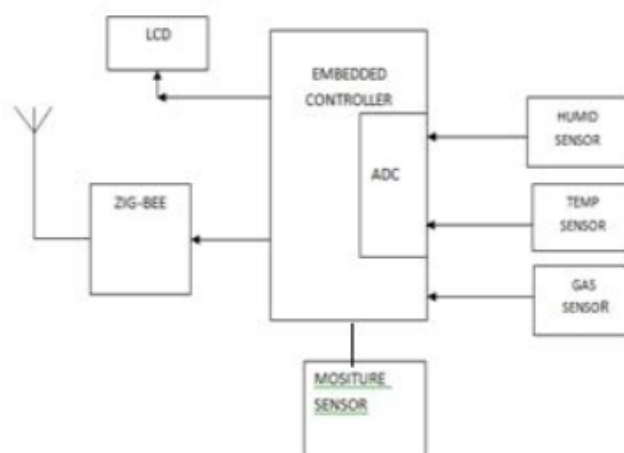
### **7.2.4. Sistemas de seguridad para el hogar**

Dentro de estos sistemas se pueden incluir sistemas de control de fuego, seguridad contra robos e intrusos y se implementa principalmente mediante la programación o ejecución de cerrado de puertas, y ahorro de energía. La información de procesos de instalación y configuración de una red de este tipo domótica puede encontrarse en su totalidad en (NXP, 2015).

### **7.2.5. Sistemas de detección de gases basados en ZigBee**

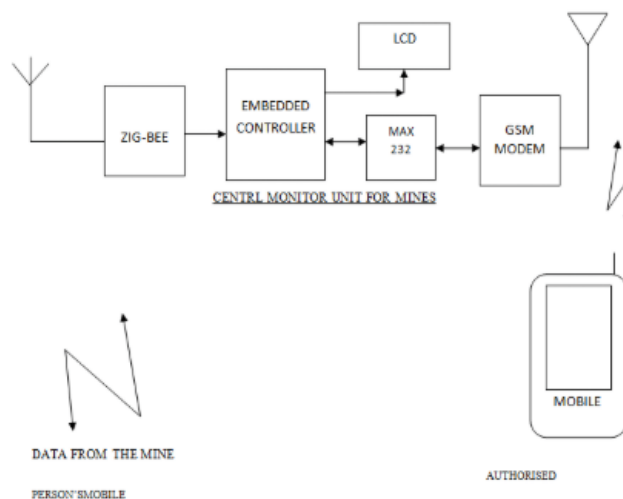
En el sector minero, gracias al protocolo ZigBee se ha masificado la implementación de diferentes sistemas inalámbricos de protección de vidas al interior de

estas minas, en (Rajkumar, 2012) se muestra un sistema de seguridad de trabajadores de minas mediante el uso de tecnología GSM y ZigBee abarcando aspectos de control de temperatura, control de humedad y medición de gas metano, esta información es brindada por diferentes sensores que están conectados a los dispositivos ZigBee y son enviados a una red de recepción de información que comienza con un ZigBee y mediante conexiones predeterminadas se usa un modem GSM para enviar una alerta a un dispositivo móvil ubicado al exterior de la mina. El siguiente esquema resume la propuesta desarrollada en este proyecto.



*Figura 9. Esquema de transmisión de información de proyecto*  
Fuente: (Rajkumar, 2012)

En la Figura 9 se caracteriza el esquema utilizado en este proyecto, en donde los sensores están conectados a un conversor ADC que a su vez se unen al controlador principal, haciendo uso de una pantalla LCD se observa el resultado de las mediciones. La información es transmitida a continuación por el dispositivo ZigBee



*Figura 10. Esquema de recepción de información de proyecto*  
*Fuente: (Rajkumar, 2012)*

En la Figura 10 se esquematiza la unidad de monitoreo central de la mina, que recibe la información enviada desde el bloque de la Figura 9 y haciendo uso de la tecnología GSM envía la alerta a un teléfono móvil conectado a la red.

Este proyecto desarrollado en 2012 es una muestra de los avances que se han dado en el campo de ZigBee implementados para mejorar la seguridad en las minas. Una de las conclusiones de este proyecto fue que las redes de sensores aplicadas a minas optimizan la seguridad de estas y pueden perfectamente reemplazar los métodos e ideas tradicionales para la protección de los mineros.

## 8. Solución

### 8.1. Selección de tecnología inalámbrica

Las tecnologías inalámbricas actuales brindan una amplia gama de opciones para cumplir con el diseño de redes como las planteadas en este documento, a continuación se presenta una tabla comparativa que muestra diferentes características de las tecnologías más utilizadas en la actualidad para aplicaciones Indoor y Outdoor.

Tabla 5. Comparación tecnologías inalámbricas

|                                      | ZigBee                               | Bluetooth          | Wireless USB               | Wi-Fi                      | Wibree                              | TinyOS                                    |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Aplicaciones</b>                  | Monitoreo y control                  | Reemplazo de cable | Web, email, video          | Web, email, video          | Reemplazo de cable                  | Soluciones de muy bajo consumo energético |
| <b>Frecuencia de radio</b>           | 868MHz, 915MHz, 2.4GHz               | 2.4GHz             | 3.1 – 10.6GHz              | 2.4 – 5GHz                 | 2.4GHz                              | 868MHz, 915MHz, 2.4GHz                    |
| <b>Ancho de banda</b>                | 20 – 250kbps                         | 1Mbps              | 110 – 480Mbps              | 11 – 108Mbps               | 1Mbps                               | 20 – 250kbps                              |
| <b>Dimensión de red</b>              | >65000                               | 7 - 8              | -                          | 30                         | -                                   | >65000                                    |
| <b>Rango de transmisión (metros)</b> | 1 - 75                               | 1 - 10             | 1 - 10                     | 1 - 100                    | 1 - 10                              | 1 - 100                                   |
| <b>Topología de red</b>              | Estrella, mallado y árbol de cluster | Ad hoc, piconet    | Point-to-point, multipoint | Point-to-point, multipoint | -                                   | Mallado puro                              |
| <b>Complejidad</b>                   | Baja                                 | Media - alta       | Alta                       | Alta                       | Media                               | Baja                                      |
| <b>Consumo energético</b>            | Bajo                                 | Medio              | Alto                       | Alto                       | Bajo                                | Muy bajo                                  |
| <b>Puntos fuertes</b>                | Consumo, coste, robustez, seguridad  | Coste, seguridad   | Velocidad                  | Velocidad, flexibilidad    | Consumo, coste, robustez, seguridad | Robustez, consumo, coste, flexibilidad    |

Fuente: (Genasys, 2013)

En la Tabla 5 se muestran las características que estas tecnologías poseen y las aplicaciones en las cuales se especializan y se puede concluir de esta, que la tecnología más adecuada para lograr el propósito de la implementación de una red de monitorización de

gases, que sea de bajo costo, con una alta variedad de topologías de red para configurar, bajo consumo y amplias distancias de cubrimiento de la red es la basada en tecnología ZigBee. Aunque este protocolo de tecnología inalámbrica surge en el año 2003, el impacto en los productos que se pueden crear con ella ha tenido un aumento considerable en el mercado y las posibilidades de expansión de servicios basados en ZigBee está en constante auge siendo complemento de tecnologías inalámbricas más robustas como WiFi mediante el potenciando de su funcionalidad y aumento en la calidad del servicio.

## 8.2. Arquitectura realizada

La implementación de la red para la medición de gases se realiza mediante la topología de red en malla, a continuación se presenta un esquema gráfico de la arquitectura propuesta para el proyecto.

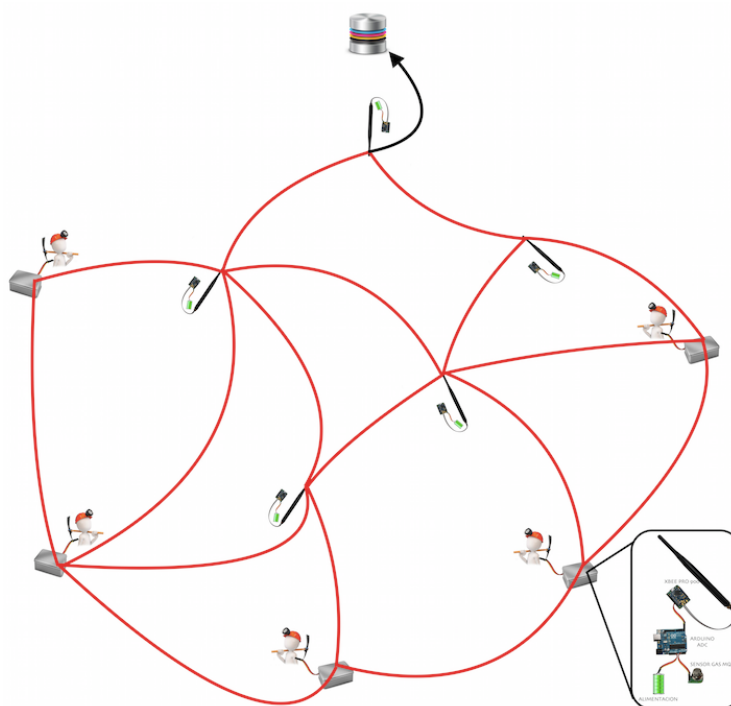
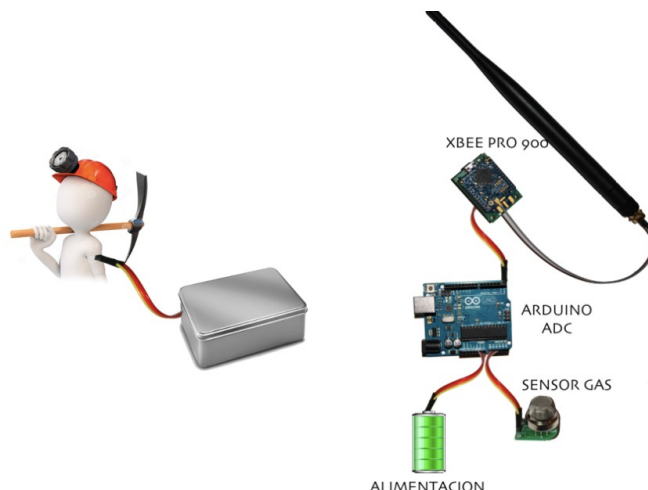


Figura 11. Arquitectura de red a implementar  
Fuente: Propia

La red se compone de un equipo que utilizará cada trabajador y lo cargará consigo siempre que esté dentro de la mina; en la figura anterior se representa mediante una caja de color gris, este equipo se compone del sensor de gas MQ4 que obtiene los datos y los envía como información análoga, este sensor está conectado directamente a un puerto análogo de la tarjeta Arduino Uno, la cual cumplirá la función de convertir los datos análogos a digital, posteriormente se crossconecta la salida digital de la tarjeta Arduino con la entrada digital del dispositivo XBee Pro 900 para que este, actuando en configuración de *router* se encargue de realizar la distribución de la información al resto de la red. Estos equipos están alimentados mediante una batería portátil que se conecta a la tarjeta Arduino que alimenta al resto de dispositivos utilizados. Si se desea realizar una medición adicional de algún otro sensor, solo bastaría con conectarlo a la tarjeta Arduino y programar otros puertos de entrada y salida, en este proyecto solo nos enfocamos en la medición de gas Metano, en el caso que se quisiera expandir el proyecto y medir por ejemplo Dióxido de Carbono, se hace necesaria la adquisición de un sensor de este tipo de gas, es el caso del MG811, el cual es el más adecuado debido a su alta sensibilidad en presencia de este gas, sin embargo se generaron varias dificultades para su adquisición y se hizo hincapié en el Metano.

En la siguiente figura se esquematiza el sistema de obtención y transmisión de datos de las mediciones de gases, utilizado por cada trabajador de la mina.



*Figura 12. Sistema de obtención y transmisión de medición de gases*  
Fuente: Propia

A continuación, el XBee Pro se conecta, tanto con los demás sistemas de obtención de datos de los trabajadores cercanos, como con los equipos que actuarán netamente en configuración de *routers*, implementados con menor cantidad de dispositivos; no incluye sensor MQ4 ni la tarjeta Arduino Uno, debido a que únicamente tendrán la función de replicar lo que reciben, generando redundancia total de información, en la siguiente figura se esquematiza el equipo que actuará en configuración de *Router*.



*Figura 13. Equipo Router*  
Fuente: Propia

En la parte superior de la topología de la red caracterizada en la Figura 11, se encuentra un último dispositivo que tendrá la misma representación esquemática que el equipo de la Figura 13, pero que actuará en modo *Coordinador* y tendrá la función de recibir la información de las mediciones enviadas en la totalidad de la red para su tratamiento y almacenamiento en una base de datos.



*Figura 14. Representación de Base de datos de la red*  
*Fuente: <http://aula-center.com>*

### **8.3. Justificación de la arquitectura**

Se propone una red tipo malla debido a que esta topología brinda mayor posibilidad de comunicación entre los equipos de la red, independientemente de la ubicación donde se encuentre el trabajador de la mina, al efectuarse la interconexión de todos los nodos se genera una redundancia total en la red aumentando sustancialmente su fiabilidad y elevando el índice de tolerancia a fallos; debido a que cualquier equipo buscará el *router* más cercano para trazar el camino hacia el equipo *coordinador*, mitigando así problemas que otras topologías pueden generar al ser enrutadas de forma manual por un único trayecto y que este no pueda ser alcanzado por diversos factores, traducéndose en pérdidas totales o parciales de la información.

### 8.3.1. Programación red en malla XBee

La programación de la malla de nodos XBee se efectuó mediante el software XCTU elaborado por la empresa Digi, fabricante también de los módulos XBee.

El primer paso es realizar la instalación del driver requerido para que el ordenador identifique los módulos XBee y les asigne un puerto de comunicaciones (COM) mediante el adaptador XBee Explorer y el puerto USB del ordenador. Este driver puede variar dependiendo de la versión que se tenga del adaptador, en este caso se instaló el driver disponible en la página del fabricante del adaptador Sigma Electrónica (Sigma Electronica, s.f.) llamado “DIGI\_USB\_RF\_Drivers”.

Una vez identificado el módulo se ejecuta el software XCTU. El primer paso es realizar el escaneo de los puertos de comunicación para ubicar los dispositivos disponibles para su configuración, en la barra superior en el costado izquierdo se encuentra el botón que realiza dicha búsqueda.



*Figura 15. Botón de búsqueda de módulos XBee  
Fuente: Propia*

Una vez seleccionado este botón, el software muestra los escanea los dispositivos disponibles en los puertos de comunicación, se seleccionan los que se deseen configurar y se da clic en el botón “Next”.

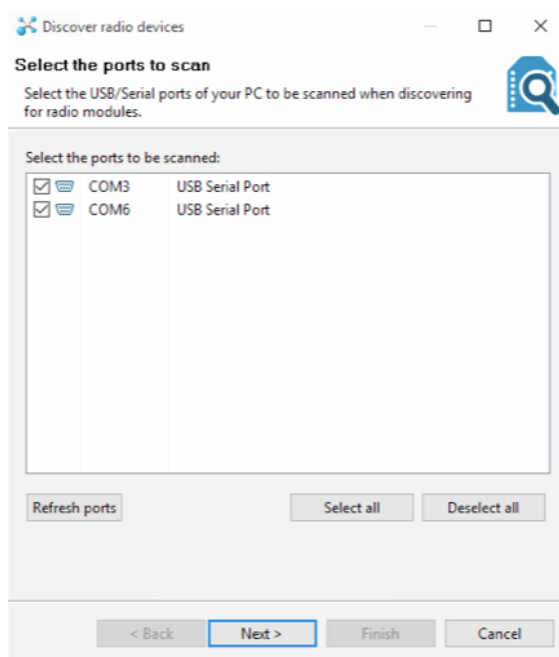


Figura 16. Resultado de búsqueda de dispositivos  
Fuente: Propia

A continuación se configuran parámetros como la paridad, la velocidad en baudios, el número de bits, bits de paradas y el control de flujo. En esta configuración se dejarán las opciones por defecto mostradas en la Figura 17.

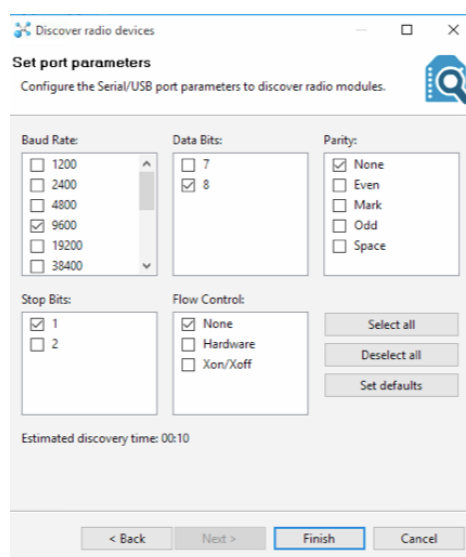


Figura 17. Ventana de configuración de parámetros para XBee  
Fuente: Propia

Luego de esta opción, XCTU realiza la búsqueda de las configuraciones internas de los dispositivos conectados, en este caso se muestra un XBee configurado como *Coordinador* marcado con la letra C en color rojo, y otro XBee *router* marcado con la letra R en color verde.

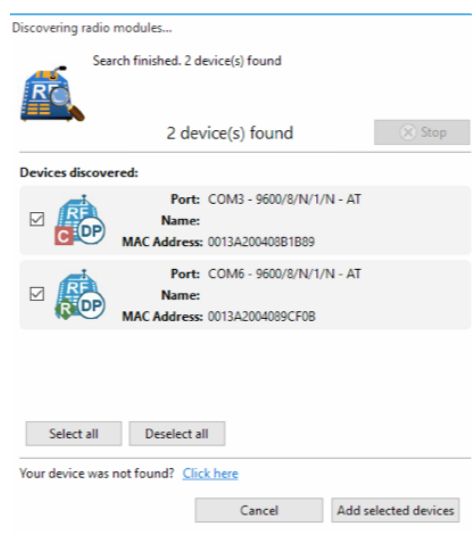


Figura 18. Detección de dispositivos y sus configuraciones  
Fuente: Propia

Una vez seleccionados los dispositivos se accede a la pantalla de configuración de los dispositivos, en esta se puede establecer la función que se desea que el módulo cumpla, en el caso del *router* se ubica la sección “Networking” y en la última opción “Coordinator Enable” se selecciona “Standard Node [0]”, esta opción pondrá en modo *router* al dispositivo, en el caso del *coordinador* se seleccionará la opción “Coordinator [1]” en la misma sección.

Posterior a la configuración del modo de funcionamiento se realizará la configuración de la red en malla, esto se hará en la sección del software llamada “Adressing” y mediante la escritura de las direcciones de destino alta y baja “DH” y “DL”; para que la red funcione en topología malla, se deben establecer iguales en todos los

dispositivos que harán parte de la red. En este caso se utilizarán las direcciones  $DH=0$  y  $DL=FFFF$ .

Si se quisiera implementar otra topología de red diferente a mesh, en donde se desee trazar una ruta de información específica entre los XBee, se utilizaría la dirección de 64 bits única en cada XBee que se encuentra impresa en la parte inferior de éste.



*Figura 19. Parte posterior de dispositivo XBee con dirección impresa  
Fuente: Propia*

Por ejemplo, si un dispositivo “A” desea transmitir a un dispositivo “B”, en la configuración de la dirección  $DH$  y  $DL$  de “A” se colocará la dirección del dispositivo “B”. En el caso de la figura anterior la dirección única del dispositivo en  $DH$  será la “13A200” mientras que la dirección  $DL$  será “4089CF08”.

Una vez la configuración en malla se haya efectuado, se programarán los parámetros en el módulo haciendo uso del botón de escritura ubicado en la parte superior del menú de configuración y simbolizado como se muestra en la siguiente figura.



Figura 20. Botón de escritura de programación para XBee  
Fuente Propia

La pantalla resultante con toda la configuración del módulo, al finalizar la escritura, se presenta en la Figura 21.

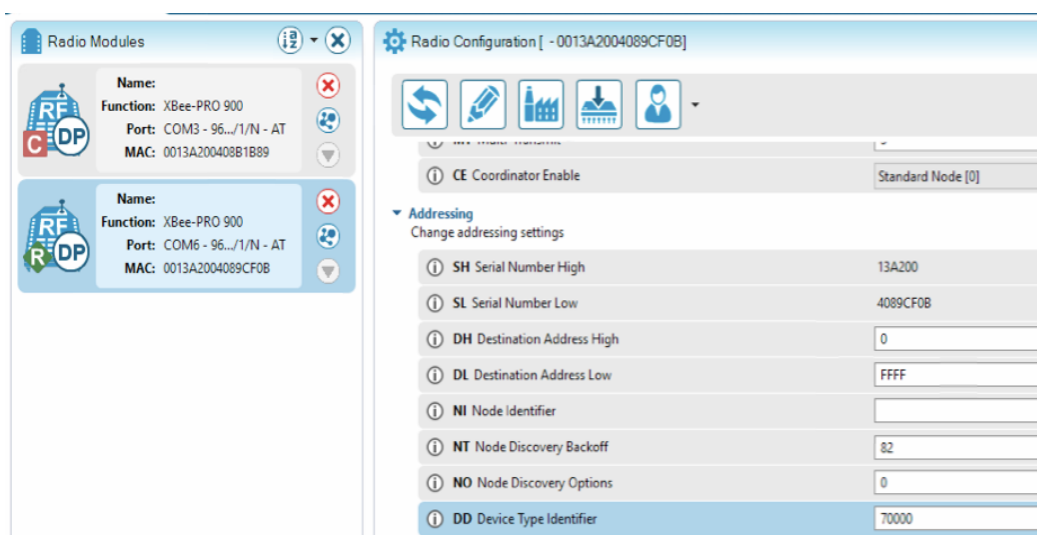


Figura 21. Pantalla final de configuración de router  
Fuente: Propia

En el caso de la configuración del módulo *coordinador* se realizan los mismos pasos anteriormente descritos, con la diferencia de establecer el *CE (Cordination Enable)* en modo *Coordinator*.

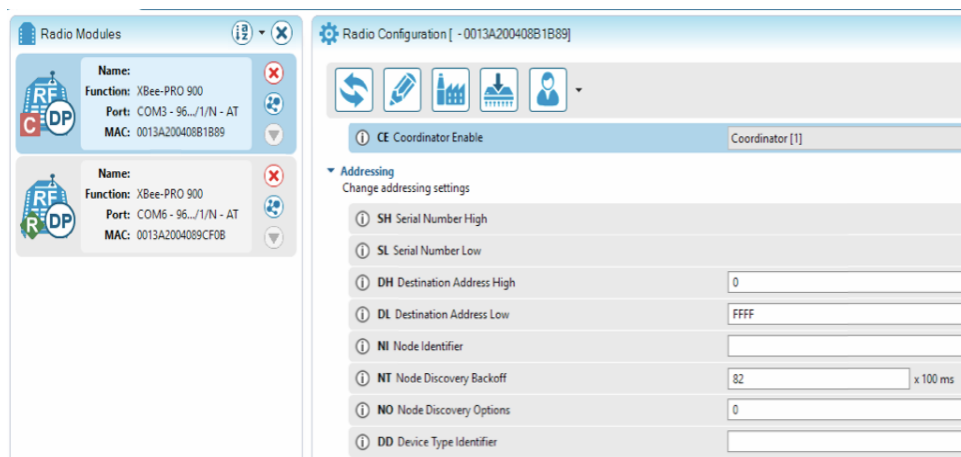


Figura 22. Pantalla final de configuración de coordinador  
Fuente: Propia

### 8.3.2. Primeras Pruebas

En esta sección se describe el proceso de verificación del correcto funcionamiento de la programación de los módulos, para ello se accede al registro de consola ubicado en el segundo botón de la figura mostrada a continuación.



Figura 23. Botón de registro de consola en XCTU  
Fuente: Propia

En la consola se realizará el proceso de interconexión de los módulos para enviar información de uno al otro y verificar la fiabilidad de la red, esto mediante la ejecución del botón de activación del módulo mostrado en la Figura 24.

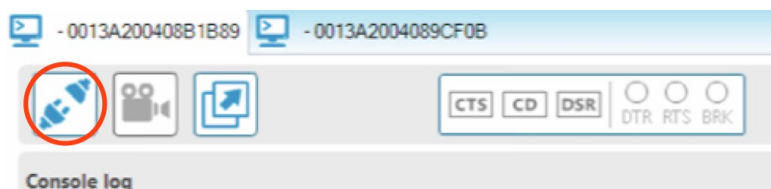


Figura 24. Botón para activación del dispositivo a la red  
Fuente: Propia

Una vez conectados los dos dispositivos se realizó una prueba del envío de la palabra “Hola”, desde el *coordinador* hacia el *router*; cuando se transmite la información el texto transmitido tiene color azul, mientras que la recepción muestra el texto en color rojo.

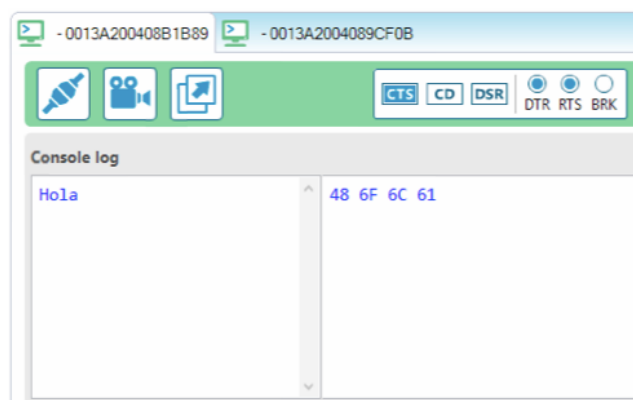


Figura 25. Registro de la consola de equipo coordinador transmisor  
Fuente: Propia

Para comprobar que el *router* recibió la información transmitida, se cambia a la segunda pestaña y se observa el resultado de la recepción.

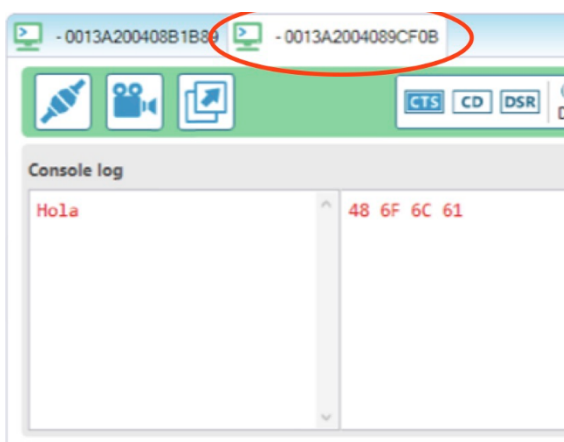


Figura 26. Registro de la consola del equipo router receptor  
Fuente: Propia

Una vez comprobada la comunicación, se desea observar el funcionamiento del *coordinador* como módulo receptor, por lo que desde el *router* se transmite la palabra “Hola.” Y se verifican los mismos parámetros que en el caso anterior.

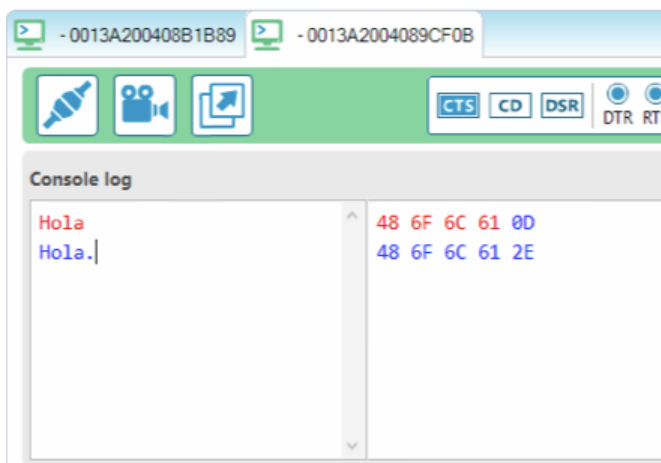


Figura 27. Equipo router transmitiendo  
Fuente: Propia

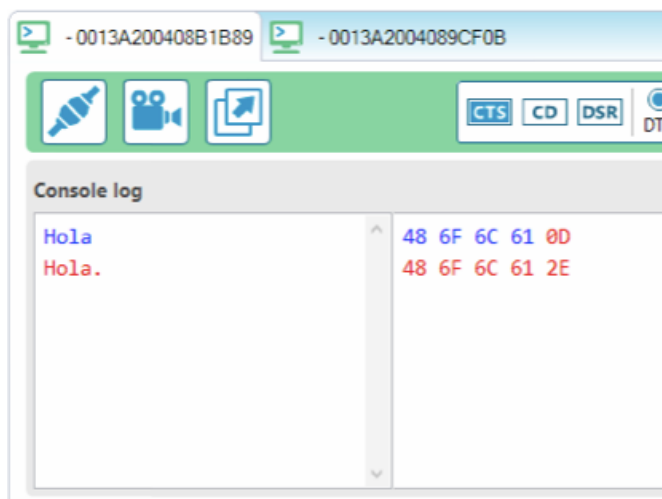


Figura 28. Equipo coordinador recibiendo  
Fuente: Propia

### 8.3.3. Conversión ADC

Para realizar el proceso de conversión de los datos análogos obtenidos mediante el sensor de gas MQ4 se programó la placa Arduino I para que realizara una conversión ADC, el código correspondiente a la entrada de datos analógicos y la salida de estos convertidos a digital se presenta en el siguiente código.

```

int valorlimite=950; // Establecemos limite en 950,
                        //Luego de este se encenderá el LED o la alarma

void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Velocidad de puerto en 9600 baudios
    pinMode(12,OUTPUT); //Pin 12 de encender LED o alarma
}

void loop()
{
    Serial.print("Nivel-Xbee1: "); //imprimir en pantalla
    Serial.print(analogRead (A0)); // imprime valor digital
    Serial.print("\n");
    if(analogRead(A0) > valorlimite) //si el valor análogo supera limite
    {
        digitalWrite(12, HIGH); //establece "1" el LED o alarma
    }
    else{
        digitalWrite(12, LOW); // si el valor baja del límite se apaga el LED o
Alarma
    }
    delay(1000); //Espera 1s para efectuar cada ciclo
}

```

#### 8.4. Calibración sensor MQ4

Para realizar la correcta calibración del sensor MQ4 se debe tener en cuenta principalmente los valores entregados por la tabla técnica del dispositivo sensor, haciendo énfasis en los valores de RL y RS para poner en marcha el correcto rendimiento del sensor.

La calibración del sensor se efectúa teniendo en cuenta los valores mostrados en la tabla de datos técnicos del sensor mostrada a continuación, para esto se debe tener en cuenta el ajuste de la resistencia RL; o *resistencia de carga*, que tendrá un valor de  $20K\Omega$  y de esta forma, basados en la Figura 6 extraída de la hoja de especificaciones del fabricante se deberá obtener un valor de la resistencia Rs o *resistencia de detección* de  $2K\Omega$ , cumpliendo con el parámetro mostrado en la tabla para el valor de Rs. De esta manera se obtiene que la información que nos muestra el sensor será igual a la de las pruebas vistas en la hoja de datos del fabricante en la sección denominada “*Calibración de Sensitividad*” en donde se establece que el valor de calibración óptimo debe darse en 5000ppm de CH<sub>4</sub>, con una Rs de  $2K\Omega$  y RL de  $20\Omega$ .

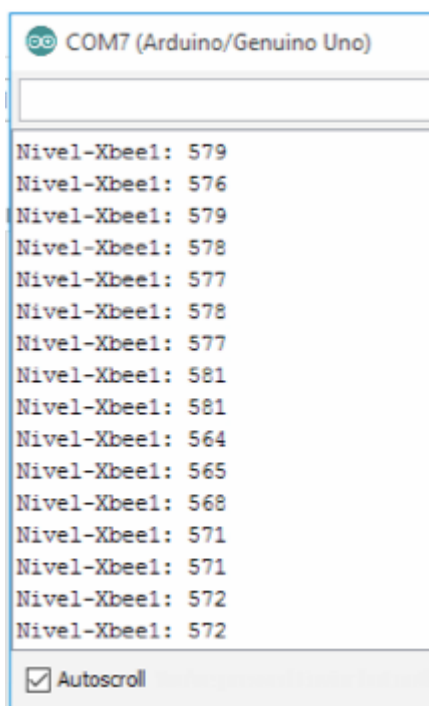
Tabla 6. Datos técnicos sensor MQ4

|                        |                       |          |                                                        |
|------------------------|-----------------------|----------|--------------------------------------------------------|
| Model No.              |                       |          | MQ-4                                                   |
| Sensor Type            |                       |          | Semiconductor                                          |
| Standard Encapsulation |                       |          | Bakelite (Black Bakelite)                              |
| Detection Gas          |                       |          | Natural gas/ Methane                                   |
| Concentration          |                       |          | 300-10000ppm<br>( Natural gas / Methane)               |
| Circuit                | Loop Voltage          | $V_e$    | $\leq 24V$ DC                                          |
|                        | Heater Voltage        | $V_H$    | $5.0V \pm 0.2V$ AC or DC                               |
|                        | Load Resistance       | $R_L$    | Adjustable                                             |
| Character              | Heater Resistance     | $R_H$    | $31\Omega \pm 3\Omega$ (Room Tem.)                     |
|                        | Heater consumption    | $P_H$    | $\leq 900mW$                                           |
|                        | Sensing Resistance    | $R_s$    | $2K\Omega - 20K\Omega$ (in 5000ppm CH <sub>4</sub> )   |
|                        | Sensitivity           | S        | $R_s(\text{in air})/R_s(5000\text{ppm CH}_4) \geq 5$   |
|                        | Slope                 | $\alpha$ | $\leq 0.6(R_{5000\text{ppm}}/R_{3000\text{ppm CH}_4})$ |
| Condition              | Tem. Humidity         |          | $20^\circ C \pm 2^\circ C$ ; 65% $\pm 5\%$ RH          |
|                        | Standard test circuit |          | $V_e: 5.0V \pm 0.1V$ ;<br>$V_H: 5.0V \pm 0.1V$         |
|                        | Preheat time          |          | Over 48 hours                                          |

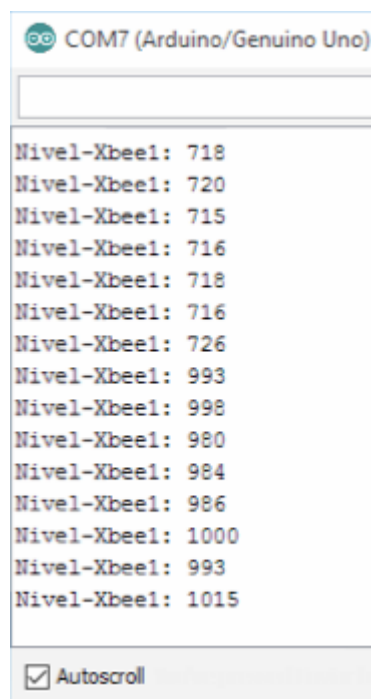
Fuente: (Hanwei, s.f.)

### 8.5. Pruebas finales y resultados

Las pruebas se realizaron con un encendedor que contiene gas metano, el resultado de la medición al implementar la red se presenta en la Figura 29 y Figura 30, en estas se puede observar el nivel de medición que entrega el módulo *Xbee número 1* en la consola del programa Arduino, la Figura 29 muestra el nivel en un ambiente normal, mientras que la Figura 30 muestra el nivel cuando el sensor se encuentra en presencia de alta concentración de gas metano.



*Figura 29. Nivel en ambiente normal*  
*Fuente: Propia*



*Figura 30. Nivel en presencia de gas metano*  
*Fuente: Propia*

Para corroborar el nivel que está midiendo el sensor, se utilizó también el programa XCTU el cual mediante el puerto de comunicaciones del módulo coordinador se posibilitó la opción de visualizar la información suministrada por el sensor en un software diferente al que se utiliza para configurar los módulos XBee. En la Figura 31 se muestra la información del nivel cuando ya empieza a disminuir la presencia de gas, comparados en la consola de Arduino y XCTU.

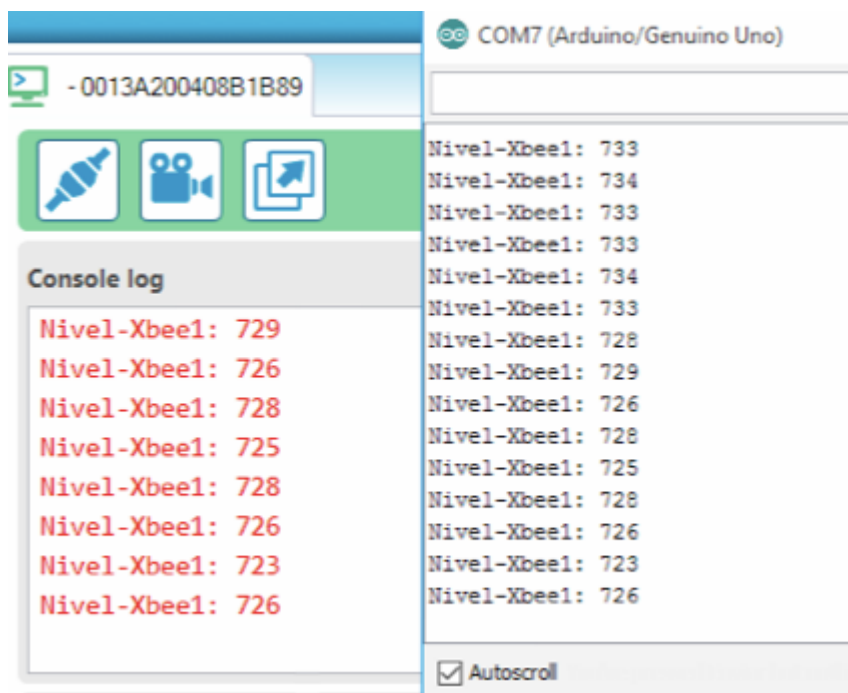


Figura 31. Verificación nivel  
Fuente: Propia

Se observa además en los resultados anteriores que el valor mínimo alcanzado por el sensor y mostrado por el XCTU es de alrededor de 700 y el máximo es de aproximadamente 1000, haciendo referencia a unos valores de voltaje mínimo de 2,4v y máximo de 4,7v, de esta forma se establece que es recomendable mantener unos niveles algo menores a 950, ya que si se alcanza este valor sería equivalente a 10.000ppm de CH<sub>4</sub>, y un ambiente que permanezca con una medida constante de este valor se considera en riesgo de explosión, para esto se agregó un LED que mostrará el momento en que se supere este nivel y el trabajador pueda estar atento al estado de las mediciones de concentración de CH<sub>4</sub>.

## 9. Conclusiones

Los elevados índices de accidentalidad dentro de las minas ha sido un tema de preocupación general para la industria minera y la protección de la vida en general, por esto las tecnologías de información y las comunicaciones han sido un campo de apoyo para mejorar la seguridad en estos ambientes y brindar diversas soluciones que permitan salvaguardar la vida de los trabajadores al interior de las minas.

La implementación de redes de seguridad para ambientes mineros basadas en tecnologías inalámbricas de bajo costo y alta fiabilidad puede ser una de las soluciones más viables para aumentar los estándares de seguridad de la vida en la labor minera tal y como en este prototipo de red se mostró, el realizar un monitoreo constante de gases como el metano puede generar una mejora en dichos estándares brindando más confianza para los trabajadores de esta importante labor del sector industrial.

La transmisión de los datos brindados por el sensor de gas, implementada mediante tecnología inalámbrica ZigBee resulta ser una de las más adecuadas para la instalación de redes como la propuesta en este documento, ya que este estándar se posiciona por encima de otras tecnologías de su categoría, en aspectos de instalación de redes de monitoreo y control de sistemas, con facultades de fácil programación, implementaciones de diversas topologías de red, y adquisición bajo consumo de energía y alta seguridad en la comunicación.

Arduino es una herramienta de desarrollo que posee características similares a ZigBee en términos de facilidad de programación e implementación de múltiples sistemas, es por esta razón que la unión de estos es comúnmente utilizada en la industria para aplicaciones de control y monitoreo. En este proyecto se utilizó la tarjeta Arduino para

realizar la recolección de la información análoga brindada por el sensor de gas y realizar una conversión de estos datos a formato digital para poder enviarlos al equipo XBee y efectuar la transmisión de la información en la totalidad de la red.

El proceso de calibración del sensor MQ4 se convierte en un paso de relevancia en este proyecto debido a que su sensibilidad es muy elevada a cambios por diferencias en el voltaje de alimentación y factores del ambiente como humedad o temperatura, por esto se establecieron los parámetros de funcionalidad óptimos para que el dispositivo funcionara en la mejor configuración posible, basándonos en los resultados gráficos mostrados en la hoja de datos del fabricante.

## Referencias

- Bian, J. (2010). *Application of the Wireless Sensor Network Based on ZigBee Technology in Monitoring System for Coal Mine Safety*. Changchun.
- CNN México . (2 de Julio de 2015). *CNN México* . Obtenido de <http://mexico.cnn.com/mundo/2015/07/02/explosion-en-una-mina-de-carbon-en-colombia-deja-al-menos-cinco-muertos>
- Wen, D., Yue, X., Ma, H., & Wan, Y. (2011). *Design of Coal Mine Gas Monitoring System Based on ZigBee*. Harbin.
- Yang, D., Chen, Y., & Wang, K. (2011). *A Coal Mine Environmental Monitor System with Localization Function Based on ZigBee-Compliant Platform*. Beijing.
- Zhang, H., & Liu, X. (2012). *A Localization Algorithm for Miners underground of Coal Mines Based on ZigBee Technology*. Harbin.
- Baronti, P. (2006). *Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards*. Pisa.
- Cisco. (23 de Febrero de 2015). *Cisco*. Obtenido de [http://www.cisco.com/web/ES/solutions/es/wireless\\_network/index.html](http://www.cisco.com/web/ES/solutions/es/wireless_network/index.html)
- Cutler, D. (18 de Junio de 2010). *Alto Nivel*. Obtenido de <http://www.altonivel.com.mx/4596-los-peores-accidentes-mineros-del-mundo.html>
- Digi International. (Enero de 2015). *Digi International*. Obtenido de <http://www.digi.com/technology/rf-articles/wireless-zigbee>
- Digi International. (10 de Enero de 2015). *Digi International*. Obtenido de <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-series1-module>

Martínez, H. (10 de Diciembre de 2009). *Ministerio de Minas y Energía*. Obtenido de

[http://www.simco.gov.co/Portals/0/Otros/DOC\\_ESP.pdf](http://www.simco.gov.co/Portals/0/Otros/DOC_ESP.pdf)

Ministerio de Minas y Energía. (2010). *Resolución Por la cual se establecen medidas en*

*materia de Higiene y Seguridad en Las Labores Mineras Subterráneas*. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano. (21 de Julio de 2010). *Servicio Geológico Colombiano*.

Obtenido de <http://www.ingeminas.gov.co/Intranet/Publicaciones/Comunicados-de-prensa/2010/Comunicado-de-Prensa-043-de-2010.aspx>

Arduino. (2015). *Arduino*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

DIGI. (2015). *DIGI*. Obtenido de <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/xctu-software/xctu>

Genasys, C. (2013). *Localización INDOOR y OUTDOOR para la Minería*. Madrid. Obtenido

de <http://www.genasys.com/es/component/phocadownload/category/1-presentaciones.html?download=11:presentacion-mineria>

Hanwei. (s.f.). *Sparkfun*. Obtenido de

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-4.pdf>

Infobae. (25 de Agosto de 2015). *Infobae America* . Obtenido de

<http://www.infobae.com/2015/08/25/1750699-cuatro-muertos-una-explosion-una-mina-colombia>

MCI Electronics. (2010). *Guía de Usuario XBee Series* .

Mundo, E. (14 de Mayo de 2014). *El Mundo*. Obtenido de

<http://www.elmundo.es/internacional/2014/05/13/537237e022601d102f8b4574.html>

NXP. (20 de Febrero de 2015). *NXP*. Obtenido de

[http://www.nxp.com/documents/user\\_manual/JN-UG-3076.pdf](http://www.nxp.com/documents/user_manual/JN-UG-3076.pdf)

Rajkumar, B. B. (2012). *ZigBee based mine safety monitoring system with GSM*. Chirala.

Sigma Electronica. (s.f.). *Sigma*. Obtenido de <http://www.sigmaelectronica.net/xbee-explorer-p-1219.html>

Texca. (s.f.). *Texca*. Obtenido de <http://www.texca.com/basicex.htm>

Tiempo, E. (2 de Julio de 2015). *El Tiempo* . Obtenido de

<http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/explosion-en-mina-de-samaca-cinco-muertos/16033596>

Nacion, L. (15 de Mayo de 2014). *La Nacion*. Obtenido de

<http://www.lanacion.com.ar/1690617-furia-en-turquia-por-la-peor-tragedia-minera-de-su-historia>