

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR PARA LA DETECCIÓN Y  
CUANTIFICACIÓN DE H<sub>2</sub>S EN GASES DE PIRÓLISIS DE LLANTA**

**CESAR AUGUSTO RODRIGUEZ ABAUNZA  
JAMEL EDUARDO RUMBO ARIAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR PARA LA DETECCIÓN Y  
CUANTIFICACIÓN DE H<sub>2</sub>S EN GASES DE PIRÓLISIS DE LLANTA**

**CESAR AUGUSTO RODRIGUEZ ABAUNZA  
JAMEL EDUARDO RUMBO ARIAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
Ingeniero Químico**

**Director:  
DEBORA ALCIDA NABARLATZ, PhD.**

**Codirector:  
PAOLA MARADEI, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

## DEDICATORIA

*A Dios por darme las habilidades, la salud y la fortaleza necesarias para culminar esta etapa de mi vida y demostrarme que a pesar de las adversidades la fe vence todas las barreras.*

*A mis padres, por sus cuidados, bendiciones, palabras de aliento y por creer siempre en mí.*

*A mis queridas hermanas Aleja y Valentina por la confianza depositada en mí y por ser mis cómplices.*

*Al amor de mi vida Martha Prada por estar todo este tiempo a mi lado y brindarme todo su amor y comprensión.*

*A mi padrino Dioselino por darme la oportunidad de emprender este camino, a el más que a nadie le doy gracias y pido a Dios bendiciones sobre él y su familia, porque de no ser por su apoyo incondicional este logro tal vez no sería posible.*

*A mi mamita gloria que está en el cielo por ser una segunda mamá en los momentos en que estuve lejos del ser que me dio la vida y por todo su cariño, muestras de afecto y por enseñarme el valor de la humildad.*

**CESAR AUGUSTO RODRIGUEZ ABAUNZA.**

## DEDICATORIA

*A Dios por bendecirme darme la sabiduría y todas las cosas de la vida para lograr esta meta.*

*A mi padre Jamel Jose que está en el cielo y que me acompaña en cada paso que doy muchas gracias por estar siempre ahí, aunque no estés en cuerpo puedo sentir que tu alma me acompaña en cada paso que doy.*

*A mi madre María, a mis hermanos Teo y Julio por estar siempre ahí apoyándome en todos los momentos difíciles y fáciles de este proceso.*

*A mi abuela Teresa, a mis tía Adanolys y Nelly por darme ese voto de confianza no tengo palabras para agradecerles.*

*A mis abuelos Elsy y Cercelino por todo ese amor y comprensión.  
A mi familia y Amigos por todo su apoyo incondicional.*

**JAMEL EDUARDO RUMBO ARIAS**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por la salud, sabiduría, inteligencia y fortaleza, por permitirnos realizar y culminar un proyecto más en nuestra vida.

Al profesor de la universidad de la andes Johann F. Osma y a la ingeniera María Camila Guachetá Buendía por ser los que colocaron las bases para poder iniciar el proyecto.

A nuestras compañeras del laboratorio de Interfase Claudia Y Lili, quienes a lo largo de este tiempo han puesto a prueba sus capacidades, conocimientos y comprensión en el desarrollo de este proyecto, el cual ha finalizado llenando todas nuestras expectativas.

Al profesor Raúl Cadena quien aportó todo su conocimiento sobre la parte eléctrica necesaria para el desarrollo de nuestro proyecto.

A todo el grupo del CDT de Gas en especial al profesor Luis García y al compañero Wilmer por acogernos en sus instalaciones y brindarnos la oportunidad de poder construir la curva de calibración que era la parte más importante de nuestro proyecto. .

Y finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad la cual abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN -----	16
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA -----	18
1.1 PIRÓLISIS -----	18
1.2 NORMATIVA -----	19
1.3 TIPOS DE SENSORES Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO -----	21
1.3.1 Infrarrojo -----	21
1.3.2 Electroquímicos -----	21
1.4 SISTEMA DE SENSOR A IMPLEMENTAR -----	22
1.4.1 Diseño de dispositivo -----	22
2. OBJETIVOS -----	24
2.1 OBJETIVO GENERAL -----	24
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS -----	24
3. METODOLOGÍA -----	25
3.1 DISEÑO Y MONTAJE DEL SENSOR COMERCIAL ELECTROQUÍMICO	25
3.2 CALIBRACIÓN DEL SENSOR -----	26
3.3 VALIDACIÓN DEL SENSOR -----	28
3.3.1 Reacción química -----	28
3.3.2 Prueba de Pirólisis -----	30
3.4 COMPARACIÓN DEL SENSOR COMERCIAL ELECTROQUÍMICO CON SENSOR INFRARROJO -----	32
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS -----	35
4.1 CALIBRACIÓN DEL SENSOR EN EL CDT DE GAS. -----	35
4.2 VALIDACIÓN DEL SENSOR COMERCIAL -----	36
4.2.1 Validación mediante reacción química. -----	36
4.2.2 Pirólisis. -----	42

4.3 COMPARACIÓN DEL SENSOR COMERCIAL ELECTROQUÍMICO CON SENSOR INFRARROJO-----	43
5. CONCLUSIONES -----	45
6. RECOMENDACIONES -----	46
BIBLIOGRAFÍA-----	47
ANEXOS -----	50

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

<b>Figura 1.</b> Metodología comparación con un sensor infrarrojo. -----	25
<b>Figura 2.</b> Montaje sensor MQ. -----	26
<b>Figura 3.</b> Sistema para la calibración del sensor electroquímico en el CDT de gas. -----	27
<b>Figura 4.</b> Montaje del sensor MQ 136 en el sistema de validación con reacción química. -----	29
<b>Figura 5.</b> Unidad piloto de pirólisis térmica y catalítica de llantas usadas. -----	30
<b>Figura 6.</b> Montaje del sensor MQ 136 para la evaluación de los gases de pirólisis. -----	31
<b>Figura 7.</b> Montaje del sensor infrarrojo. -----	34
<b>Figura 8.</b> Curva de calibración de H <sub>2</sub> S con respecto al voltaje para el sensor comercial. -----	36
<b>Figura 9.</b> Grafica del voltaje (V) versus el Tiempo (ms) obtenido en pruebas de 10 ppm. -----	37
<b>Figura 10.</b> Grafica del voltaje (V) versus el Tiempo (ms) obtenido en pruebas de 15 ppm. -----	38
<b>Figura 11.</b> Grafica del voltaje (V) versus el Tiempo (ms) obtenido en pruebas de 20 ppm. -----	38
<b>Figura 12.</b> Grafica del voltaje (V) versus el Tiempo (ms) obtenido en pruebas de 50 ppm. -----	39
<b>Figura 13.</b> Grafica del voltaje (V) versus el Tiempo (ms) obtenido en pruebas de 90 ppm. -----	39
<b>Figura 14.</b> Concentración teórica calculada por reacción química vs concentración experimental obtenida mediante el sensor calibrado (ambos en ppm). -----	41
<b>Figura 15.</b> Gráfica de Voltaje (V) versus tiempo (ms) obtenido en la prueba de pirólisis de llanta. -----	42

## LISTA DE TABLAS

Pág.

<b>Tabla 1.</b> Composición del gas de pirólisis de llanta en un reactor de lecho fluidizado (FBR). .....	19
<b>Tabla 2.</b> Efectos a la salud por exposición a H <sub>2</sub> S. ....	20
<b>Tabla 3.</b> Resultados de la calibración con H <sub>2</sub> S en el sensor comercial. ....	35
<b>Tabla 4.</b> Cantidad de sulfuro de hierro y HCl utilizadas en la reacción.....	37
Tabla 5. Tiempo promedio de respuesta del sensor MQ136. ....	40
<b>Tabla 6.</b> Error del sensor y desviación estándar para cada concentración. ....	41
<b>Tabla 7.</b> Calibración y validación del sensor infrarrojo. ....	44

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Código Arduino 1.0.6. ....	50
ANEXO B. Ficha seguridad sensor MQ136. ....	52
ANEXO C. Resultados DRX. ....	56
ANEXO D. Resultados TGA.....	58
ANEXO E. Análisis detallado del diseño y montaje del sensor MQ. ....	60
ANEXO F. Bitácora experimental.....	63
ANEXO G. Balance estequiométrico. ....	64
ANEXO H. Funcionamiento del sensor infrarrojo.....	68

## RESUMEN

**TÍTULO:** “IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR PARA LA DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE H<sub>2</sub>S EN GASES DE PIRÓLISIS DE LLANTA”.\*

**AUTORES:** RODRIGUEZ ABAUNZA, Cesar Augusto  
RUMBO ARIAS, Jamel Eduardo\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Sensor, Ácido Sulfhídrico, Pirólisis, Calibración, Validación, Arduino, Concentraciones H<sub>2</sub>S.

**DESCRIPCIÓN:** El objetivo de este proyecto era Implementar un sensor de detección de H<sub>2</sub>S que permitiera la cuantificación de este gas en las corrientes gaseosas generadas en el proceso de pirólisis de llanta usada; para esto se tuvieron en cuenta dos tipos de sensores, infrarrojo y electroquímico. Lo que se hizo con estos sensores fue una validación que se llevó a cabo a través de una reacción química entre FeS y HCl para la producción del H<sub>2</sub>S, que para el caso del sensor infrarrojo, proveniente de la universidad de los Andes, no arrojó resultados coherentes, y posterior se validó el sensor electroquímico, con el fin de analizar su comportamiento y comprobar su eficacia, la calibración se realizó a través de el CDT de Gas de la Universidad Industrial de Santander, con botellas patrones estandarizadas. Con los resultados obtenidos en el CDT se construyó una curva de calibración de voltaje contra concentración de H<sub>2</sub>S y de acuerdo a el comportamiento de estas gráficas, se pudo comprobar que los resultados que arroja el sensor electroquímico si son coherentes y por lo tanto se puede utilizar para implementarlo en el proceso de pirólisis de llanta usada y puede llegar a ser una herramienta de control muy efectiva para ayudar a reducir impactos ambientales.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director. Debora Alcida Nabarlatz, PhD. Codirector. Paola Maradei, PhD.

## ABSTRACT

**TITLE:** "IMPLEMENTATION OF A SENSOR FOR DETECTION AND QUANTIFICATION OF PYROLYSIS GASES H<sub>2</sub>S IN TIRE".\*

**AUTHORS:** RODRIGUEZ ABAUNZA, Cesar Augusto  
RUMBO ARIAS, Jamel Eduardo\*\*

**KEYWORDS:** Sensor, hydrogen sulfide, Pyrolysis, calibration, validation, Arduino, H<sub>2</sub>S concentrations.

**DESCRIPTION:** The objective of this project was Implement H<sub>2</sub>S detection sensor that allows the quantification of this gas in the gas streams generated in the pyrolysis of used tire; for this two types of sensors, infrared and electrochemical taken into account. What was done with these sensors was a validation that was performed through a chemical reaction between FeS and HCl for the production of H<sub>2</sub>S, which in the case of infrared sensor, from the University of the Andes, I do not throw results consistent, and later the electrochemical sensor was validated, in order to analyze their behavior and verify their effectiveness, calibration is performed dare CDT Gas Industrial University of Santander, with bottles standardized patterns. With the results of the CDT a calibration curve voltage built against concentration of H<sub>2</sub>S and according to the behavior of these graphs, it was found that the results shown by the electrochemical sensor if they are consistent and therefore I could use to implement it in the process of pyrolysis of used tire and can become a very effective tool of control to help reduce environmental impacts.

---

\* Degree Project

\*\* Faculty of physicochemical Engineering, School of Chemical Engineering, Director. Debora Alcida Nabarlantz, PhD. Codirector. Paola Maradei, PhD.

## INTRODUCCIÓN

Más de 2,7 millones de toneladas de residuos reciclables en forma de neumáticos de desecho se generan cada año en la Unión Europea (UE). Los compuestos más utilizados para la elaboración de los neumáticos son el copolímero de estireno-butadieno (SBR), caucho natural y el polibutadieno. Cabe destacar que todos los materiales utilizados son 100% reciclables. Los actuales métodos de eliminación de las llantas de carros son: disposición final en basureros, recuperación de energía, exportación, recauchutado y su reutilización en productos de bajo valor como superficies deportivas, barreras acústicas y materiales para techos. Aunque se ha hecho un gran empeño para promover el aprovechamiento de los desechos en los últimos años, los esfuerzos deben intensificarse inevitablemente en el futuro, debido al aumento de la presión pública y política para una legislación más exigente, tal como la Directiva sobre los vertederos europeos que prohíbe estrictamente disponer estos materiales contaminantes en los sumideros.<sup>[16]</sup> Se estima que en Colombia se desechan anualmente 61 mil toneladas de llantas<sup>[13]</sup>; cifra que aumenta aceleradamente por lo que la disposición final de las llantas necesita urgentemente una reglamentación adecuada que comprometa a los grandes productores en el país en su recolección y su debido tratamiento. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, mediante la resolución No. 1457 (del 29 de julio, 2010) establece los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y obliga a los productores a realizar todas las acciones pertinentes para recolectarlas, transportarlas y tratarlas adecuadamente una vez su ciclo de uso ha finalizado y salgan de circulación.

El caucho utilizado en neumáticos tiene un elevado poder calorífico y se puede utilizar como combustible. En este sentido, el proceso de pirólisis desempeña un papel importante ya que permite la descomposición de las llantas de desecho en aceite pirolítico, char y una mezcla de gases. Los productos obtenidos de la

pirolisis tienen un alto valor agregado en el mercado, por lo que esta podría ser una posible alternativa para el tratamiento de esos residuos, pero pueden surgir algunos problemas debido a la emisión de compuestos y metales peligrosos. Entre ellos está el gas sulfuro de hidrógeno o  $H_2S$  el cual es un gas incoloro, inflamable, muy contaminante y extremadamente peligroso, derivado de la pirolisis y resultante de la concentración de azufre utilizado en el proceso de vulcanización del caucho. Sus efectos en la salud de las personas varían dependiendo del nivel de concentración y duración de exposición al gas. Pueden ir desde irritación en los ojos y náuseas a bajas concentraciones y en altas concentraciones puede llegar a provocar un estado de shock y la muerte. <sup>[3]</sup>

Actualmente hay varios métodos para la detección de este gas, el principal es el de cromatografía de gases y los otros métodos son herramientas o dispositivos de análisis experimental. Sin embargo, estos dispositivos requieren tomar una muestra del gas y ponerla en un instrumento de análisis mediante una sonda donde es comparada con varios estándares para determinar la concentración del sulfuro de hidrógeno. Desafortunadamente, estos métodos pueden no revelar la concentración real de  $H_2S$  en el ambiente <sup>[1]</sup>, además el costo de estos equipos, la dificultad en el traslado, su complicada interpretación y su tardanza en responder motivan a nuevas alternativas. En la actualidad se busca tener un dispositivo de medición de gas que permita un análisis continuo, que tenga buena sensibilidad, selectividad, respuesta rápida, mantenimiento y fácil manejo. En este proyecto se diseñó e implementa un sistema de detección de gas  $H_2S$  en un reactor para la pirólisis de llanta, a través de la implementación de un sensor comercial MQ-136, el cual genera una señal analógica que es leída a través de un Sistema Arduino 1.0.6. El sensor se validó utilizando una reacción química de sulfuro de hierro (II) con ácido clorhídrico para producir distintos puntos de concentración del gas  $H_2S$ . El sensor se calibró con botellas patrón con medidas estandarizadas del gas  $H_2S$ . Por último, el sensor se utilizó para calcular la concentración de  $H_2S$  en el flujo de emisión de gases al medio ambiente luego del proceso de pirólisis de llantas.

## 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 PIRÓLISIS

El proceso de pirólisis consiste en descomponer la llanta usando calentamiento a temperaturas que oscilan entre 300 y 700°C, en ausencia de oxígeno, utilizando un gas inerte para el arrastre de los gases generados; comúnmente nitrógeno o helio. En este proceso, la materia sufre degradación térmica produciendo una descomposición de los elementos orgánicos volatilizables generando productos como gases, líquidos combustibles y componentes inorgánicos no volátiles. El líquido obtenido es una mezcla de hidrocarburos aromáticos, olefinas y parafinas con alto poder calorífico (42-44 MJ/kg) que pueden usarse directamente como combustibles o ser usado para obtener otros productos derivados de interés en la industria petroquímica. Los gases son combustibles de alto poder calorífico y pueden ser reutilizables en el mismo proceso. El residuo sólido (char) es un candidato potencial como negro de humo para la elaboración de nuevas llantas, o como precursor en la fabricación de carbón activado usado generalmente como absorbente en la industria del saneamiento de aguas y potabilización de aguas, eliminando contaminantes como metales pesados, componentes orgánicos y colorantes, entre otros. <sup>[11,15]</sup>

En la mezcla de gases producto del proceso de pirólisis se detectaron los siguientes: metano, etano, etileno, propeno, sulfano, nitrógeno, hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxígeno. Dichos gases se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Composición del gas de pirólisis de llanta en un reactor de lecho fluidizado (FBR).<sup>[6]</sup>

<b>Compuesto</b>	<b>% p/p</b>
<b>Metano</b>	7.64
<b>Etano</b>	0.13
<b>Etileno</b>	4.25
<b>Propano</b>	Nd
<b>Propileno</b>	0.03
<b>Acetileno</b>	Nd
<b>Butileno</b>	0.01
<b>Butano</b>	0.37
<b>Pentano</b>	0.05
<b>Benzeno</b>	8.68
<b>Tolueno</b>	4.80
<b>Xileno + Estireno</b>	0.37
<b>Hidrogeno</b>	0.74
<b>CO</b>	1.48
<b>CO<sub>2</sub></b>	2.85
<b>H<sub>2</sub>S</b>	0.34
<b>Butadieno</b>	0.01
<b>Total de gas</b>	31.75

## 1.2 NORMATIVA

El sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) es un gas tóxico, donde el peligro para la salud depende tanto de la duración de la exposición, como de la concentración del mismo. Este gas es irritante para los pulmones y en bajas concentraciones irrita los ojos y el tracto respiratorio. Los umbrales de concentración para efectos en la salud se describen en la tabla siguiente.

**Tabla 2.** Efectos a la salud por exposición a H<sub>2</sub>S. <sup>[2]</sup>

Límite de exposición (ppm)	Efectos a la salud
<b>0.008-0.2</b>	Umbral respiratorio- se detecta olor a huevo podrido
<b>20</b>	Olor a fuga de gas Tolerancia durante algunas horas sin daño
<b>20-50</b>	Irritación ocular
<b>50</b>	Exposición prolongada puede causar faringitis o bronquitis
<b>60</b>	Exposición prolongada puede causar conjuntivitis y dolor de ojos
<b>150+</b>	Irritación del tracto respiratorio superior Sensación de pérdida del olfato
<b>250</b>	Edema pulmonar con riesgo de muerte
<b>500</b>	Muy peligroso, se debe evacuar mucho antes de llegar a este nivel
<b>1000</b>	Pérdida de conciencia
<b>1000-2000</b>	Intoxicación aguda: los síntomas incluyen respiración agitada, angustia, náusea y vómito. Puede ser rápidamente seguido de pérdida de conciencia, coma y paro respiratorio
<b>2000+</b>	Pérdida inmediata de conciencia y alta probabilidad de muerte

Los niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales y umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos se rigen según normatividad Colombiana por la Resolución 601 del Ministerio de

Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, donde los umbrales para el H<sub>2</sub>S son de 0.005 ppm y 7.0 µg/m<sup>3</sup> respectivamente. <sup>[14]</sup>

### 1.3 TIPOS DE SENSORES Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los datos de entrada y de realimentación de los sistemas de control se introducen mediante unos dispositivos, normalmente electrónicos, que se denominan sensores, los cuales se encargan de traducir la información que le llega del exterior en un impulso eléctrico, el cual puede ser analizado y procesado por la unidad de control del sistema <sup>[17]</sup>. Para el proyecto se utilizaron dos tipos de sensores que se describen a continuación:

**1.3.1 Infrarrojo.** Hay dos formas de detectar un gas. La primera es cuando un haz de luz interactúa con el gas, entonces una parte de la energía que tiene la misma frecuencia natural de las moléculas del gas es absorbida, mientras el resto se transmite. La segunda forma es cuando la radiación absorbida a cierta longitud de onda por las moléculas del gas, causa una disminución en la intensidad de la fuente original, y esta reducción puede ser traducida como una señal. <sup>[7]</sup>

**1.3.2 Electroquímicos.** El gas se propaga hacia el sensor a través de una membrana hasta llegar al electrodo de trabajo. Cuando el gas alcanza este electrodo, se produce una reacción electroquímica: una oxidación o una reducción, según el tipo de gas, generando una señal. <sup>[12]</sup> Un ejemplo de estos son los sensores de gas MQ los cuales utilizan un pequeño calentador en el interior con un sensor electroquímico, cuya temperatura varía dependiendo el nivel de concentración del gas. <sup>[10]</sup>

## 1.4 SISTEMA DE SENSOR A IMPLEMENTAR

**1.4.1 Diseño de dispositivo.** El sistema de sensor a implementar está basado en un sensor comercial estándar para la detección de H<sub>2</sub>S, y una plataforma de comunicación basada en el Sistema Arduino. El diseño del dispositivo tiene cuatro componentes principales los cuales son:

- **Protoboard:** En esta placa se realiza el montaje del sensor y los cables que se conectan al Sistema Arduino Mega.
- **Arduino Mega:** es una placa electrónica basada en el ATmega1280 la cual es un chip micro-controlador creado por una compañía de semiconductores, fundada en 1984 llamada Atmel. Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (14 se pueden utilizar como salidas), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertas seriales), un oscilador de cristal de 16 MHz , una conexión USB, un conector de alimentación, un cabezal, y un botón de reinicio.<sup>[4]</sup>
- **Arduino 1.0.6:** Es una plataforma de computación física de código abierto basado en una placa electrónica simple, y un entorno de desarrollo para escribir software para la placa. Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos, teniendo las entradas de una variedad de interruptores o sensores, y el control de una variedad de luces, motores, y otras salidas físicas. Arduino puede comunicarse con el software que se ejecuta en el ordenador (por ejemplo, Flash, Processing, MaxMSP.). El lenguaje de programación de Arduino es una implementación de cableado a una plataforma similar computación física, que se basa en el entorno de programación multimedia de procesamiento,<sup>[5]</sup> por último, se utiliza el Hyperterminal para la toma de datos. Para ver el código utilizado para el presente trabajo ver el Anexo 1 (CODIGO ARDUINO 1.0.6).

- Sensor MQ 136: Tal como se muestra en su ficha técnica (Anexo 2 FICHA SEGURIDAD SENSOR MQ 136) es un sistema de detección de H<sub>2</sub>S formado por el sensor en sí y una placa, la cual se conecta a la protoboard. El sensor está conformado por un material sensitivo SnO<sub>2</sub> el cual con el aire limpio tiene una menor conductividad, pero cuando existe el gas objetivo H<sub>2</sub>S la conductividad del sensor es mayor.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Implementar un sensor de detección de H<sub>2</sub>S que permita la cuantificación de este gas en las corrientes gaseosas generadas en el proceso de pirólisis de llanta usada.

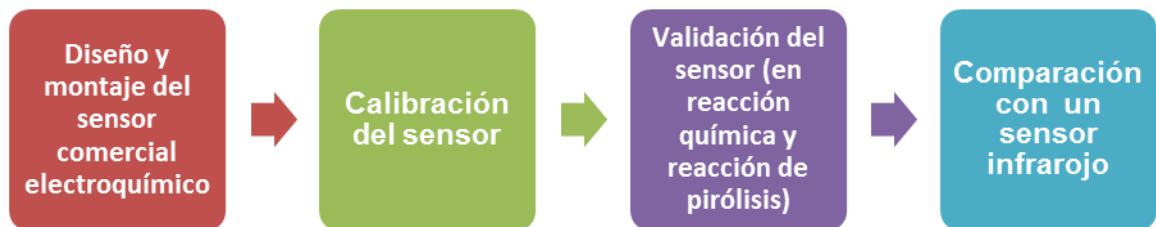
### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar e implementar un sistema de detección de H<sub>2</sub>S en las corrientes gaseosas producto de la pirólisis de llanta.
- Calibrar y validar el sistema de detección de H<sub>2</sub>S, permitiendo obtener confiabilidad en el proceso.
- Evaluar la concentración de H<sub>2</sub>S en una corriente gaseosa obtenida a partir de la reacción de pirólisis real.

### 3. METODOLOGÍA

En la figura 1 se muestra la metodología desarrollada para cumplir con los objetivos del proyecto.

**Figura 1.** Metodología comparación con un sensor infrarrojo.

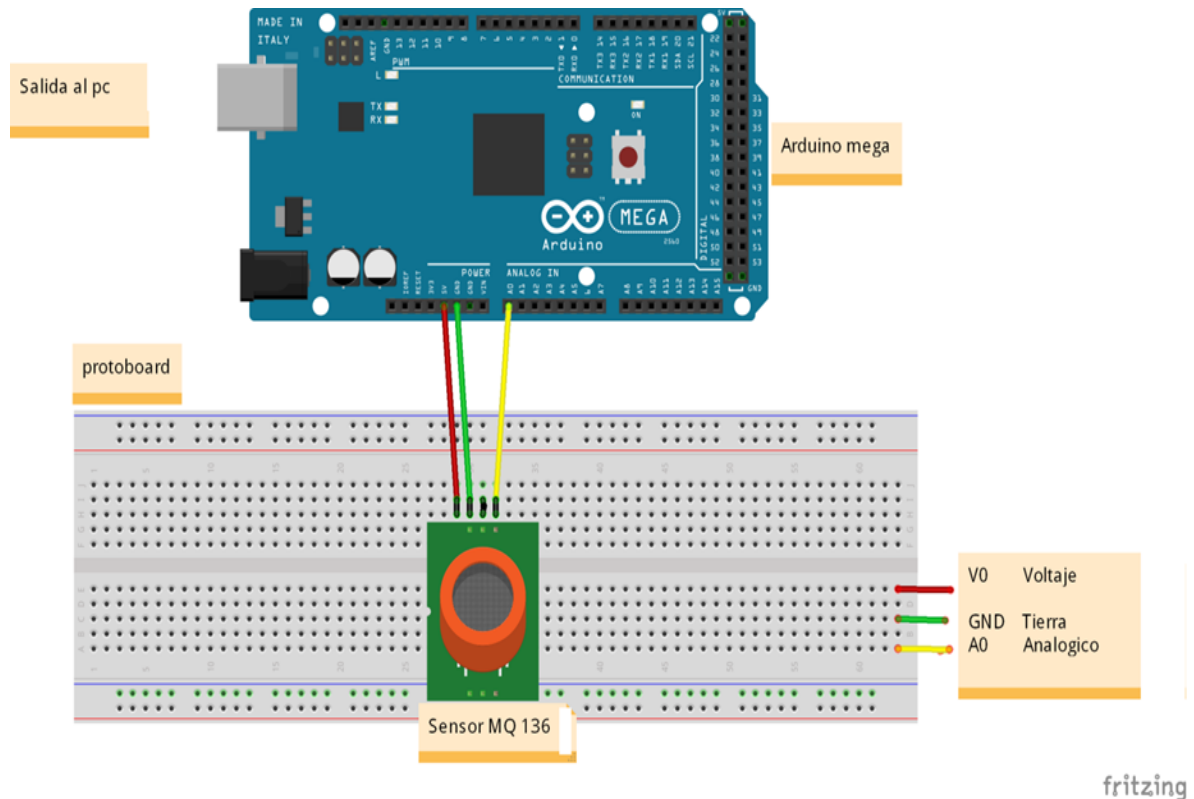


#### 3.1 DISEÑO Y MONTAJE DEL SENSOR COMERCIAL ELECTROQUÍMICO

Para el montaje del sensor comercial electroquímico se diseñó un dispositivo utilizando una protoboard, en la cual se realizó el montaje del sensor MQ 136 acoplado el mismo con cables UTP para protoboard (ver Figura 2). El sensor se acopló al Arduino Mega 2560 R3 Atmega2560-16U2 de la siguiente manera: el  $V_0$  del sensor con la señal digital (5V), el  $A_0$  del sensor con el  $A_0$  (señal analógica), y el G del sensor con el GND (tierra) del Arduino Mega. Después de acoplar el sistema, el mismo se conecta al PC donde se pone a correr el código elaborado en el programa Arduino 1.0.6 (Ver Anexo 1 CODIGO ARDUINO 1.0.6). Para la recepción de los datos esto se complementó con el programa Hyperterminal el cual enlazó los datos para que estos fueran registrados en archivo tipo block de notas para así facilitar el almacenamiento y posterior procesamiento de los

mismos. Posteriormente los datos fueron llevados a Excel para ser tabulados y graficados.

**Figura 2.** Montaje sensor MQ.

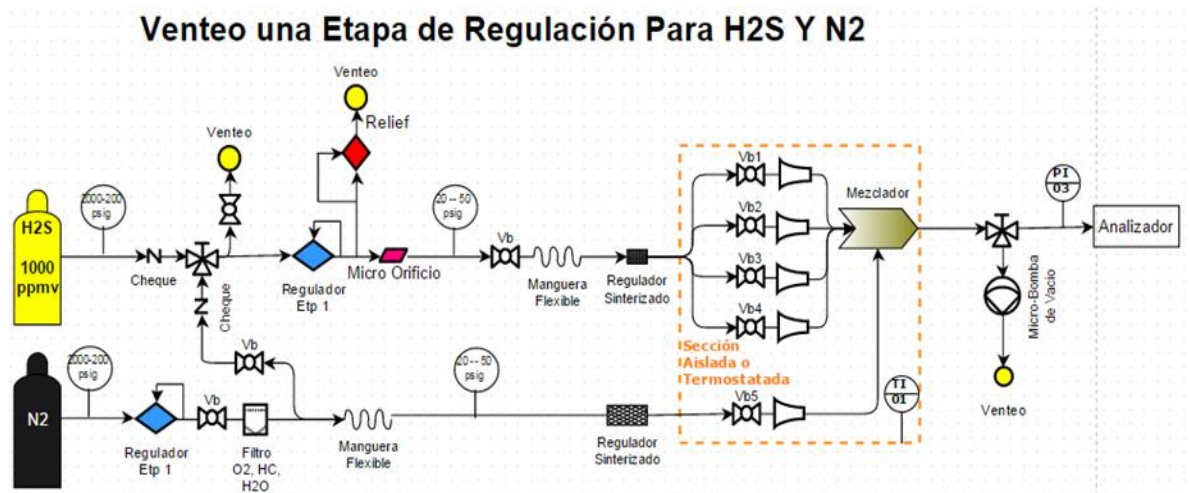


### 3.2 CALIBRACIÓN DEL SENSOR

La calibración del sensor se realizó en la Corporación CDT de Gas, quienes tienen un dispositivo como se muestra en la figura 3, el cual permite pasar diferentes concentraciones de  $H_2S$  en gas a través de una tubería constituida por polímero polieteracetona (PEEK) y etileno-tetrafluoroetileno (ETFE), los cuales aseguran que el transporte de gas fuera completo y no se presenten pérdidas por difusión,

acumulación, absorción, etc. Por otra parte, se controlan variables tales como la presión a través de un regulador de referencia AIR LIQUIDE. Los datos de voltaje (v) fueron tomados en un sensor electroquímico comprado por el CDT de gas a PEMTECH.

**Figura 3.** Sistema para la calibración del sensor electroquímico en el CDT de gas.



Para la toma de datos y validación del sensor se realizó el acople del sensor MQ136 al sistema, utilizando una T de acero recubierta con sulfínert. Esta es una técnica de pasivación que consiste en crear una capa de sílice inerte en la superficie del material para evitar los fenómenos descritos anteriormente del gas a la salida del proceso. Al inicio del proceso, se efectúa un protocolo de purga durante 3 minutos el cual consiste en dejar pasar un flujo de nitrógeno suministrado a través de una bala para eliminar cualquier residuo de gas.

Las concentraciones de H<sub>2</sub>S en el gas fueron suministradas por una botella patrón conteniendo 11 ppm de H<sub>2</sub>S comprada a DGC PARTNERSHIP. Para la obtención de las concentraciones de 3 y 22 ppm se realizó el montaje de una nueva botella

patrón conteniendo 957 ppm de H<sub>2</sub>S y diluyendo el contenido con la ayuda de unos capilares hasta llegar a la concentración deseada. Los datos leídos por el sensor para cada concentración se registraron durante tres minutos en el programa Arduino 1.0.6. Para cada experimento se realizó su respectiva réplica. Los datos obtenidos en Hyperterminal fueron llevados a Excel donde se obtuvo una curva de calibración en voltaje versus concentración de H<sub>2</sub>S.

Al realizar el calibrado, el H<sub>2</sub>S se incorpora al dispositivo en diferentes concentraciones, con lo que se obtiene una relación lineal entre el voltaje y la concentración del gas incorporado. A través del cálculo de la conversión de la señal analógica que arroja el programa Arduino 1.0.6 a una señal digital que está en voltios. Esto se hace con una relación 2<sup>n</sup> la cual para un Arduino Mega es igual a 2<sup>10</sup> = 1024, con este dato se hace la relación:

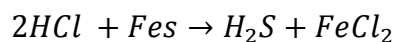
$$0 \rightarrow 1024$$

$$0V \rightarrow 5V$$

### 3.3 VALIDACIÓN DEL SENSOR

La validación del sensor se realizó en dos procesos diferentes tal como se describe a continuación.

**3.3.1 Reacción química.** La producción de H<sub>2</sub>S se realizó mediante la siguiente reacción:

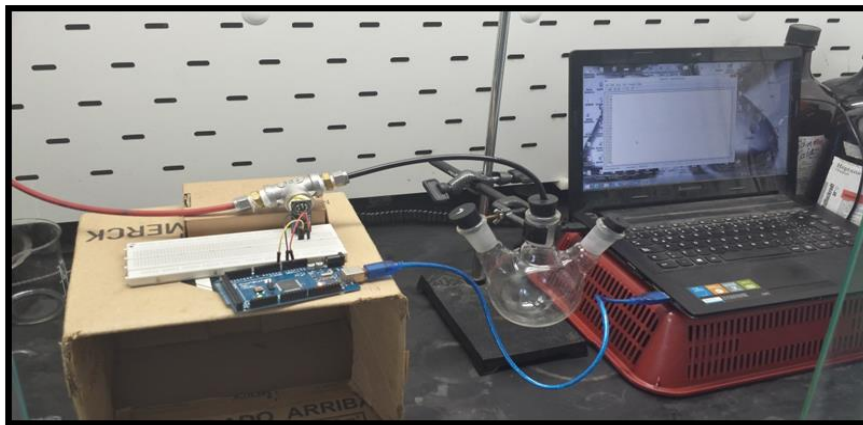


Se utilizó HCl marca Aldrich al 37% p/p y Sulfuro ferroso II con pureza 99% p/p. Para comprobar la pureza del sulfuro ferroso (FeS) se realizaron dos pruebas: una prueba de difracción de rayos X (DRX), y una prueba mediante balanza termo gravimétrica (TGA) (Anexo 3 RESULTADOS DRX y Anexo 4 RESULTADOS TGA)

Para cada una de las concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$  deseadas, se determinó la cantidad de reactivo limitante y se pesaron las cantidades necesarias de cada reactivo. La reacción se realizó en un balón de tres bocas de 500 mL, donde se deposita el FeS y se le agrega HCl. El  $\text{H}_2\text{S}$  producido se transporta a través de una manguera de poliuretano con revestimiento en acero inoxidable, hasta llegar a una T de acero inoxidable donde se encontraba instalado el sensor MQ136. Todo el proceso se realizó en batch.

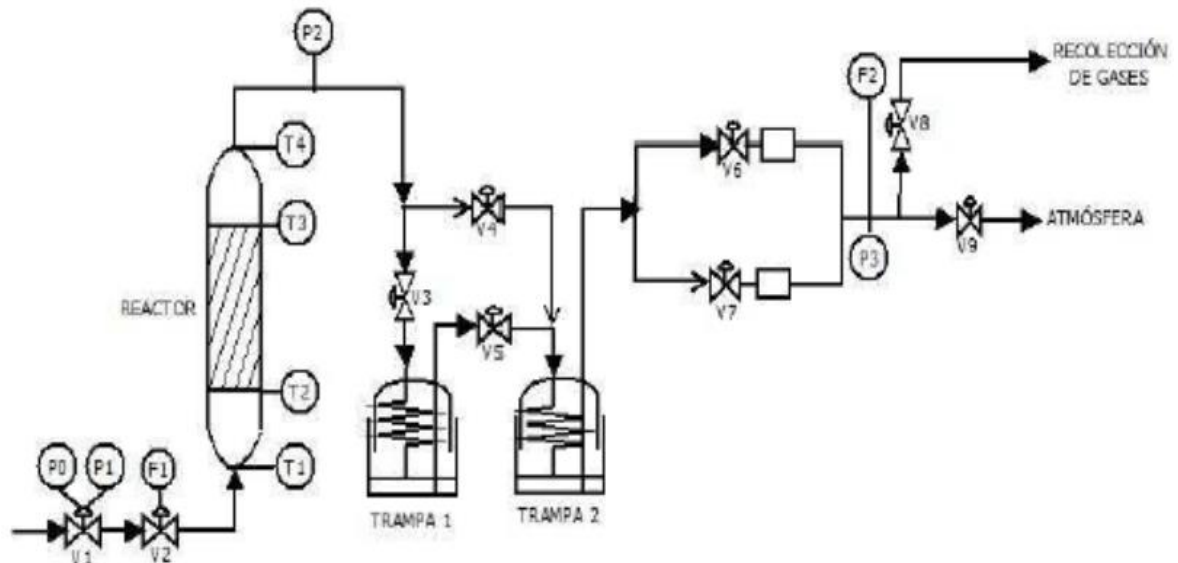
Se trabajó con cinco concentraciones 10, 15, 20, 50 y 90 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$ , cada uno con su respectiva réplica. Cada prueba se realizó durante un tiempo de dieciséis minutos, en los cuales la reacción ya era completa. Todos los datos se registraron en el programa Arduino 1.0.6 con la ayuda de Hyperterminal. Los datos obtenidos fueron exportados a Excel. Estos datos fueron comparados y validados con la curva de calibración obtenida en la etapa anterior. Para ver un análisis más detallado del montaje y diseño ver Figura 4 y los respectivos detalles en el Anexo 5 (ANÁLISIS DETALLADO DEL DISEÑO Y MONTAJE DEL SENSOR MQ)

**Figura 4.** Montaje del sensor MQ 136 en el sistema de validación con reacción química.



**3.3.2 Prueba de Pirólisis.** Para esta prueba, se realizó la conexión del sensor de  $H_2S$  al reactor de pirólisis ya existente en el grupo INTERFASE. Para el desarrollo de la pirólisis se contó con una unidad piloto de laboratorio tal como lo muestra la Figura 5. Esta cuenta con un reactor tubular vertical elaborado en acero inoxidable 304, con una longitud de 30,5 cm y diámetros externo e interno de 3 cm y 1,8 cm, respectivamente. El calentamiento del reactor se realiza a partir de un horno tubular que cuenta con una potencia máxima de 2400W a 220V, y maneja rampas de calentamiento en promedio de 25-30°C/min. La unidad piloto cuenta con dos medidores de flujo de gases (un rotámetro para monitoreo del flujo de nitrógeno de entrada y uno volumétrico digital para el monitoreo del flujo de gas de síntesis), un medidor de presión, cinco medidores de temperatura, cuatro de ellos en el reactor y uno en la línea de transferencia entre la zona de reacción y la de condensación, esta última consta de dos trampas de enfriamiento.

**Figura 5.** Unidad piloto de pirólisis térmica y catalítica de llantas usadas.



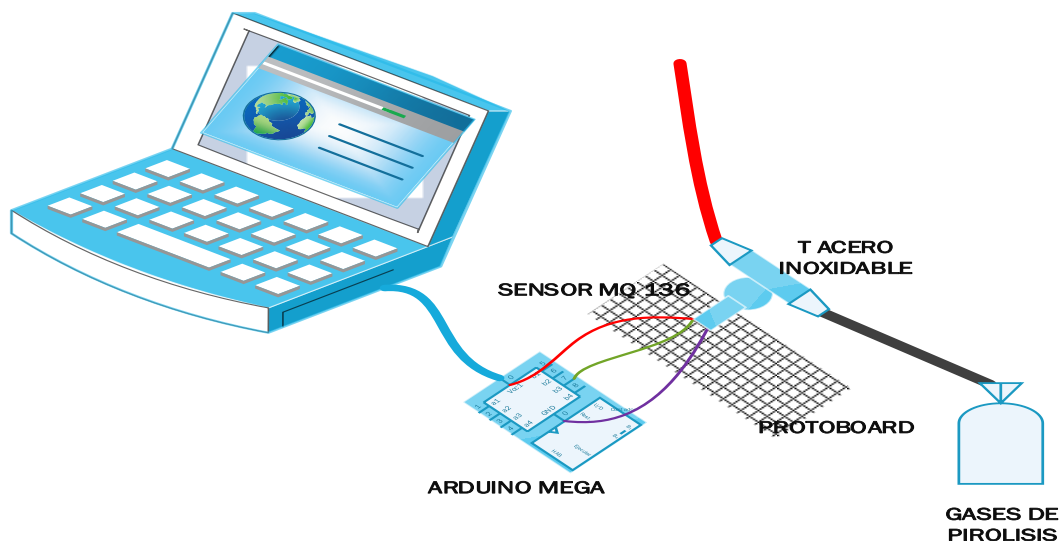
El gas inerte ( $N_2$ ) es alimentado por la parte inferior del reactor a una presión de 1 bar, con un flujo estándar de 155 Nml/min. La sección de reacción cuenta con dos

zonas de calentamiento independientes: durante la prueba de pirólisis térmica, la muestra de caucho, que tenía un peso de 9,740 g, fue ubicada en la zona superior mientras que en la zona inferior se agregó alúmina ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), esto con el fin de garantizar la salida rápida de los volátiles de la zona caliente y evitar reacciones de craqueo.<sup>[8]</sup>

En el Anexo 6 (BITACORA EXPERIMENTAL) se muestra un análisis más detallado y los respectivos cálculos realizados durante la prueba de pirólisis.

Para la prueba de pirólisis se almacenó el gas de salida del proceso en unas bolsas de recolección. Después de recolectar el gas se llevaron las bolsas a la cámara de extracción y se pasó cada una de ella por el sensor con la ayuda de mangueras de poliuretano con revestimiento interno en acero. Todo fue registrado por el programa Arduino 1.0.6 con la ayuda de Hyperterminal. Los datos obtenidos fueron llevados a Excel donde se graficaron para analizar su comportamiento. Los detalles del proceso se pueden ver en la Figura 6.

**Figura 6.** Montaje del sensor MQ 136 para la evaluación de los gases de pirólisis.



### **3.4 COMPARACIÓN DEL SENSOR COMERCIAL ELECTROQUÍMICO CON SENSOR INFRARROJO**

En esta prueba se propuso comparar el sensor comercial electroquímico, con un sensor de infrarrojo desarrollado por la Universidad de los Andes para detectar H<sub>2</sub>S en gases de pirólisis. Este sensor fue desarrollado en el marco del proyecto “Desarrollo de un sensor para la detección y cuantificación de componentes azufrados presentes en efluentes gaseosos durante la pirólisis del caucho reciclado de llantas usadas”, financiado por la Universidad de los Andes en colaboración con la Universidad Industrial de Santander con el objetivo de utilizarlo e instalarlo en línea en el equipo piloto de pirólisis de llanta instalado en los laboratorios del grupo INTERFASE en el Edificio de Investigaciones de la Sede UIS Guatiguará. Las especificaciones completas del desarrollo del sensor, se pueden encontrar en el documento producto del proyecto de fin de carrera en Ingeniería Electrónica, realizado por María Camila Guachetá Buendía y dirigido por el Prof. Johann Osma de la Universidad de los Andes, titulado “Detección de gases mediante el espectro infrarrojo”.

El diseño del sensor infrarrojo está elaborado en una configuración base tipo cruz. Debido a la naturaleza química del H<sub>2</sub>S, se seleccionó como material base el acero inoxidable para la fabricación de las piezas que se encuentran en contacto directo con el gas. Los componentes restantes fueron manufacturados en acero común, para que el proceso de maquinado que involucra la fabricación de estos elementos sea más fácil.

Para el sistema de entrada y salida del gas, se usaron unas boquillas con rosca de ¼” NPT, (acrónimo del inglés National Pipe Thread, ‘rosca nacional de tubos’) para así mantener una unión estándar. También se usaron tres elementos principalmente para la detección del gas y estarán incorporados al montaje físico, que se describió en el párrafo anterior. El diodo emisor infrarrojo (LED-390-NS de

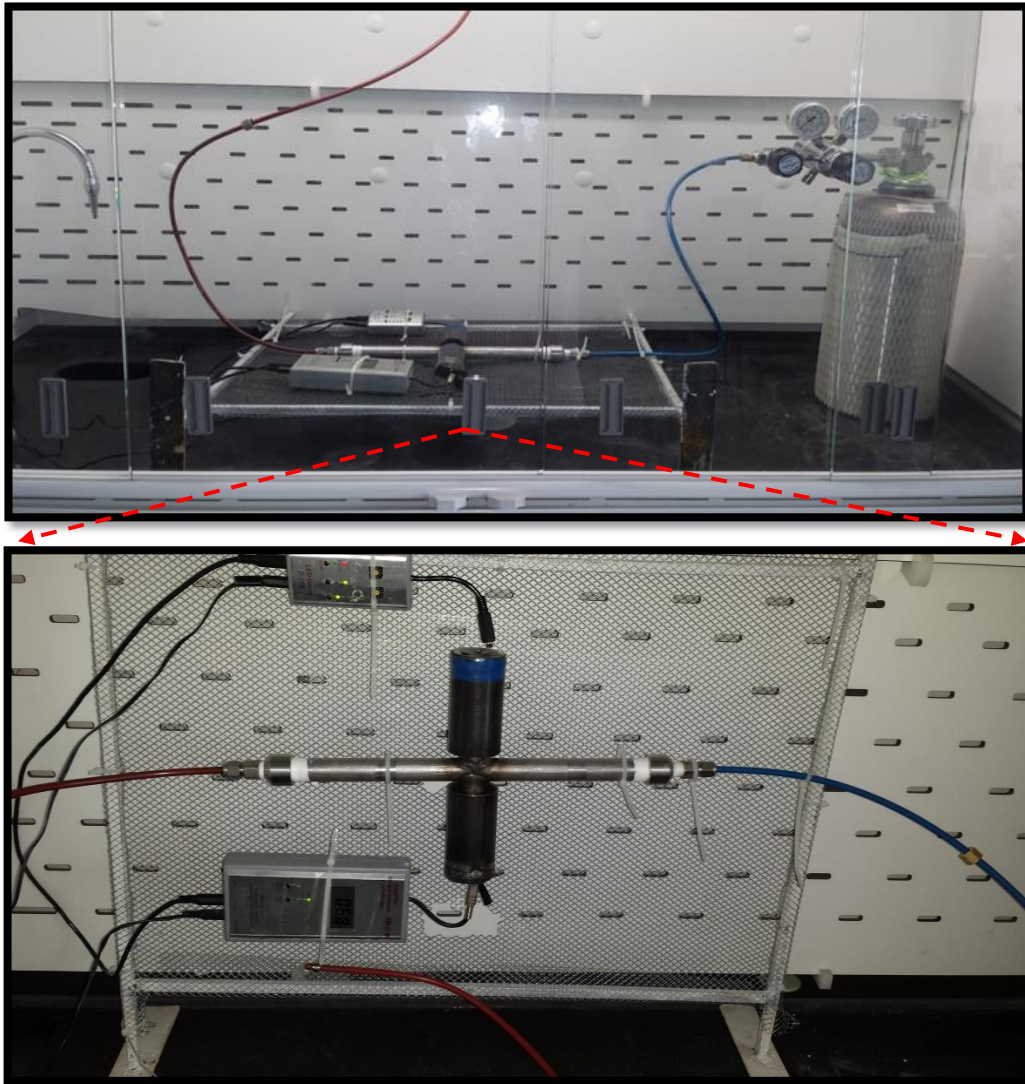
IBSG Company, St. Peterburg-Russia), es una fuente de radiación infrarroja, que posee un espectro de emisión entre 3.7 - 4.1  $\mu\text{m}$ , lo cual es ideal para la detección del  $\text{H}_2\text{S}$  a 3.8  $\mu\text{m}$ . El fotodiodo (PD48-03-WS-PR de IBSG Company, St. Peterburg-Russia), es un fotodetector de radiación infrarroja que posee una respuesta máxima para longitudes de onda entre 3 - 4.5  $\mu\text{m}$ . Las ventanas de silicio (WG80530-E de Thorlabs, United States), son elementos transparentes para la región infrarroja que comprende entre 3 – 5  $\mu\text{m}$ , su función es aislar el gas y proteger los LEDs de la característica corrosiva del  $\text{H}_2\text{S}$ .

Por otra parte, se usan dos dispositivos para el funcionamiento de los LEDs, y estos dispositivos se encuentran afuera del montaje. El controlador del LED emisor (D31-M de IBSG Company, St. Peterburg-Russia), es el encargado de proveer la alimentación y los pulsos de sincronización para el amplificador del fotodetector (PD-Amplifier). El PD-Amplifier (AM-07M de IBSG Company, St. Peterburg-Russia), cumple la función de convertir la fotocorriente del fotodetector en voltaje y realizar su correspondiente amplificación.<sup>[9]</sup> Para las pruebas con este sensor se utilizaron botellas patrón de concentración 5000 ppm, 10000 ppm y 20000 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$  (todas en balance nitrógeno) compradas a LINDE COLOMBIA S.A.

El montaje consiste en fijar el sensor a una grilla para su fácil manipulación y facilitar la conexión a las botellas a través de unas mangueras de poliuretano con revestimiento en acero inoxidable. A continuación se enciende el sensor para su estabilización durante 15 minutos y se procede a establecer la línea base presionando el botón ZERO. Posteriormente, la botella se abre para que el gas fluya a través del sensor. La presión de las botellas se controló con un regulador de presión de doble etapa, con cuerpo latón cromado, diafragma acero inoxidable y presión de salida: 0 – 50 psi, provisto por LINDE COLOMBIA S.A. Por último, los datos arrojados en la pantalla del sensor se registraron cada 10 segundos durante 5 minutos. Cabe resaltar que todos los procedimientos fueron realizados en una

cámara de extracción del laboratorio 306 de INTERFASE debido a la alta toxicidad del  $H_2S$ . Todo el proceso se muestra en la Figura 7.

**Figura 7.** Montaje del sensor infrarrojo.



## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 CALIBRACIÓN DEL SENSOR EN EL CDT DE GAS.

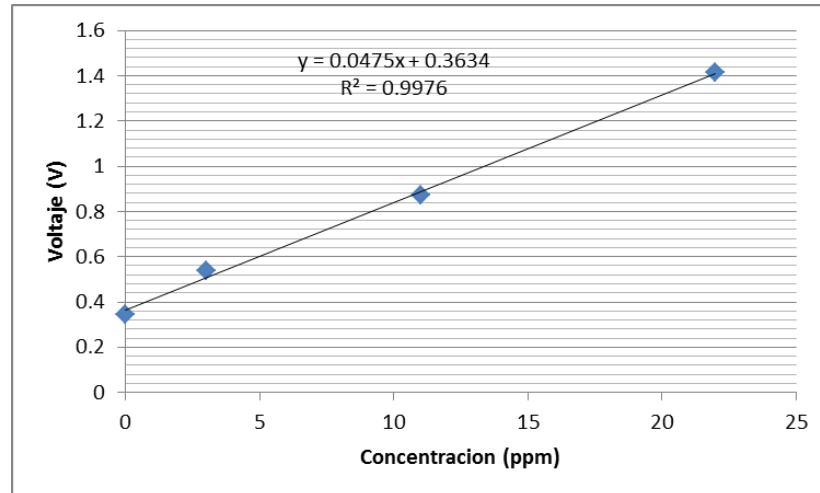
Los datos obtenidos para la calibración del sensor comercial obtenidos mediante los experimentos en el CDT de Gas se muestran a continuación en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Resultados de la calibración con H<sub>2</sub>S en el sensor comercial.

Concentración H <sub>2</sub> S (ppm)	Señal analógica	Voltaje (V)
0	70.52	0.34
3	110.02	0.53
11	178.22	0.87
22	289.33	1.41

En la figura 8 se muestra la curva de calibración obtenida, la cual tiene un comportamiento lineal de la forma  $y = 0.0475x + 0.3634$ , con un  $R^2=0.9976$ , lo que indica que a medida que aumenta la concentración aumenta el voltaje de forma proporción lineal en el rango de muestreo seleccionado (3 – 22 ppm H<sub>2</sub>S). Se utilizó este rango de concentraciones porque el sistema disponible en el CDT de Gas no permite utilizar concentraciones mayores a 25 ppm. Asimismo, a pesar de que el sensor admite concentraciones hasta 100 ppm (tal como se evidencia en la hoja de especificaciones, ver Anexo 2 (FICHA SEGURIDAD SENSOR MQ 136) no fue posible calibrar el sensor en un rango mayor de concentraciones debido a que los puntos de mayor concentración de H<sub>2</sub>S (50 y 90ppm) se realizarán mediante análisis en cromatografía de gases, pero a la fecha no ha sido posible utilizar el equipo (disponible en el Laboratorio 305 sede UIS Guatiguará) dado que el mismo se encuentra en reparación.

**Figura 8.** Curva de calibración de H<sub>2</sub>S con respecto al voltaje para el sensor comercial.



Esta curva es de gran importancia ya que los datos obtenidos garantizan un alto porcentaje de confianza y certeza debido a que se utilizaron botellas patrones con concentraciones estandarizadas en un laboratorio especializado en metrología de gases, el cual cuenta con un sistema donde se controlan todas las variables y fenómenos que pueden alterar el proceso; además su principal función es ser un punto de referencia respecto cualquier validación que se quiera desarrollar. Se utilizaron concentraciones de 0 a 22 ppm debido a que el sistema de capilares está diseñado para el control de gas natural donde la concentración de H<sub>2</sub>S es baja y varía entre estos rangos.

## 4.2 VALIDACIÓN DEL SENSOR COMERCIAL

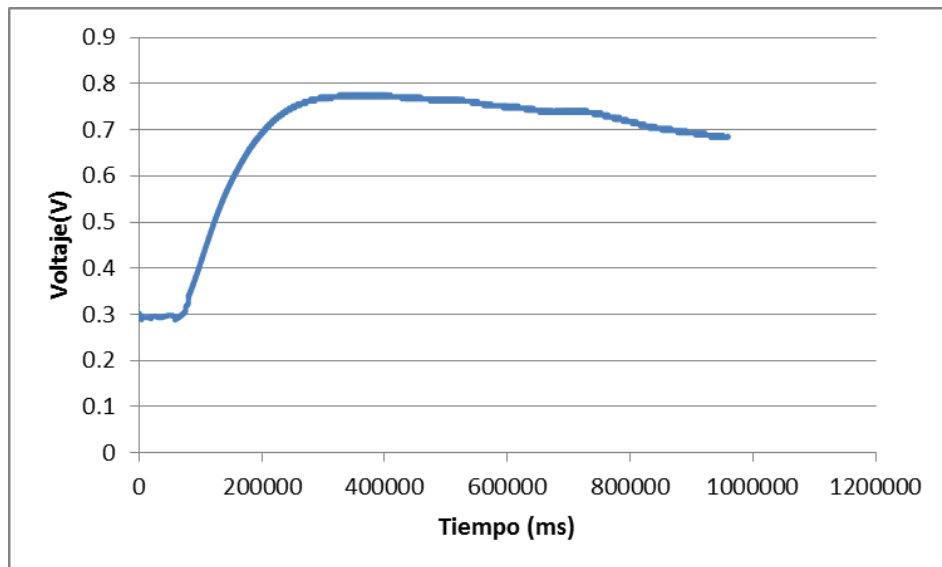
**4.2.1 Validación mediante reacción química.** Se realizó el balance estequiométrico para definir cuál es el reactivo límite y el reactivo en exceso y las diferentes cantidades de FeS y HCl necesarias para efectuar la reacción tal como

se evidencia en el Anexo 7(BALANCE ESTEQUIOMETRICO) La tabla 4 muestra las cantidades necesarias de FeS (reactivo límite) para la reacción.

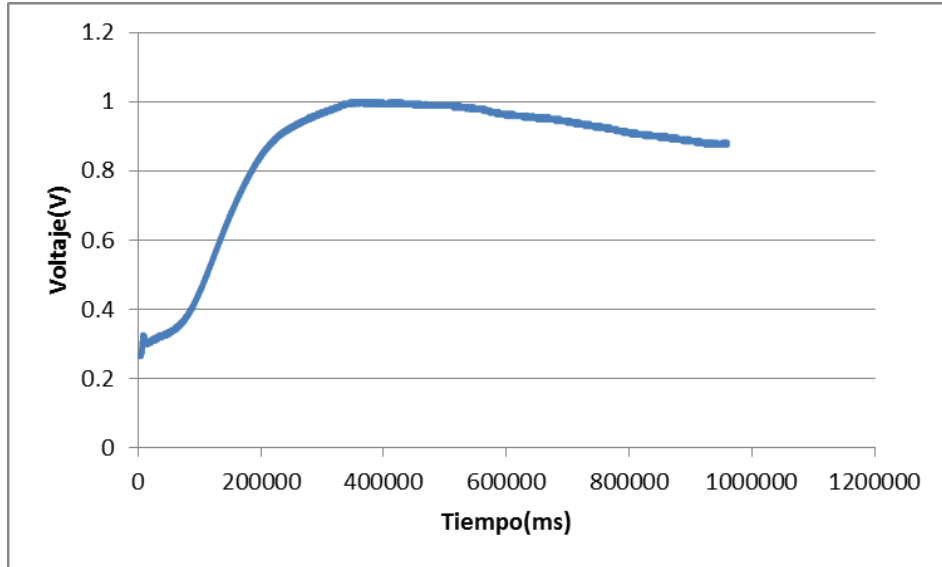
**Tabla 4.** Cantidad de sulfuro de hierro y HCl utilizadas en la reacción.

Concentración deseada de $H_2S$ en el gas (ppm)	Masa de FeS (g)	Volumen de HCl (ml)
10	0.0143	0.0283
15	0.0215	0.04
20	0.02867	0.053
50	0.0716	0.1336
90	0.1290	0.2408

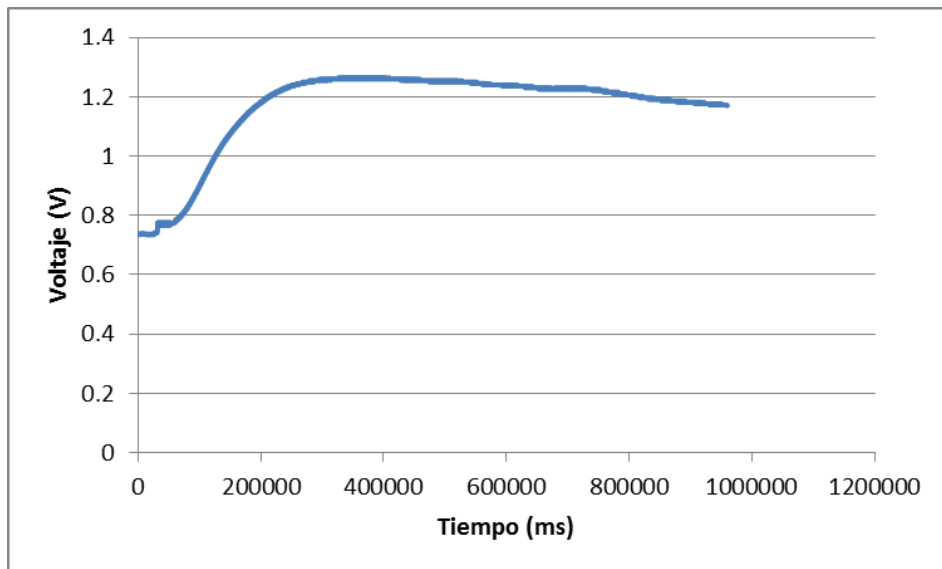
**Figura 9.** Grafica del voltaje (V) versus el Tiempo (ms) obtenido en pruebas de 10 ppm.



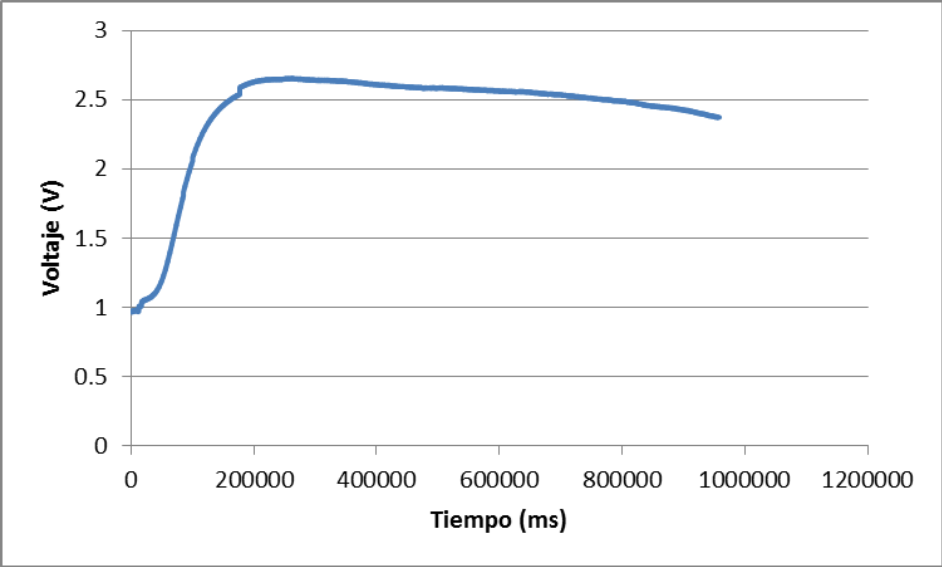
**Figura 10.** Grafica del voltaje (V) versus el Tiempo (ms) obtenido en pruebas de 15 ppm.



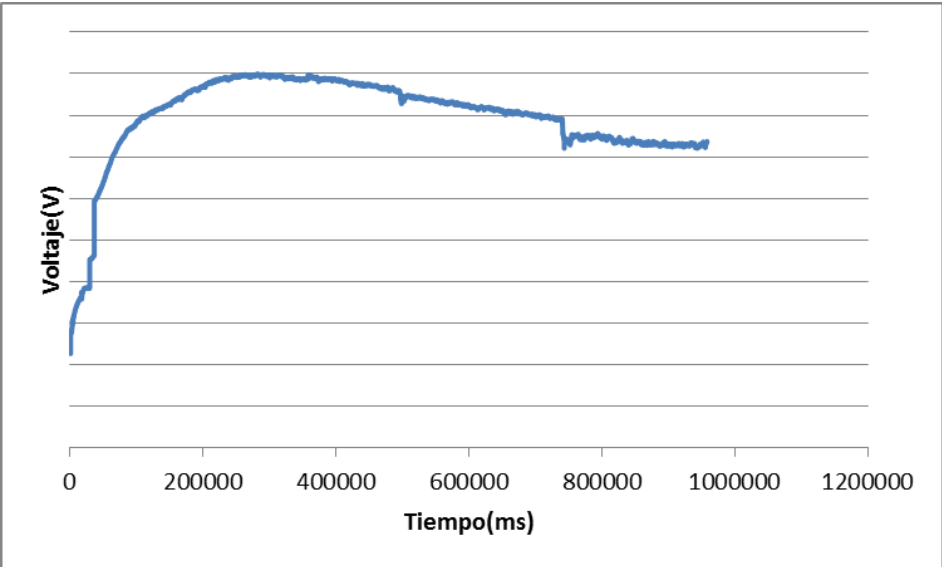
**Figura 11.** Grafica del voltaje (V) versus el Tiempo (ms) obtenido en pruebas de 20 ppm.



**Figura 12.** Grafica del voltaje (V) versus el Tiempo (ms) obtenido en pruebas de 50 ppm.



**Figura 13.** Grafica del voltaje (V) versus el Tiempo (ms) obtenido en pruebas de 90 ppm.



Para cada concentración (10, 15, 20, 50 y 90 ppm de H<sub>2</sub>S) se realizó una prueba con su respectiva réplica y se calculó un promedio entre las curvas para analizar su comportamiento, de modo de encontrar el punto donde se estabilizan los datos. En las figuras 9, 10, 11, 12 y 13 se muestra cada una de las gráficas promedio obtenida para cada una de las concentraciones realizadas.

Analizando el comportamiento en la zona más estable de cada una de las concentraciones se encontró el tiempo de respuesta para cada una de ellas tal como se muestra en la tabla 5.

**Tabla 5.** Tiempo promedio de respuesta del sensor MQ136.

Concentración (ppm)	Tiempo de respuesta del sensor MQ136 (min)
10	5.86
15	5.68
20	5.40
50	4.57
90	3.37

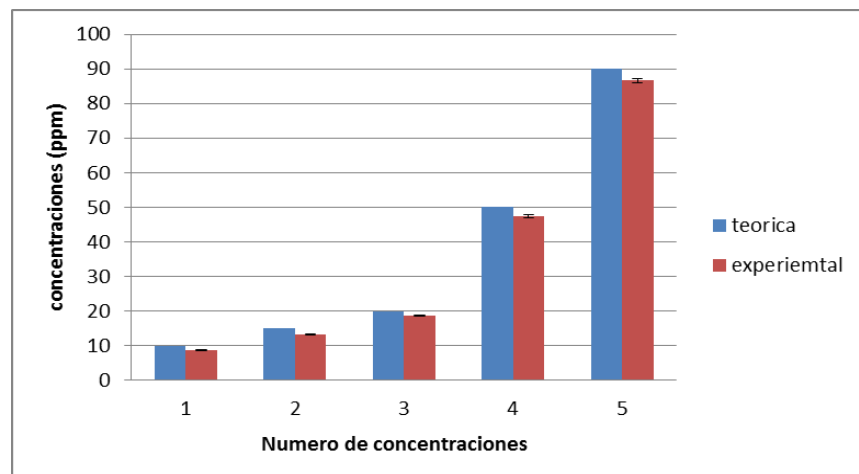
De los datos obtenidos podemos concluir que a medida que aumenta la concentración de H<sub>2</sub>S en el gas disminuye el tiempo de respuesta del sensor. El tiempo de estabilización y respuesta del sensor es razonable debido a que en este proceso no solamente hay que tener en cuenta el tiempo de estabilización del mismo, sino también la propia cinética de la reacción la cual hay que considerar mientras se logra la conversión total de los reactivos.

La señal del sensor se procesó y se cuantificó la concentración de H<sub>2</sub>S en ppm teniendo en cuenta la curva de calibración calculada anteriormente. Una vez se alcanza la estabilización del sensor, se calcula un promedio de cada uno de los datos presentes en la zona de estabilidad para cada una de las gráficas de concentración mencionadas anteriormente. Además se estimó el error del sensor teniendo en cuenta la ecuación  $\%Error = \frac{teorico-real}{teorico} \times 100$ . En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 6.** Error del sensor y desviación estándar para cada concentración.

Concentración teórica (ppm)	Voltaje (V)	Concentración experimental (ppm)	% Error	Desviación estándar
10	0.7725	8.7042	12.958	0.1401
15	0.9917	13.2273	11.818	0.2013
20	1.2543	18.7557	6.2215	0.1447
50	2.6147	47.3957	5.2086	0.3932
90	4.4775	86.6126	3.7637	0.5378

**Figura 14.** Concentración teórica calculada por reacción química vs concentración experimental obtenida mediante el sensor calibrado (ambos en ppm).

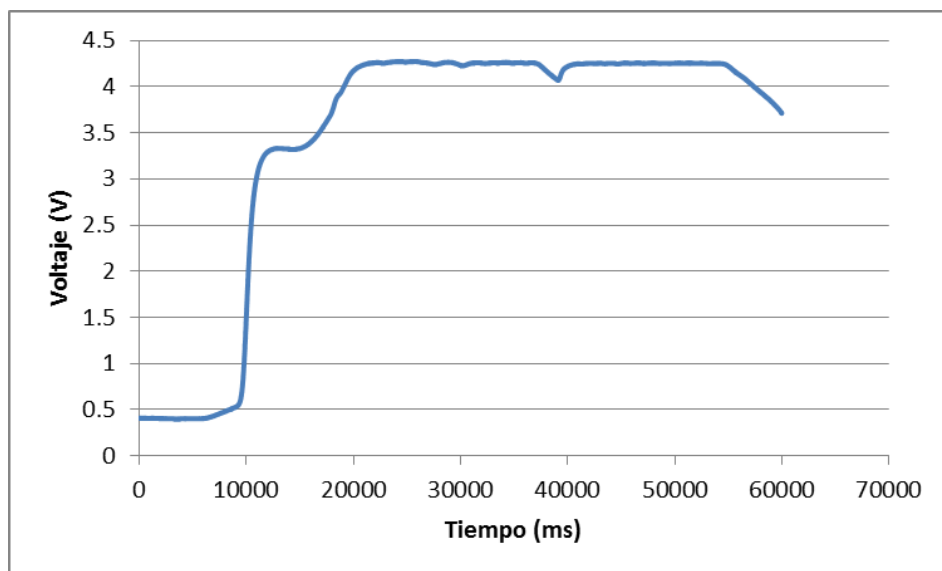


En la figura 14 se muestra el comportamiento de la concentración teórica obtenida con el sensor con respecto a la experimental evaluada mediante reacción química, información que complementa los datos mostrados en la Tabla 7.

En el diagrama se puede observar que la concentración teórica siempre permanece mayor a la concentración obtenida de manera experimental, aunque los errores no sobrepasan el 13%. Esto se puede deber a varias razones: pequeñas fugas de gas en el sistema, conversión incompleta del FeS del cual se observaban restos al fondo del balón al terminar la reacción, etc. También se puede observar que a medida que aumenta la concentración de H<sub>2</sub>S el error disminuye debido a que a mayor concentración aumenta la sensibilidad del sensor y la estabilidad de la medida, disminuyendo desde un error del 12.96% para el punto de 10 ppm hasta un error del 3.76% para 90 ppm de H<sub>2</sub>S.

**4.2.2 Pirólisis.** La figura 15 muestra los resultados obtenidos por el sensor MQ 136 en la recolección de gases de pirólisis.

**Figura 15.** Gráfica de Voltaje (V) versus tiempo (ms) obtenido en la prueba de pirólisis de llanta.



Estimando un valor promedio de voltaje en la zona de estabilidad de la gráfica anterior se obtiene un voltaje igual a 4.2578 V, equivalente a una concentración de H<sub>2</sub>S experimental de 81.99 ppm utilizando la curva de calibración del CDT de gas. Al comparar este valor con los datos teóricos reportados en bibliografía,<sup>[18]</sup> El valor que normalmente aparece en literatura es de 0.94 % p/p es decir 9400 ppm. Teniendo en cuenta que el valor en la literatura se encuentra entre 0.94 % p/p (9400 ppm) a 4%(40000 ppm) dependiendo el tipo de llanta. En la reacción de pirólisis realizada en el laboratorio Interfase se produce solamente 81.99 ppm debido a que, como se observa en la Anexo 6 (BITÁCORA EXPERIMENTAL), el rendimiento no fue el esperado debido a que la producción de líquido y gas fue muy baja y la mayor parte de flujo obtenido fue nitrógeno (gas de arrastre). Por eso es necesario el hacer el análisis del gas en un cromatógrafo de gases para validar los resultados medidos por el sensor MQ 136.

#### **4.3 COMPARACIÓN DEL SENSOR COMERCIAL ELECTROQUÍMICO CON SENSOR INFRARROJO**

Se propuso comparar el sensor comercial validado, con un sensor de infrarrojos desarrollado por la Universidad de los Andes para detectar H<sub>2</sub>S en gases de pirólisis. Para utilizar este sensor infrarrojo, los pasos que se deben seguir para asegurar un buen funcionamiento del detector de H<sub>2</sub>S se muestran en el Anexo 8 (FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR INFRARROJO).

Para validar este sensor se utilizaron 3 botellas patrón conteniendo diferentes concentraciones de H<sub>2</sub>S (5000, 10000 y 20000 ppm). Los resultados de las pruebas fueron los siguientes:

**Tabla 7.** Calibración y validación del sensor infrarrojo.

		tiempo de estabilización	rango reportado por el sensor
estabilización del encendido del sensor infrarrojo	condiciones ambientales	10	1,71 - 1,75
	botella patron de 5000 ppm	10	1,71 - 1,75
	botella patron de 20000 ppm	10	1,71 - 1,75
estabilizacion despues de presionar el ZERO sensor	condiciones ambientales	5	0,12 - 0,18
	botella patron de 5000 ppm	5	0,11 - 0,14
	botella patron de 20000 ppm	5	0,12 - 0,19
flujo de gas de H2S generado por la botella patron	condiciones ambientales	10	no se paso flujo botella cerrada
	botella patron de 5000 ppm	10	0,12 - 0,15
	botella patron de 20000 ppm	10	0,12 - 0,19

A pesar de los datos reportados en el trabajo de diseño y prueba del sensor en los laboratorios de la Universidad de los Andes, desafortunadamente al probar el mismo sensor y ponerlo en contacto con los gases en las concentraciones esperadas para un experimento de pirólisis de llanta el sensor no mostró lectura alguna. Como puede observarse, los datos muestran que el sensor desarrollado presenta algún problema relacionado con la señal, ya sea con la fuente emisora o receptora, o con el rango de lectura y sensibilidad del sensor, el cual no se pudo determinar de acuerdo a los rangos esperados considerando los experimentos de pirólisis de llanta usada en el reactor a lecho fijo. En estos momentos, el sensor se encuentra en proceso de revisión en el laboratorio de fabricación de la Universidad de los Andes para identificar los posibles problemas presentados en el mismo.

## 5. CONCLUSIONES

El sensor comercial MQ 136 permite estimar la concentración de H<sub>2</sub>S de manera confiable hasta 25 ppm de concentración, debido principalmente a problemas derivados con la falta de instrumentos adecuados de medición y calibrado del sensor a concentraciones mayores. El error en la medición a 10 ppm es cercano al 12.96%, pero disminuye hasta el 3.76% cuando la concentración de H<sub>2</sub>S aumenta hasta 90 ppm. Esto significa que a medida que aumenta la concentración de H<sub>2</sub>S el sensor es más sensible y más estable.

El tiempo de respuesta es inversamente proporcional a la concentración de H<sub>2</sub>S ya que si ésta aumenta, el sensor MQ-136 se hace más sensible y capta rápidamente la señal arrojando rápidamente el valor medido.

El sensor infrarrojo desarrollado no mostró respuesta alguna a la presencia de H<sub>2</sub>S en el rango de concentración de 5000-20000 ppm, indicando algún problema en su funcionamiento.

La comparación entre el dato literario 9400 ppm y el experimental del sensor MQ 81.99 ppm, no fue el esperado debido a que durante la pirólisis la producción de líquido y gas fue muy baja y la mayor parte de flujo obtenido fue nitrógeno (gas de arrastre). Esto se debe a que las condiciones de operación no fueron óptimas para el proceso de pirólisis, por esta razón es necesario realizar un análisis más detallado del gas en un cromatógrafo para validar los resultados medidos por el sensor MQ.

## 6. RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliar la escala de calibración con botellas patrones estandarizadas de ácido sulfhídrico que abarquen todo el rango del sensor comercial (0-100ppm) para obtener una curva de calibrado más precisa y amplia, para así poder aplicarla a procesos de concentraciones de H<sub>2</sub>S altas con mayor seguridad y certeza.

Reparar el sensor infrarrojo de la Universidad de los Andes para realizar las respectivas pruebas, midiendo la concentración de H<sub>2</sub>S en los tres eventos (botellas patrón, reacción química y pirólisis de llanta) comprobar su funcionamiento y comparar estos resultados con las mediciones realizadas con el sensor comercial MQ-136.

Otra forma de validación sería la recolección de gases de pirólisis y de la reacción química en bolsas especiales para ser analizadas en un cromatógrafo y obtener la concentración exacta de H<sub>2</sub>S, para compararlas con los datos medidos por nuestros sensores, objetivo que no se logró por daños del equipo de cromatografía del laboratorio de INTERFASE.

Se puede mejorar la sensibilidad del sensor MQ-136 utilizando una resistencia de carga en un rango de 2KΩ a 47KΩ en la salida a tierra del diseño y montaje del dispositivo. Cuanto más bajo sea el valor de esta menos sensible y cuanto más alto sea el valor menor será la precisión para concentraciones altas. Por esta razón es importante realizar pruebas y elegir el valor adecuado de la resistencia que mejore la sensibilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

A Krier, V. V. "A novel LED module for the detection of H<sub>2</sub>S at 3.8 μm," Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 33, nº 14, pp. 10-33, 2000. [1]

Amoore, 1983; Baxter, 2000; Faivre-Pierret y Le Guern, 1983 y sus referencias; NIOSH, 1981; Sax y Lewis, 1989; Snyder et al., 1995. [2]

Appleton et al. "Microwave technology for energy-efficient processing of waste". Applied Energy, vol. 18, pp. 85-113, 2005. [3]

ARDUINO WEBSITE. Manual Arduino. Consultado el 12 de julio de 2015. Disponible en: <http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardMega> [4]

ARDUINO WEBSITE. Que es Arduino. Consultado el 1 de abril de 2015. Disponible en: <http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Guide/Introduction>. [5]

AYLÓN, E., FERNÁNDEZ, A., COLINO, M., Navarro, V., Murillo, R. GARCÍA, T. & MASTRAL, A. M. "Waste Tire Pyrolysis: Comparison between Fixed Bed Reactor and Moving Bed Reactor", Applied Chemistry, vol. 47, nº 102, pp. 4029-4031, 2008. [6]

Chou, J. (1999). Infrared Gas Sensors. En J. Chou, Hazardous Gas Monitors: A practical guide to Selection, Operation and Applications (pág. 256). McGraw-Hill Professional. [7]

FERREIRA, D & PALENCIA, C. Utilización de catalizadores heteropoliácidos para el mejoramiento de la producción de aromáticos a partir de pirólisis de llanta usada. Tesis de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2015. [8]

GUACHETÁ, María Camila. Detección de gases mediante el espectro infrarrojo. Tesis de pregrado. Bogotá: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, 2014. [9]

Gutiérrez, G., Tocarruncho, J., & Castellanos, D. ROBOT Multidetector de gases para minería. Ingenio Magno. Vol 4, pp. 87-95, 2013. [10]

HÜSEYIN, A. y CUMALI, I. "Optimización de la producción de combustible a partir de neumáticos en desuso," ELSEVIER, vol. 1, nº 102, pp. 605-612, 2012. [11]

INDUSTRIAL SCIENTIFIC. The Gas Detection People. Consultado el 10 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.indsci.es/servicios/capacitacion/educacion-general-sobre-gas/sensor-electroquimico/> [12]

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Resolución 1457, Colombia, 2010. [13]

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. RESOLUCIÓN 601, COLOMBIA, 2006. [14]

MONCADA, S. Análisis de la producción de aceite y char por pirólisis intermedia del caucho proveniente de llantas usadas., Bucaramanga: Tesis de pregrado UIS, 2013. [15]

Pyrolysis of a waste from the grinding of scrap tyres A.M. Instituto Nacional del Carbón, CSIC, Apartado 73, 33080 Oviedo, Spain. [16]

Tipos de Sensores. Consultado el 10 de Junio de 2015. Disponible en: [http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esotecnologia/quincena11/4quincena11\\_contenidos\\_3a.ht](http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esotecnologia/quincena11/4quincena11_contenidos_3a.ht) [17]

UCAR, S., KARAGOZ, S., R., OZKAN., A.& YANIK. "Evaluation of two different scrap tires as hydrocarbon source by pyrolysis", ELSEVIER, vol. 84, nº 2005, pp. 1884-1892, 2005. [18].

## ANEXOS

### ANEXO A. Código Arduino 1.0.6.

```
// Digital pin 8 will be called 'pin8'
int pin8 = 8;
// Analog pin 0 will be called 'sensor'
int sensor = A0;
// Set the initial sensorValue to 0
int sensorValue = 0;

// The setup routine runs once when you press reset
void setup() {
  // Initialize the digital pin 8 as an output
  pinMode(pin8, OUTPUT);
  // Initialize serial communication at 9600 bits per second
  Serial.begin(9600);
}

// The loop routine runs over and over again forever
void loop() {
  // Read the input on analog pin 0 (named 'sensor')
  sensorValue = analogRead(sensor);
  // Print out the value you read
  Serial.println(sensorValue, DEC);
  // If sensorValue is greater than 500
  if (sensorValue > 500) {
    // Activate digital output pin 8 - the LED will light up
```

```
digitalWrite(pin8, HIGH);  
delay (5);  
}  
else {  
  // Deactivate digital output pin 8 - the LED will not light up  
  digitalWrite(pin8, LOW);  
}  
  
}
```

## ANEXO B. Ficha seguridad sensor MQ136.

HANWEI ELECTRONICS CO.,LTD

MQ-136

<http://www.hwsensor.com>

# TECHNICAL DATA

# MQ-136 GAS SENSOR

### FEATURES

Fast response and High sensitivity

Stable and long life

Simple drive circuit

### APPLICATION

They are used in air quality control equipments for buildings/offices, are suitable for detecting of H<sub>2</sub>S.

### SPECIFICATIONS

#### A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V <sub>c</sub>	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V <sub>H</sub>	Heating voltage	5V±0.1	ACOR DC
R <sub>L</sub>	Load resistance	can adjust	
R <sub>H</sub>	Heater resistance	31 Ω ±5%	Room Tem
P <sub>H</sub>	Heating consumption	less than 800mw	

#### B. Environment condition

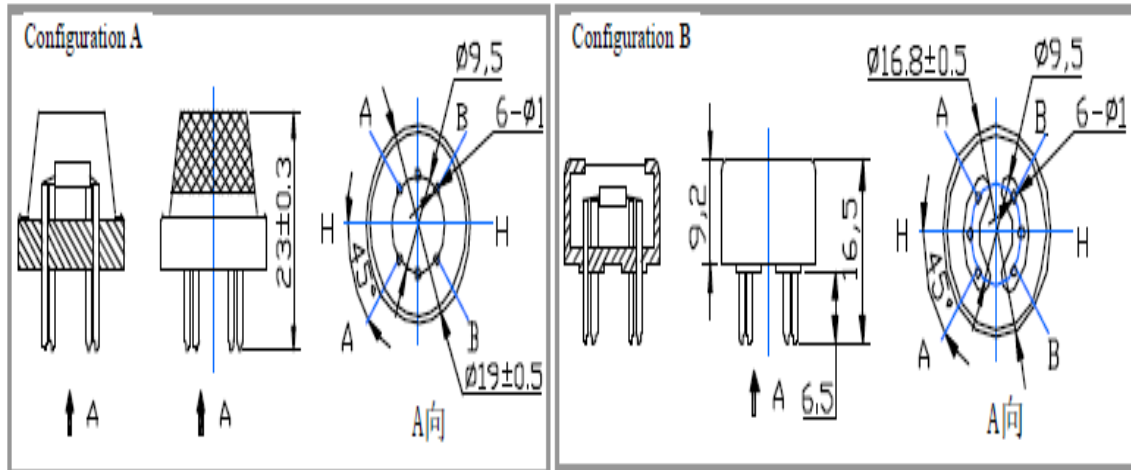
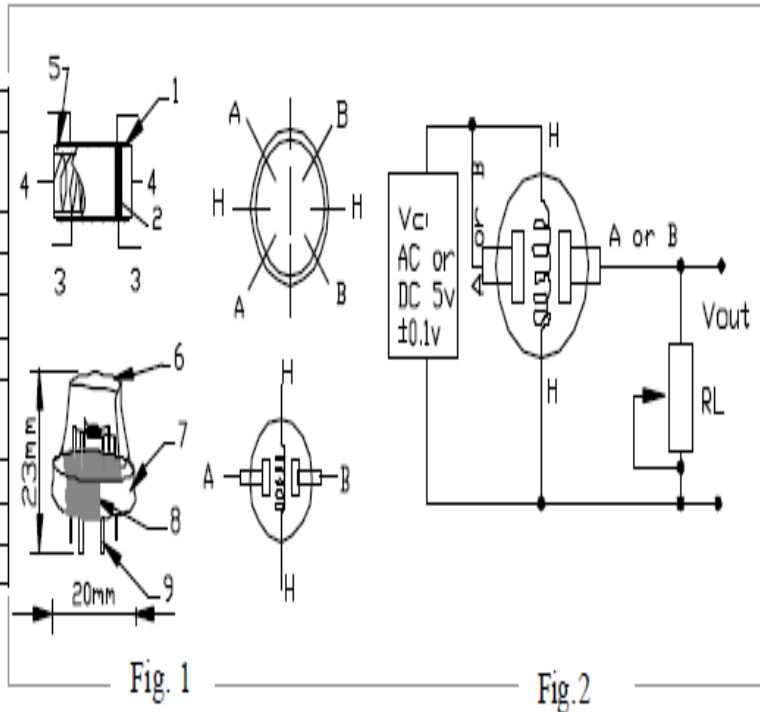
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T <sub>ao</sub>	Using Tem	-10℃-45℃	
T <sub>as</sub>	Storage Tem	-20℃-70℃	
R <sub>H</sub>	Related humidity	less than 95%Rh	
O <sub>2</sub>	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

#### C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remark 2
R <sub>s</sub>	Sensing Resistance	30K Ω -200K Ω (10ppm H <sub>2</sub> S)	Detecting concentration scope: 1-100ppm H <sub>2</sub> S
α (20/5) H <sub>2</sub> S	Concentration Slope rate	≤0.65	
Standard Detecting Condition	Temp: 20℃ ±2℃ Humidity: 65%± 5%	V <sub>c</sub> :5V±0.1 V <sub>h</sub> : 5V±0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

#### D. Structure and configuration, basic measuring circuit

Parts	Materials
1 Gas sensing layer	SnO <sub>2</sub>
2 Electrode	Au
3 Electrode line	Pt
4 Heater coil	Ni-Cr alloy
5 Tubular ceramic	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
6 Anti-explosion network	Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh)
7 Clamp ring	Copper plating Ni
8 Resin base	Bakelite
9 Tube Pin	Copper plating Ni



Structure and configuration of MQ-136 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic tube, Tin Dioxide (SnO<sub>2</sub>) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of

TEL: 86-371-5333098 5333099

FAX: 86-371-5333090

Email: sensor@371.net

sensitive components. The enveloped MQ-136 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

#### E. Sensitivity characteristic curve

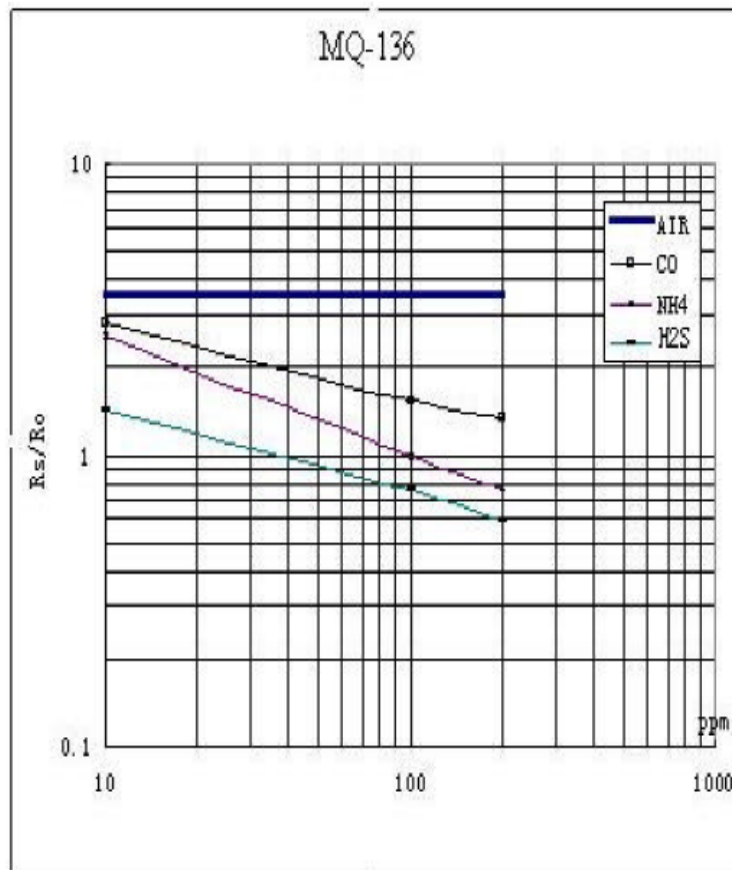


Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-136 for several gases. in their: Temp: 20°C, Humidity: 65%, O<sub>2</sub> concentration 21% RL=20kΩ  
R<sub>0</sub>: sensor resistance at 10ppm of H<sub>2</sub>S in the clean air.  
R<sub>s</sub>: sensor resistance at various concentrations of gases.

Fig.3 sensitivity characteristics of the MQ-136

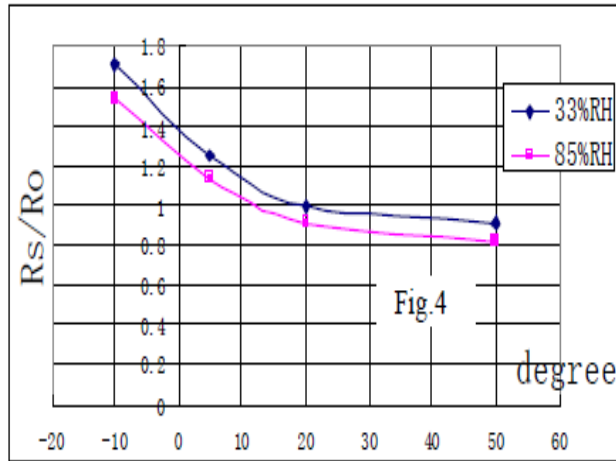


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-136 on temperature and humidity.  
 Ro: sensor resistance at 10ppm of H<sub>2</sub>S at 33%RH and 20 degree.  
 Rs: sensor resistance at 10ppm of H<sub>2</sub>S at different temperatures and humidity.

### SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-136 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 10ppm H<sub>2</sub>S concentration in air and use value of Load resistance that ( $R_L$ ) about 20 K $\Omega$  (10K $\Omega$  to 47 K $\Omega$ ).



When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.



TEL: 86-371-65333098 65333099 FAX: 86-371-65333090

Email: sensor@371.net

## ANEXO C. Resultados DRX.



		<b>LABORATORIO DE RAYOS-X</b>	Código: F-LRX-P-04
			Versión: 02
		INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X	Página 1 de 2

FECHA	DIA	MES	AÑO	INFORME	INF-517-14-DRX
	05	12	2014		

DATOS DEL CLIENTE			
Empresa	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
Nombre	Dra. Debora Alcida Nabarlatz		
Dirección	Carrera 27 calle 9, ciudad universitaria	Nit o C.C	890.201.213-4
Ciudad	Bucaramanga, Santander	Orden de Compra	
e-mail	<a href="mailto:dnabarla@uis.edu.co">dnabarla@uis.edu.co</a>	Teléfono	6344000

METODOLOGIA DE TRABAJO	
Preparación de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> <li>La muestra fue molidura en un mortero de ágata y llevada a un tamaño de partícula menor a 38 <math>\mu\text{m}</math> (400 mesh). El espécimen seleccionado de la muestra fue montado en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.</li> </ul>
Toma de Datos de Difracción	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:            Voltaje 40(kV)            Corriente 30(mA)            Rendija de Divergencia 0.6mm            Rendijas Soller Primario 2.5°            Muestreo 0.01526° 2theta            Rango de Medicion 3.5°-70° 2theta            Radiación CuK<math>\alpha</math>1            Filtro Niquel            Detector Lineal LynxEye            Tipo de barrido A pasos            Tiempo de muestreo 0.4 segundos</li> </ul>
Tratamiento de la muestra	Químico <input type="checkbox"/> Térmico <input type="checkbox"/> Ninguno <input checked="" type="checkbox"/>

TOMA Y ANÁLISIS DE DATOS			
Fecha Toma de Datos	05/12/2014	Fecha Análisis de Resultados	---
Tipo de Muestra	Inorgánica	Fecha de Recepción de la Muestra	03/12/2014

 	<b>LABORATORIO DE RAYOS-X</b>	Código: F-LRX-P-04
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión: 02 Página 2 de 2

### RESULTADOS OBTENIDOS

#### 1. SULFURO DE HIERRO II (D3BW)

**Observaciones:**

- Los resultados se relacionan únicamente a la muestra analizada.
- Si desea expresar su percepción con respecto al presente servicio o ensayo, hágalo por medio del correo electrónico [rayosx@uis.edu.co](mailto:rayosx@uis.edu.co) o al PBX: 6344000 Ext. 3512.
- No se debe reproducir el informe de ensayo excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio.

**Elaboró:**

**Revisó y Aprobó:**

Qco. MSc. José Luis Pinto Camargo  
Profesional Analista  
PQ. 2009

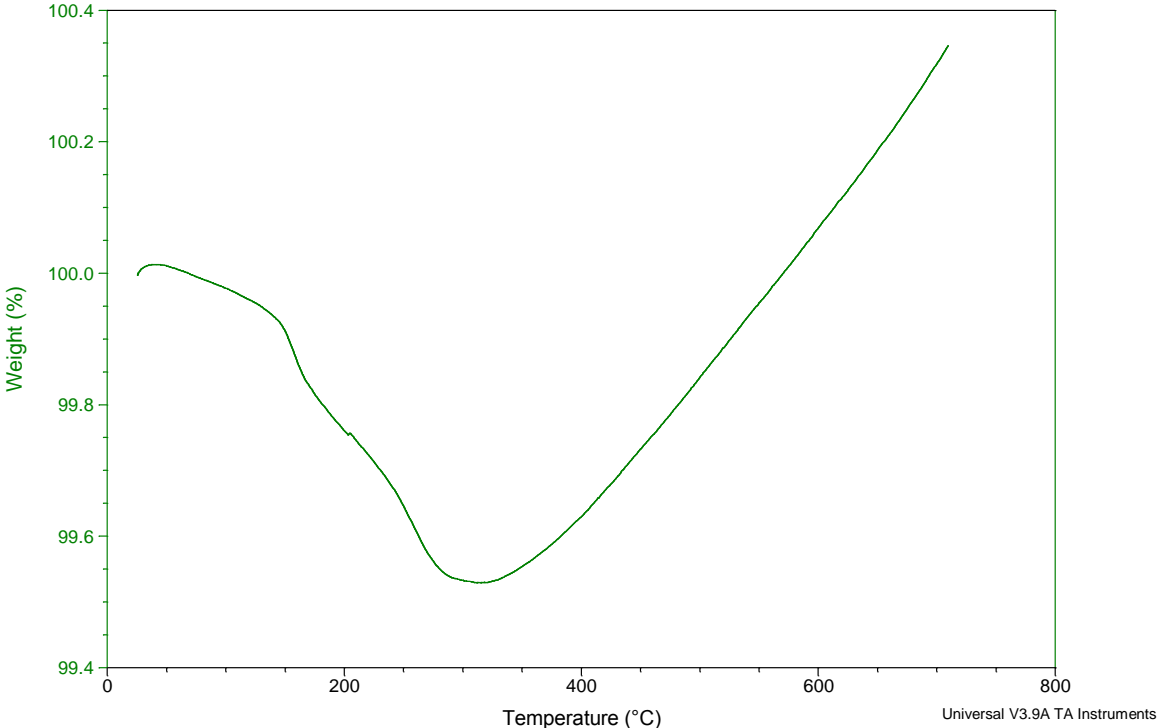
Dr. José Antonio Henao Martínez  
Director Laboratorio  
PQ. 0321

**ANEXO D. Resultados TGA.**

Sample: Sulfuro Ferroso  
Size: 56.9960 mg  
Method: Gilles 2C/min

**TGA**

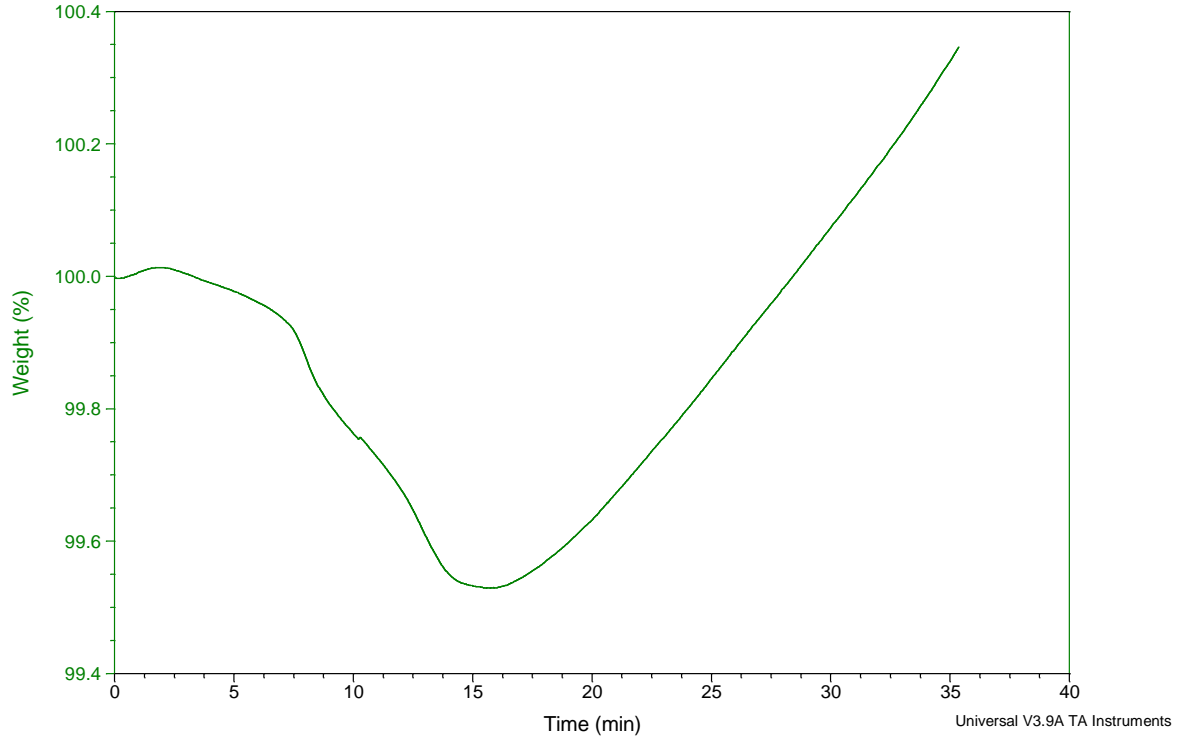
File: C:\TA\Data\TGA\Sulfuro Ferroso.001  
Operator: G.A.M.  
Run Date: 30-Nov-06 06:18  
Instrument: 2050 TGA V5.1A



Sample: Sulfuro Ferroso  
Size: 56.9960 mg  
Method: Gilles 2C/min

### TGA

File: C:\TA\Data\TGA\Sulfuro Ferroso.001  
Operator: G.A.M.  
Run Date: 30-Nov-06 06:18  
Instrument: 2050 TGA V5.1A

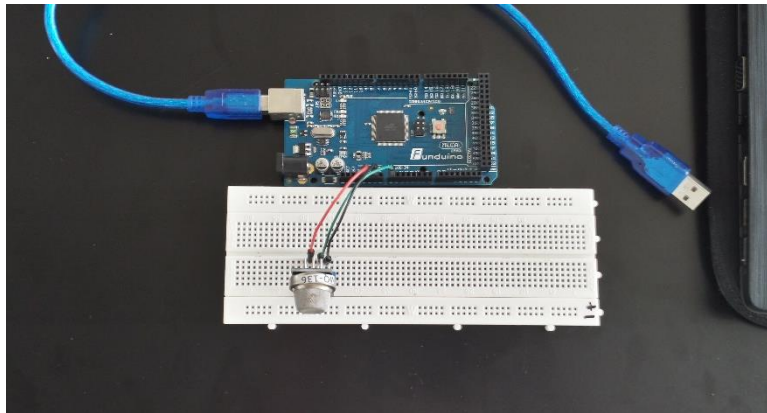


## **ANEXO E. Análisis detallado del diseño y montaje del sensor MQ.**

### **1. DISEÑO FÍSICO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO**

#### **1.1 Montaje en la protoboard**

En la protoboard se conecta el sensor junto con los cables que van al Arduino teniendo en cuenta conectar el  $V_0$  del sensor con 5V (señal digital) del Arduino mega, el  $A_0$  del sensor con el  $A_0$  con el  $A_0$  del Arduino mega (señal analógica) y el G del sensor con el GND del Arduino mega (tierra). (Imagen 1)



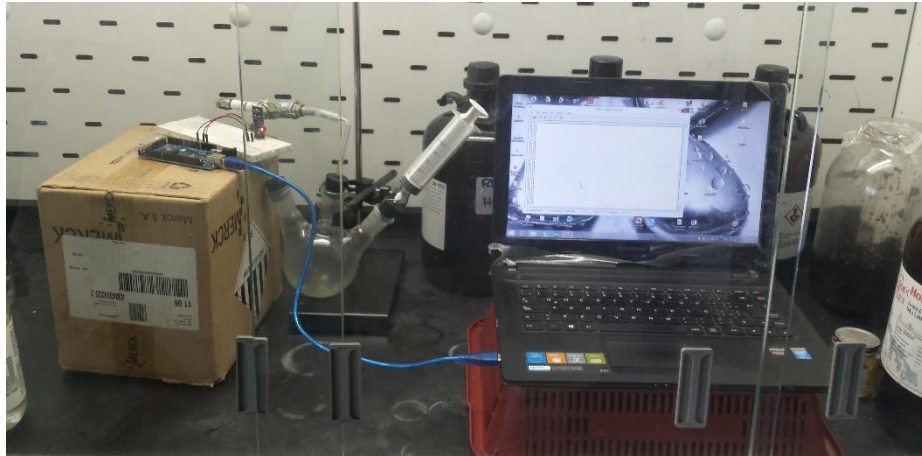
**Imagen 1.** Montaje en la protoboard.

Después del montaje se conecta el arduino al PC y se ponen a correr los dos programas el Arduino 1.0.6 y el Hyperterminal.

#### **2.2 Caracterización de datos del H<sub>2</sub>S**

Para la caracterización de datos del H<sub>2</sub>S se usó la configuración que se muestra en la Imagen 2. Con esta configuración se logró verificar el funcionamiento del sistema electrónico, es decir, que este dispositivo perciba la presencia del H<sub>2</sub>S. A medida que se aumentaba la concentración del H<sub>2</sub>S, también aumentaba el valor de la señal analógica que se mostraba en el programa hyperterminal. Para el

aumento de la concentración se trasladó el gas que se encontraba contenido en el balón de tres bocas de fondo plano.



**Imagen 2.** Configuración del sistema electrónico que detecta la presencia de H<sub>2</sub>S.

### **2.3 Adquisición de Datos**

Para la etapa de adquisición de datos se diseñó e implementó un sistema donde se pudieran recolectar los datos del detector de H<sub>2</sub>S a través de un código previamente programado con Arduino 1.0.6 (imagen 3).

Los datos fueron guardados en una hoja de texto gracias al programa Hyperterminal (Imagen 4) para posteriormente poderlos exportar a Excel y graficarlos.



ANEXO F. Bitácora experimental.

BITACORA EXPERIMENTAL					
FECHA:	HORA INICIO:	HORA FINAL:	DURACIÓN:		
15 de Julio de 2015	10:40	12:40	2 HORAS		
NOMBRE DE LA PRUEBA	PIROLISIS CONDCIONES MÁXIMAS DE AROMÁTICOS				
Peso Inicial Llanta	9,740	Peso Inicial Trampa 1	323,430	TOTAL MASA FINAL	9,419
Peso inicial lana	1,667	Peso Inicial Trampa 2	326,450	CIERRE BALANCE	3%
Peso inicial alúmina	7,357				
	PRESION	TIEMPO DE RESIDENCIA	FLUJO DE N2 (Nml/m)	TEMPERATURA (°C)	
CONDICIONES DE OPERACIÓN	1 BAR	2S	155,000	466,000	

T FINAL REACTOR		393,000			
TIEMPO	60,000	RAMPA DE CALENTAMIENTO	6,550		
Peso Char	7,857				
Peso char retenido en ALUMINA	0,010	RENDIMIENTO O CHAR	81%		
Peso total char	7,867				
	PESO FINAL TRAMPA 1	323,600	PESO FINAL TRAMPA 2	326,670	
Peso final alúmina	7,367	Peso final lana	1,701	Aceite Trampa 1	0,170
Peso Aceite retenido en lana sup	PESO TOTAL ACEITE	RENDIMIENTO O ACEITE		Aceite Trampa 2	0,220
0,034	0,424	4%			
Volumen de gases generados (ml)	Peso molecular según Kyary	Peso gas generado	Rendimiento Gas		
1116,000	24,710	1,128	12%		

## ANEXO G. Balance estequiométrico.

Para la generación del gas se usan dos componentes químicos, el ácido clorhídrico (HCl) y el sulfuro ferroso (FeS) (Imagen1).

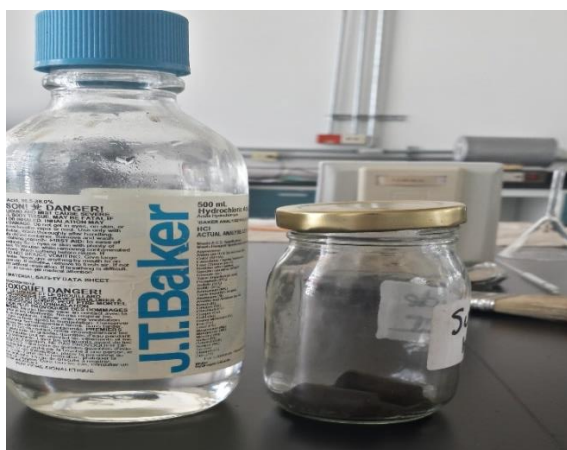


Imagen 1. Ácido clorhídrico y el sulfuro ferroso.

### 1. PREPARACIÓN DE LOS REACTIVOS

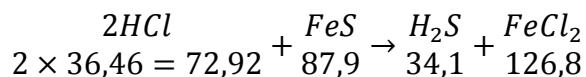
El sulfuro de hierro utilizado estaba en barras por lo tanto fue necesario procesarlo y convertirlo a polvo para facilitar la reacción, el proceso para pulverizar este hierro fue macerándolo. (Imagen 2)



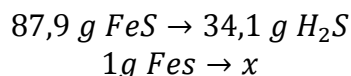
Imagen 2. Procesado del sulfuro de hierro.

## 2. BALANCE

Por literatura encontramos que el reactivo límite de esta reacción es el sulfuro ferroso. Al mezclar el ácido clorhídrico con sulfuro ferroso, y por estequiometria se obtiene:



Como el FeS es el que va limitar la reacción, lo que se quiere saber es cuál es la cantidad mínima que se debe usar para preparar el H<sub>2</sub>S a una concentración deseada, con lo que se obtiene la siguiente relación:



Se despeja H<sub>2</sub>S, para saber por cada gramo de FeS cuántos gramos se producen de H<sub>2</sub>S

$$x = 0,3879 \text{ g H}_2\text{S} \rightarrow 387,9 \text{ mg H}_2\text{S}$$

Ahora, se calcula el volumen del recipiente que contiene este gas, y de esta forma se estima la concentración de H<sub>2</sub>S en el gas.

Volumen del dispositivo (tubería)

$$V_{te} = \pi r^2 L$$

$$\text{diametro de la tubería} \frac{3}{4} \text{ pulgada}$$

$$0,75 \text{ in} \rightarrow 1,905 \text{ cm}$$

➤  $L = 4,6 \text{ cm}$

$$V_{cilindro} = \pi 1,905^2 \times 4,6 = 52,4442 \text{ cm}^3$$

➤ L = 1 cm

$$V_{cilindro} = \pi 1,27^2 \times 1 \text{ cm} = 11,4 \text{ cm}^3$$

Se usó un balón de 3 bocas de 500 mL

$$V_{dispositivo} = 11,4 + 52,4444 = 63,8444 \text{ cm}^3$$

$$63,8444 \text{ cm}^3 \rightarrow 63,8444 \text{ ml}$$

$$63,8444 \text{ ml} \left( \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} \right) = 0,06384 \text{ l}$$

$v_T = \text{volumen del dispositivo} + \text{volumen del balón de 3 bocas}$

$$v_T = 0,06384 \text{ l} + 0,5 \text{ l} = 0,5638 \text{ l}$$

Para saber la concentración en [ppm] que se debe tener de H<sub>2</sub>S en el sistema completo, se debe hacer la fracción entre el peso que se obtuvo de H<sub>2</sub>S en [mg] y se divide por el volumen del sistema contenedor que debe encontrarse en [l].

$$[\text{ ] ppm} = \frac{\text{mg H}_2\text{S}}{\text{volumen (l)}} = \frac{387,9}{0,5638} = 686,4136$$

$$1 \text{ g} \rightarrow \text{FeS} \rightarrow 686,4136 \text{ ppm H}_2\text{S}$$

$$\frac{\text{concentracion deseada ppm}}{686,4136 \text{ ppm}} = \text{masa de FeS (g)}$$

Para saber la cantidad de ácido clorhídrico a utilizar se tiene en cuenta:

Pureza del HCl = 37,5%

$$\rho_{\text{HCl}} = 1,12 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$g \text{ de } FeS \left( \frac{1 \text{ mol } FeS}{87,9 \text{ g } FeS} \right) \left( \frac{2 \text{ mol } HCl}{1 \text{ mol } FeS} \right) \left( \frac{36,46 \text{ g } HCl}{1 \text{ mol } HCl} \right) \left( \frac{100\%}{37,5\%} \right)$$

**Tabla 1.** Cantidad de cada reactivo necesaria para la reacción

Concentración deseada de $H_2S$ en el gas (ppm)	Masa de FeS (g)	Volumen de HCl (ml)
10	0.0143	0.0283
15	0.0215	0.04
20	0.02867	0.053
50	0.0716	0.1336
90	0.1290	0.2408

## **ANEXO H.** Funcionamiento del sensor infrarrojo.

Para utilizar este sensor infrarrojo, los pasos que se deben seguir para asegurar un buen funcionamiento del detector de H<sub>2</sub>S son:

- Conectar tanto el amplificador como el driver del Led emisor a la toma de corriente.
- Luego se debe prender el driver del Led emisor y corroborar que se prenda el botón verde y se haya apagado el rojo.
- Posteriormente, se debe esperar aproximadamente entre 6 a 10min para que se establezca el sistema el LED emisor de su máxima potencia.
- Después se debe establecer el modo zero en el amplificador y esperar entre unos 3 a 5min.
- Ya después de este proceso se puede empezar a realizar las pruebas de detección del H<sub>2</sub>S.
- Para la etapa de adquisición de datos que se diseñó y se implementó un sistema donde se pudiera recolectar los datos del detector de H<sub>2</sub>S y que estos fueran guardados en una memoria uSD para posteriormente poderlos exportar a Matlab y graficarlos. Entre la toma de un dato y otro hay un tiempo de 2s. Para lograr este diseño se usó un ATMEGA8, para la adquisición de los datos a través de los ADCs que este microcontrolador posee, un regulador de voltaje, la adaptación a la memoria uSD y unos divisores de voltaje (Ver apéndice 13.6). Toda la programación se realizó en lenguaje C. Para la fabricación del circuito impreso (Imagen 13) se usó el software de diseño de circuitos KiCad. Si se quiere

observar el código de programación del ATMEGA8, éste se puede encontrar en el apéndice 13.4.

Para hacer las mediciones también se deben tener en cuenta las siguientes restricciones: la temperatura ambiente debe estar a 30 °C, el flujo de aire debe ser continuo, la presión del aire que pasa por el dispositivo debe ser de 2BAR (ABSOLUTOS), también es prudente poner un filtro deshidratador de aire como precursor al dispositivo detector y por ultimo mantener el dispositivo sin movimiento en el momento de realizar la detención. <sup>[17]</sup>