

**REMOCIÓN DE H<sub>2</sub>S DEL BIOGÁS PRODUCIDO A PARTIR DE ESTIÉRCOL  
BOVINO, EN LA UNIDAD DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FINCA  
MARCELLA (KM 9 CASCO URBANO GIRÓN SANTANDER).**

**MANUEL RAMIRO CORREDOR CRUZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

**REMOCIÓN DE H<sub>2</sub>S DEL BIOGÁS PRODUCIDO A PARTIR DE ESTIÉRCOL  
BOVINO, EN LA UNIDAD DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FINCA  
MARCELLA (KM 9 CASCO URBANO GIRÓN SANTANDER).**

**MANUEL RAMIRO CORREDOR CRUZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero Químico**

**Directores:**

**Humberto Escalante Hernández**

Ingeniero Químico PhD

**Liliana del Pilar Castro Molano**

Ingeniera Química PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

A todos aquellos que me apoyaron de una u otra forma durante mi formación.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis directores de proyecto, el profesor Escalante y la profesora Liliana, por su comprensión, guía y apoyo incondicional en los momentos más difíciles de este proyecto.

Al ingeniero Franklin y la profesora Mabel por su constante colaboración y consejo.

A todos los integrantes del laboratorio de Digestión Anaerobia UIS, pues ellos hicieron mucho más ameno mi trabajo.

A la profesora Debora quien fue una pieza clave desde el inicio.

A la escuela de Ingeniería Química de la UIS, por haberme formado como profesional y contribuido a mi desarrollo como persona.

A Laura Mantilla y toda su familia, por permitirme realizar mi experimentación en las instalaciones de su hermosa finca Marcella.

Al laboratorio de Difracción de Rayos X (DRX) de la UIS, pues con su ayuda pude lograr caracterizar el material de empaque.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	14
1. METODOLOGÍA.....	25
1.1. DISEÑO SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS .....	25
1.1.1. Elaboración material de empaque .....	25
1.1.2 Método de cuantificación de H <sub>2</sub> S. ....	27
1.1.3 Caracterización del material de empaque .....	28
1.1.4 Construcción equipo de sensado.....	28
1.1.5 Diseño mecánico del equipo de purificación de biogás. ....	29
1.2 FASE 2: DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN.....	30
1.2.1 Dimensionamiento .....	30
1.2.2 Construcción de la unidad de purificación.....	31
1.3 FASE TRES: PUESTA EN MARCHA Y MONITOREO SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.....	32
1.3.1 Instalación.....	32
1.3.2 Monitoreo .....	32
1.4 FASE CUATRO: ANÁLISIS ECONÓMICO SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.....	32
2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	34
2.1. DISEÑO SISTEMA PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.....	34
2.1.1. Elaboración material de empaque .....	34
2.1.2. Caracterización material de empaque .....	36
2.1.3. Equipo de sensado. ....	38

2.2.	DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.....	40
2.2.1.	Dimensionamiento sistema de purificación de biogás .....	40
2.2.2	Construcción sistema de purificación de biogás .....	44
2.3	PUESTA EN MARCHA SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.....	45
2.3.1	Instalación sistema de purificación de biogás .....	45
2.3.2	Monitoreo sistema de purificación de biogás .....	45
2.4	ANÁLISIS ECONÓMICO SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS .....	48
3.	CONCLUSIONES.....	49
4.	RECOMENDACIONES .....	50
	BIBLIOGRAFÍA.....	52
	ANEXOS.....	55

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Componentes del Biogás en función del sustrato utilizado .....	19
Tabla 2. Métodos de eliminación de H <sub>2</sub> S del biogás.....	21
Tabla 3. Valores de entrada y parámetros utilizados durante el proceso de dimensionamiento.....	40
Tabla 4. Características principales de la unidad purificación de biogás. ....	43

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Esquema BDG y Biodigestor de bajo costo .....	16
Figura 2. Afectación de corrosión en equipo periférico biodigestor de laboratorio D. .....	20
Figura 3. Esquema del proceso de remoción H <sub>2</sub> S por Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . .....	22
Figura 4. Esponjilla de lana de acero.....	26
Figura 5. Sensor MQ136.....	27
Figura 6. Tarjeta Arduino® Mega 2560.....	29
Figura 7. Diseño mecánico equipo de purificación.....	30
Figura 8. Cupones de lana de acero oxidados usando diferentes ácidos.....	35
Figura 9. Cambio de masa en la muestra sometida a oxidación.....	35
Figura 10. Porcentaje de fase activa en el material de empaque. ....	37
Figura 11. Equipo de sensado continuo de H <sub>2</sub> S.....	39
Figura 12. Equipo medición de H <sub>2</sub> S. ....	40
Figura 13. Unidad de purificación de biogás construida. ....	44
Figura 14. Equipo de purificación de biogás instalado en BDG finca Marcella. ....	45
Figura 15. Cambio de coloración material húmedo y seco .....	46
Figura 16. Composición de H <sub>2</sub> S en flujo de biogás BDG finca Marcella. ....	47

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
Anexo A. Modelo experimental determinación de relación ácido muriático/agua para elaboración de material de empaque.....	55
Anexo B. Ficha técnica sensor MQ136.....	56
Anexo C. Caracterización material de empaque por DRX.....	58
Anexo D. Lista de materiales utilizados durante construcción del equipo de sensado .....	82
Anexo E. Código sensor .....	86
Anexo F. Lista de materiales utilizados en construcción unidad de purificación ....	95
Anexo G. Procedimiento detallado elaboración material de empaque.....	101
Anexo H. Circuitos equipo sensado .....	102
Anexo I. Dimensionamiento unidad de purificación .....	103
Anexo J. Planos unidad de purificación de biogás.....	107
Anexo K. Manual de ensamblaje y operación de Unidad de purificación de biogás. ....	111
Anexo L. CAPEX y OPEX Unidad de purificación de biogás .....	116

## RESUMEN

**TITULO:** DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD PARA PURIFICACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ÓXIDO DE HIERRO\*

**AUTOR:** Manuel Ramiro Corredor Cruz\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Purificación biogás, H<sub>2</sub>S, humedad, CAPEX, OPEX.

### CONTENIDO:

Los Biodigestores de bajo costo (BDG) son equipos que permiten estabilizar los residuos pecuarios mediante un proceso microbiológico que produce un gas combustible (biogás) y un lodo (digerido). El biogás es usado principalmente en cocción de alimentos debido a la presencia de impurezas como el H<sub>2</sub>S y la humedad que impiden su uso en proceso térmicos más complejos. En la actualidad existen diversas técnicas que permiten remover las impurezas, pero estas no han sido escaladas a las condiciones económicas y técnicas particulares del país y la región.

Teniendo en cuenta esta problemática se diseñó, construyó e implementó una unidad de purificación de biogás aplicada a biodigestores de bajo costo, con remoción selectiva de H<sub>2</sub>S y humedad a partir de óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y gel de sílice. La unidad construida tiene dimensiones de 106 cm de altura y 30 cm de base con un peso aproximado de 10 kg, elaborada en acrílico transparente y polietileno de alta densidad, incluye medición continua de datos por medio de un sensor electroquímico MQ 136 y tiempo de funcionamiento autónomo del equipo de 180 días. El sistema de purificación presentó una eficiencia para la remoción del H<sub>2</sub>S de 61% y para la humedad del 41% durante el periodo monitoreado. El análisis económico determinó un costo capital (CAPEX) de USD \$386 y costo de operación (OPEX) de USD \$21,6.

Los resultados obtenidos es esta investigación demuestran que la unidad de purificación, constituye una alternativa tecnológicamente, operacionalmente y económicamente viable para la purificación del biogás producido en BDG.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directores: Humberto Escalante Hernández y Liliana del Pilar Castro Molano

## ABSTRACT

**TITLE:** REMOVAL OF H<sub>2</sub>S FROM THE BIOGAS PRODUCED FROM BOVINE MANNER, IN THE ANAEROBIA DIGESTION UNIT OF THE MARCELLA FARM (KM 9 URBAN GIRON SANTANDER) \*

**AUTHOR:** Manuel Ramiro Corredor Cruz \*\*

**KEYWORDS:** Biogas purification, H<sub>2</sub>S, Humidity, CAPEX, OPEX.

### DESCRIPTION:

Low-cost biodigesters (BDG) are equipment that allows the stabilization of livestock waste through a microbiological process that produces a combustible gas (biogas) and a sludge (digested). Biogas is mainly used in the cooking of foods due to the presence of impurities such as H<sub>2</sub>S and humidity that prevent its use in more complex thermal processes. At present there are several techniques that allow the removal of impurities, but these have not been scaled in the particular economic and technical conditions of the country and the region.

Taking into account this problem, a biogas purification unit applied to biodigestors of low cost was designed, constructed and implemented, with selective elimination of H<sub>2</sub>S and humidity using iron oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and silica gel. The built unit has dimensions of 106 cm of height and 30 cm of base with an approximate weight of 10 kg, elaborated in transparent acrylic and high density polyethylene, includes continuous measurement of data by means of an electromechanical sensor MQ 136 and time of operation autonomous team of 180 days. The purification system presented an efficiency for the removal of the H<sub>2</sub>S of 61% and for the humidity of 41% during the monitored period. The economic analysis determined a capital cost (CAPEX) of USD \$ 386 and cost of operation (OPEX) of USD \$ 21.6.

The results obtained in this research demonstrate that the purification unit constitutes a technological, operational and economically viable alternative for the purification of biogas produced in BDG.

---

\* Draft Degree

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Directors: Humberto Escalante Hernández & Liliana del Pilar Castro Molano

## INTRODUCCIÓN

Según la Oficina del Alto Comisionado para la Paz<sup>1</sup>, la coyuntura actual que atraviesa el país marcada por el inicio de un periodo de post conflicto, en el cual se busca incentivar el desarrollo del sector rural como una solución real para la no reincidencia de los actores armados, mejorando las condiciones de vida de las poblaciones vulnerables, establece condiciones ideales para el desarrollo de proyectos que se enfoquen en estas áreas, y que idealmente permitan solucionar de forma inteligente y económica varias problemáticas simultáneamente.

Ante este reto, el gobierno, la industria y academia necesitan unir esfuerzos para la construcción de soluciones costo-efectivas a la problemática actual. De acuerdo con Castro<sup>2</sup>, un ejemplo claro del tipo de respuesta que debe surgir, es el que se ha venido gestando desde hace 4 años en la Universidad Industrial de Santander (UIS), a través del grupo de investigación en tecnologías de valorización de residuos y fuentes agrícolas e industriales para la sustentabilidad energética-INTERFASE en su línea de Digestión Anaerobia, con la implementación de biodigestores de bajo costo (BDG) para producción de energía y la adecuada disposición de residuos pecuarios.

Según Herrero<sup>3</sup>, Un biodigestor es un equipo que bajo condiciones apropiadas aprovecha la acción de los microorganismos para degradar diferentes tipos de

---

<sup>1</sup> COLOMBIA. OFICINA DEL ALTO COMISIONADO PARA LA PAZ. Acuerdo para la terminación del conflicto y la construcción de una paz estable y duradera. [En línea] Colombia. Noviembre, 2016. [Consultado 10 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.altocomisionadoparalapaz.gov.co/procesos-y-conversaciones/Documentos%20compartidos/24-11-2016NuevoAcuerdoFinal.pdf> >

<sup>2</sup> CASTRO, L, et al. Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of. [En línea]. Colombia. Septiembre, 2017. [Consultado 02 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417306740> >

<sup>3</sup> HERRERO, Jaime. Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación. [En línea]. Bolivia. 2008. [Consultado 10 Ago. 2017] Disponible en: <<http://www.bivica.org/upload/biodigestores-familiares.pdf> >

materia orgánica, produciendo un gas combustible y un lodo o digerido. Los BDG tienen un principio de funcionamiento idéntico a los otros tipos de biodigestores, se diferencian principalmente porque están diseñados para generar costos de construcción, operación y mantenimiento mínimos. Adicionalmente, tienen un fácil manejo, con el fin de permitir que su implementación sea viable en sectores con entornos de dificultad económica y por personal con baja formación técnica. Siguiendo a Herrero *et al*<sup>4</sup>, actualmente en Latinoamérica se encuentran instalados alrededor de 1.085 biodigestores, con capacidades que varían entre los 2 m<sup>3</sup> y 100 m<sup>3</sup>.

De acuerdo con Botero & Preston<sup>5</sup>, el diseño de un BDG consiste básicamente de una recámara principal (bolsa de polietileno) que almacena la materia orgánica y el agua. La alimentación y las salidas tanto de biogás como de digerido se realizan mediante tubos de PVC conectados a la recámara principal. Para el almacenamiento del biogás producido se usa un reservorio tubular del mismo material del biodigestor. En la Figura 1 se muestra un esquema y un ejemplo real de un BDG.

---

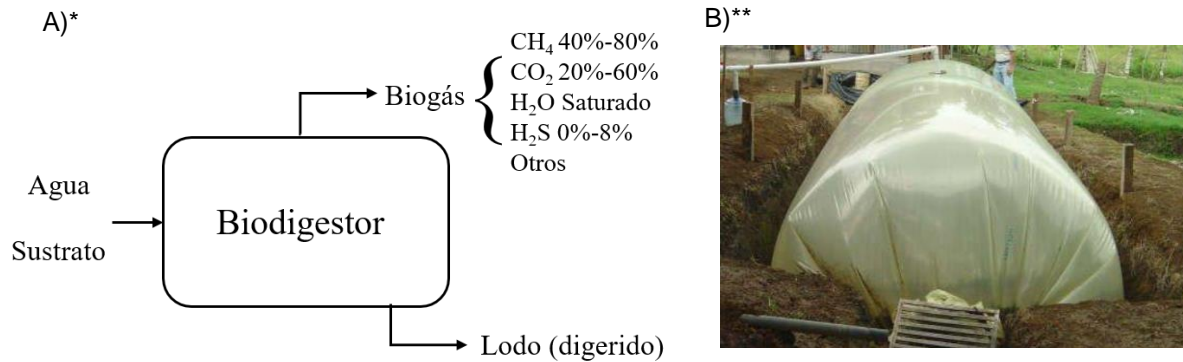
<sup>4</sup> HERRERO, Jaime, et al. Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biodigestores de pequeña y mediana escala en LAC. [En línea]. Septiembre, 2016. [Consultado 5 Sep. 2017] Disponible en:

< <http://www.cipav.org.co/pdf/BiodigestoresRedBioLAC.pdf> >

<sup>5</sup> BOTERO, Raúl., & PRESTON, Thomas. Biodigestores de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. [En línea]. 1987. [Consultado 10 Oct. 2017] Disponible en:

< <http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/04-biodigestores.pdf> >

Figura 1. Esquema BDG y Biodigestor de bajo costo



\* Esquema BDG \*\*Biodigestor

Fuente: (Agencia Andaluza de la Energía, 2011). (Mantilla, 2016).

Los BDG se construyen semienterrados en una zanja de dimensiones específicas para el perímetro de la recámara, como se observa en la Figura 1, se les adapta un arreglo tipo invernadero con el fin de aprovechar la energía solar, la cual contribuye a que el reactor mantenga una temperatura adecuada para que el proceso se lleve a cabo. Adicional a esto, y siguiendo a Botero & Preston<sup>6</sup>, cuentan con un sistema de agitación manual el cual consiste en un cable insertado de forma axial junto con un arreglo de tapas distribuidas a lo largo de este, que al ser halado produce turbulencia al interior del equipo. De esta forma se garantiza que los BDG no requieran fuentes adicionales de energía.

En el interior de los BDG se lleva a cabo un proceso microbiológico conocido como digestión anaerobia (DA), el cual como su nombre lo indica debe desarrollarse en ausencia de oxígeno. Resultado de la DA se obtiene un gas combustible (biogás) rico en metano (CH<sub>4</sub>) 40%-80% y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) 20%-60%, con algunas impurezas como el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) 0%-8% y el agua, este gas presenta características similares al gas natural. Otro subproducto de la DA es el lodo o

<sup>6</sup> Ibíd. Pág. 1

digerido que contiene la parte del sustrato que no se volatilizó. Según el Ministerio de Energía de Chile<sup>7</sup>, la DA se establece como un tecnología simple y eficaz para la estabilización de los residuos orgánicos producidos en las viviendas rurales que a su vez genera subproductos valiosos para su uso como fuente de energía y abono orgánico.

De esta forma, los BDG presentan beneficios técnicos, económicos y ambientales, por lo que se han convertido en una solución para suplir las necesidades energéticas de las zonas no interconectadas en países en vía de desarrollo como Colombia. De acuerdo con Garfí<sup>8</sup>, se estima que en el país hay más de 120 DBG instalados, sin embargo, el uso del biogás se ha limitado a la cocción de alimentos, debido a que los biodigestores no cuentan con sistemas de purificación del biogás que permitan eliminar el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y humedad para su uso en motores de combustión interna u otro tipo de procesos térmicos más complejos.

Evidenciando esta problemática y buscando adaptar las posibles soluciones existentes al entorno colombiano y de la región, se busca en el presente trabajo de grado diseñar construir e implementar una alternativa costo-efectiva de fácil operación que permita purificar el biogás producido en biodigestores de bajo costo. La purificación se centra en la eliminando de la mayor parte del contenido de sulfuro de hidrógeno y humedad, produciendo así un biogás de alta calidad que podrá ser utilizado de forma segura y más eficiente.

---

<sup>7</sup> CHILE. MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual de biogás. [En línea]. Chile, 2011. [Consultado 20 Oct. 2017] Disponible en: <Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf> >

<sup>8</sup> GARFÍ, Marianna, et al. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. [En línea]. Julio, 2016. [Consultado 02 Sep. 2017] Disponible en: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116001015> >

## COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

La composición del biogás presenta variaciones significativas dependiendo principalmente del sustrato utilizado, de las condiciones de operación y del manejo adecuado del equipo. En la Tabla 1 se presentan composiciones típicas del biogás. De los compuestos que conforman el biogás, el de principal interés es el CH<sub>4</sub> debido a que este gas otorga las propiedades combustibles a la mezcla, los demás componentes presentes son vistos como subproductos.

El H<sub>2</sub>S, presente en el biogás, a pesar de encontrarse en concentraciones muy bajas, merece especial interés debido a las diversas consecuencias negativas que trae su presencia. Según Fontenelle *et al*<sup>9</sup>, el H<sub>2</sub>S por sus características ácidas ocasiona fácilmente corrosión en metales ferrosos, es tóxico para el ser humano, incluso a concentraciones muy bajas. De acuerdo con La Organización Mundial de la Salud (OMS)<sup>10</sup>, una exposición a 250 ppm de H<sub>2</sub>S es suficiente para causar edema pulmonar con riesgo de muerte. Según Manahan<sup>11</sup>, cuando el biogás se somete a combustión, el H<sub>2</sub>S presente produce dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>); gas causante de la lluvia ácida ocasionando también afectación ambiental.

---

<sup>9</sup> FONTENELLE, Marcellus, et al. Evaluation of Corrosion Caused by the use of In Natura Biogas in Steam Generator Boilers of Carbon Steel Structural Elements. [En línea]. Brasil, 2017. [Consultado 10 Sep. 2017] Disponible en: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392017000300725&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392017000300725&script=sci_arttext) >

<sup>10</sup> ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Hydrogen sulfide: human health aspects. [En línea]. Suiza, 2003. [Consultado 15 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad53.pdf> >

<sup>11</sup> MANAHAN, Stanley . Introducción a la química ambiental. México: Reverté. [En línea]. México, 2007. [Consultado 22 Sep. 2017] Disponible en: <<http://blog.utp.edu.co/lilianabueno/files/2015/08/Introduccion-a-la-Quimica-Ambiental-S.-E.-Manahan2.pdf> >

Tabla 1. Componentes del Biogás en función del sustrato utilizado

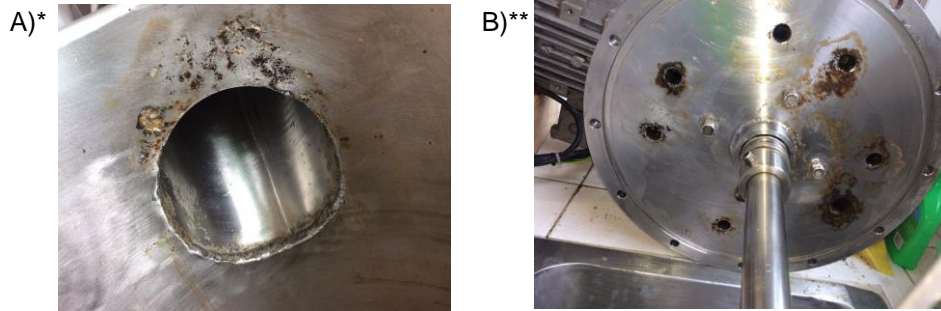
Componente	Residuos ganaderos	Residuos agrícolas	Fangos de depuradora	Residuos municipales	Gas de vertedero
Metano	50-80%	50-80%	50-80%	50-70%	45-60%
Dioxido de carbono	30-50%	30-50%	20-50%	30-50%	40-60%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-2%	0-5%	0-2%	0-0,2%
Sulfuro de hidrógeno	0-1%	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0-1%
Amoníaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	0,1-1%
Monoxido de carbono	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-0,2%
Nitrógeno	0-1%	0-1%	0-3%	0-1%	2-5%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0,1-1%
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	0,01-0,6%

Fuente: (Agencia Andaluza de la Energía, 2011).

Por otra parte y de acuerdo con Gabriel y Sierra<sup>12</sup>, aunque menos perjudicial, el contenido de agua en el biogás es otra de las características consideradas indeseables en este proceso, dado que la humedad disminuye el poder calórico del gas combustible y se combina con el H<sub>2</sub>S acelerando los procesos de corrosión. En la Figura 2, se muestra evidencia del proceso de corrosión causado por el biogás a los equipos periféricos de un biodigestor de laboratorio.

<sup>12</sup> GABRIEL, David y SIERRA, Hugo. Purificación y usos del biogás. Barcelona: [En línea]. España, 2017. [Consultado 13 Oct. 2017] Disponible en: <[https://books.google.com.co/books?id=K1loDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Purificaci%C3%B3n+y+usos+del+biog%C3%A1s&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Purificaci%C3%B3n+y+usos+del+biog%C3%A1s&f=false](https://books.google.com.co/books?id=K1loDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Purificaci%C3%B3n+y+usos+del+biog%C3%A1s&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Purificaci%C3%B3n+y+usos+del+biog%C3%A1s&f=false)>

Figura 2. Afectación de corrosión en equipo periférico biodigestor de laboratorio D.



\*Ducto de salía del biogás \*\*Agitador  
Fuente: Autor

Estas y otras características nocivas obligan a que en procesos de biodigestión a gran escala se realice purificación del efluente gaseoso. Sin embargo, a escalas menores como las actualmente abordadas por el grupo de DA de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS, no es común contar con sistemas de purificación debido principalmente al costo asociado a los mismo y la complejidad en su operación.

## MÉTODOS DE PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS

El problema del contenido del sulfuro de hidrógeno y humedad en un gas combustible no es nuevo ni exclusivo del proceso de DA, es un tema común en la industria del gas natural. Según Mokhatab, Poe y Mak<sup>13</sup>, por ello las tecnologías y métodos para eliminación de estos compuestos han sido ampliamente estudiados y actualmente son aplicadas con éxito. Sin embargo, los principales retos cuando se

---

<sup>13</sup> MOKHATAB, Saeid, POE, William y MAK, John. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Elsevier. [En línea]. Estados Unidos, 2015. [Consultado 12 Oct. 2017] Disponible en: <[https://books.google.com.co/books?id=xXKDBAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=handbook+natural+gas&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=handbook%20natural%20gas&f=false](https://books.google.com.co/books?id=xXKDBAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=handbook+natural+gas&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=handbook%20natural%20gas&f=false) >

busca aplicar las soluciones ya existentes al proceso de DA, son el factor económico, operación de los equipos y la adaptación a las condiciones del proceso.

Un sistema de purificación para biogás aplicado a BDG, requiere tratar flujos bajos a presión atmosférica y temperatura ambiente, con un costo de construcción y mantenimiento muy bajos. A continuación, en la Tabla 2 se presenta un resumen de los diferentes métodos para remoción de H<sub>2</sub>S de biogás, junto con sus principales características, estos métodos ya han sido probados con éxito, cada uno de ellos con particularidades técnicas y valores de pureza esperados diferentes.

Tabla 2. Métodos de eliminación de H<sub>2</sub>S del biogás

Método	Tipo de tecnología	Características	Concentración H <sub>2</sub> S alcanzada
Dosificación de oxígeno	Biológica	Inyección de oxígeno al digestor. Reduce el rendimiento del proceso.	20 – 100 ppm
Absorción con Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fisicoquímica	Lecho empacado de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Genera residuo no biodegradable.	< 1 ppm
Absorción con solución caustica	Fisicoquímica	Columna de burbujeo de NaOH. Compra continua de insumos.	≅ 0
Absorción con soluciones de hierro	Fisicoquímica	Adición de sales e Fe(OH) <sub>2</sub> al digestor. Compra continua de insumos.	100 – 200 ppm
Sistemas de absorción con solvente	Fisicoquímica	Absorción con solvente orgánico. Altos costos de operación.	≅ 0
Separación por membranas y Tamices moleculares	Física	Separación por diferencia de tamaño o polaridad. Costosa, requiere presión elevada.	Variable
Filtros biológicos	Biológica	Lecho microbiano con consumo de H <sub>2</sub> S. Requiere inyección de aire.	< 50 ppm
Carbón activado	Fisicoquímica	Absorción en lecho de carbón activado. Costosa.	≅ 0

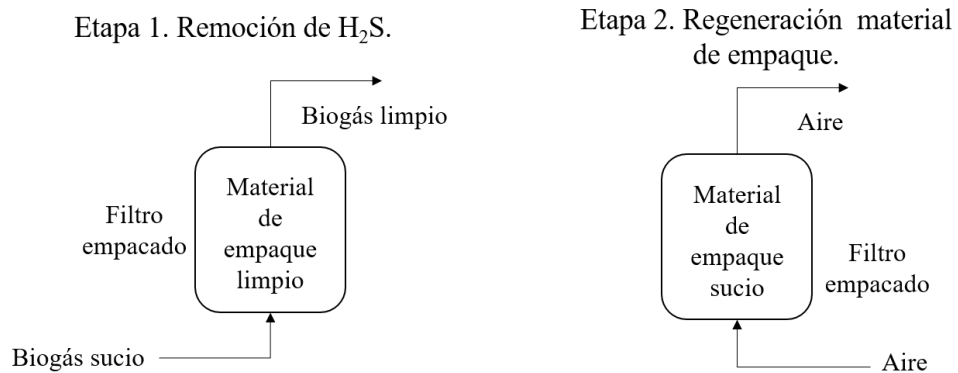
Fuente: (Allegue, 2014).

## REMOCIÓN DE H<sub>2</sub>S DE CORRIENTES DE BIOGÁS UTILIZANDO FE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Es una tecnología proveniente del tratamiento de gas natural, en la que se aprovecha el proceso de corrosión del H<sub>2</sub>S sobre los metales ferrosos, utilizando un material de sacrificio el cual es consumido preferentemente por el gas ácido

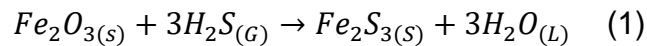
evitando la corrosión de los componentes valiosos del sistema. Según Díaz<sup>14</sup>, inicialmente el proceso era implementado con virutas de hierro (Fe), pero la investigación permitió determinar que la purificación es más efectiva cuando se realiza con óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). En la Figura 3 se esquematiza el proceso.

Figura 3. Esquema del proceso de remoción H<sub>2</sub>S por Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



Fuente: Autor

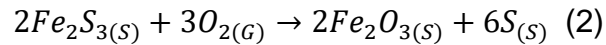
El material de sacrificio Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es dispuesto en forma de lecho empacado en una columna en la que se garantiza el contacto del gas con el sólido. Durante esta primera etapa ocurre la siguiente reacción:



En esta reacción (1), el óxido de hierro reacciona con el H<sub>2</sub>S presente en el biogás para producir sulfuro de hierro (Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), el cual es un sólido que permanece adherido

<sup>14</sup> DÍAZ, Manuel. Eliminación del sulfuro de hidrógeno en el biogás. [En línea]. Cuba, 2015. [Consultado 10 Sep. 2017] Disponible en: < <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia41/HTML/Articulo05.htm> >

al material de empaque. Según Siefers<sup>15</sup>, este proceso puede darse hasta que la actividad del filtro se vea atenuada. En la segunda fase ocurre un proceso de regeneración como lo muestra siguiente reacción.



De acuerdo con Allegue & Hinge<sup>16</sup>, en esta etapa el sulfuro de hierro producido al inicio se oxida espontáneamente con el oxígeno atmosférico produciendo óxido de hierro y azufre elemental. De esta forma el material de empaque se regenera y queda disponible para un nuevo ciclo, las características de las dos reacciones permiten que estas se lleven a cabo a las condiciones de presión y temperatura atmosféricas. El proceso de absorción regeneración puede darse hasta tres veces, debido al ensuciamiento por azufre del material de empaque.

## **ELIMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE CORRIENTES DE BIOGÁS**

Según el Ministerio de Energía de Chile<sup>17</sup>, se considera que la corriente de biogás que abandona el biodigestor se encuentra saturada de humedad, característica que como se mencionó previamente afecta el poder calórico e incrementa los efectos de corrosión del gas, para la eliminación del contenido de humedad de la corriente de biogás existe diversidad de métodos basados en la condensación y absorción por líquidos o sólidos higroscópicos.

---

<sup>15</sup> SIEFERS, Andrea. A novel and cost-effective hydrogen sulfide removal technology using tire derived rubber particles. [En línea]. Estados Unidos, 2010. [Consultado 25 Oct. 2017] Disponible en: < <http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2291&context=etd> >

<sup>16</sup> ALLEGUE, Laura & HINGE, Jørgen. Biogas upgrading. Evaluation of methods for H2S removal. [En línea] Dinamarca. Diciembre, 2014. [Consultado 9 Sep. 2017] Disponible en: <[https://www.teknologisk.dk/\\_/media/60599\\_Biogas%20upgrading.%20Evaluation%20of%20methods%20for%20H2S%20removal.pdf](https://www.teknologisk.dk/_/media/60599_Biogas%20upgrading.%20Evaluation%20of%20methods%20for%20H2S%20removal.pdf)>

<sup>17</sup> CHILE. MINISTERIO DE ENERGÍA. Op. cit., 61 p.

El gel de sílice es un material comúnmente usado en sistemas de deshumidificación a pequeña escala, tiene la capacidad de absorber hasta un 25% de agua p/p y su indicador de humedad (azul a rosado) permite conocer el momento en que se ha saturado. Según Chou<sup>18</sup>, el gel de sílice puede ser regenerada por tratamiento térmico y así sometida a numerosos ciclos de secado sin pérdida de capacidad de retención de humedad considerable.

---

<sup>18</sup> CHOU, Tse, et al. Selective Removal of H<sub>2</sub>S from Biogas by a Packed Silica Gel Adsorber Tower. [En línea]. Diciembre, 1986. [Consultado 02 Oct. 2017] Disponible en: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/btpr.5420020408/abstract;jsessionid=5E2DEA8FE52FD400BE153D704EB770D0.f04t03> >

## 1. METODOLOGÍA

El desarrollo de este trabajo se llevó a cabo en cuatro fases. La primera correspondió al diseño del sistema de purificación, en la segunda fase se procedió al dimensionamiento y construcción de la unidad, la tercera etapa consistió en realizar la puesta en marcha junto con el monitoreo del equipo y finalmente se realizó un análisis económico del sistema de purificación de biogás construido.

### 1.1. DISEÑO SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS

**1.1.1. Elaboración material de empaque.** El material de empaque debe ser económico, de fácil adquisición y reemplazo con una alta relación área interfacial/peso. Díaz<sup>19</sup> sugiere la utilización de virutas de hierro o lana de acero (esponjillas). El primer material usualmente no tiene costo, surge como subproducto en labores metalmecánicas, se considera de difícil acceso en áreas rurales y posee un área interfacial moderada, por su parte las esponjillas tienen un mayor costo, con área interfacial alta y fácil acceso, de esta forma se seleccionan las esponjillas de lana de acero como base para el material de empaque.

Las esponjillas de lana de acero se utilizan en labores domésticas para el lavado de utensilios de cocina, están formadas por un entramado de hilos finos de acero inoxidable con una masa de 9 g a 10 g como se muestra en la Figura 4.

---

<sup>19</sup> DÍAZ, Manuel. Op. cit.,

Figura 4. Esponjilla de lana de acero



Fuente:<http://jorgemariouribe.com/tienda/image/cache/data/ESPONJILLA%20BRILLO%20COBRA%20X%206-500x500.jpeg>

La esponjilla de lana de acero está diseñada para no formar óxidos fácilmente al estar en contacto con la humedad y el aire. Para su oxidación se establece un procedimiento basado en baño ácido y secado con aireación natural, el cual elimina la fase protectora del material permitiendo la oxidación por el oxígeno atmosférico. Se seleccionó ácido muriático comercial (ácido clorhídrico diluido), como fuente de acides.

Las pruebas se realizaron con 4 marcas diferentes y ácido clorhídrico fumante al 37% p/p de pureza como control. La reacción de oxidación se llevó a cabo a temperatura y presión ambiente (298 K y 101.325 Pa) en un recipiente de vidrio de 50 ml sellado con agrafe de aluminio y tapón de nitrilo. Se agregó 1 g de lana de acero y 32 ml de solución ácida. Se prepararon 6 soluciones de ácido en agua destilada a diferentes concentraciones volumétricas: 100% ácido, 50%, 25%, 10%, 5% y 2,5% con el propósito de determinar la concentración adecuada para la elaboración del óxido conservando la integridad estructural del material. Los experimentos se realizaron por triplicado con un tiempo de reacción de 15 minutos, como variable respuesta se tuvo en cuenta el porcentaje de pérdida de masa. La descripción detallada del montaje se encuentra en el Anexo 1.

**1.1.2 Método de cuantificación de H<sub>2</sub>S.** Se seleccionó un sensor electroquímico MQ 136, con medición selectiva para H<sub>2</sub>S, como el mostrado en la Figura 5. Según Gong *et al*<sup>20</sup>, este tipo de sensor tiene como principio de funcionamiento la variación en la conductividad del electrodo a un voltaje constante (4 V), causada por la reacción del analito (H<sub>2</sub>S) con la fase activa del sensor (SnO<sub>2</sub>). Permite cuantificar pequeños cambios en la concentración del gas en un rango de medición bajo, que según el modelo se encuentra entre 0 a 100 ppm o 0 a 200 ppm de H<sub>2</sub>S, la ficha técnica del sensor con las especificaciones de diseño se encuentra en el Anexo 2.

Figura 5. Sensor MQ136.



Fuente: <https://ae01.alicdn.com/kf/HTB16DoGRVXXXcAXVXXq6xXFXXXH/Modules-2017-New-High-Quality-MQ-136-Module-the-font-b-H2S-b-font-font-b.jpg>

La principal falencia de ese tipo de sistemas es la vulnerabilidad de contaminarse por gases diferentes al analito. Por lo anterior, se recomienda someter al dispositivo a un periodo de calentamiento previo a la medición. Este tipo de sensores, poseen una vida útil larga y estable con rápida respuesta y alta sensibilidad.

---

<sup>20</sup> GONG, Jianwei, et al. Micromachined nanocrystalline silver doped SnO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>S sensor. [En línea]. Marzo, 2006. [Consultado 02 Sep. 2017] Disponible en: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400505004107> >

**1.1.3 Caracterización del material de empaque.** Con el fin de determinar las diferencias cuantitativas y cualitativas de las fases cristalinas presentes en cada una de las muestras de óxido elaboradas, se sumergen aproximadamente 10 g de lana de acero por 15 minutos en una dilución al 2,5% en volumen del ácido en agua destilada, permitiendo su secado posterior por aireación natural en un periodo de 24 horas.

Las muestras fueron molturadas y homogenizadas manualmente en mortero de ágata hasta obtener un polvo fino color herrumbre con presencia de hilos cortos de lana de acero, el cual fue llevado a un tamaño de partícula menor a  $38\mu\text{m}$  (400 mesh) por tamizado.

Se realizó un análisis de Difracción de Rayos X (DRX), mediante un difractómetro marca Bruker modelo D8 Advance con geometría DaVinci, las condiciones específicas y resultados del análisis se encuentran en el Anexo 3. Esta prueba fue desarrollado en el laboratorio de DRX de la UIS.

**1.1.4 Construcción equipo de sensado.** Los sensores MQ tienen como base de funcionamiento tarjetas tipo Arduino®, se trata de una plataforma de hardware y software con código abierto la cual permite desarrollar programas que pueden ser cargados a tarjetas de microcontroladores y así elaborar prototipos electrónicos. Se fijó como objetivo para el desarrollo de la unidad de sensado tiempos autónomos de medición prolongados (semanas o meses) con capacidad para almacenamiento de datos y presentación en pantalla de valores en tiempo real.

Esta sección contó con la participación del estudiante Jose Luis Salamanca de la escuela de Ingeniería Electrónica de la UIS, quien se encargó de la elaboración del hardware y asesoramiento con la escritura del código. Para la construcción se requirió de una tarjeta Arduino® Mega 2560 (Figura 6), una pantalla LCD, una tarjeta

micro SD para Arduino®, una memoria micro SD, una placa de baquelita, un control remoto de radio frecuencia, cables planos, una caja de derivación y un convertidor AC a DC. La lista detallada de materiales junto con el código programado se encuentra en el Anexo 4 y 5 respectivamente.

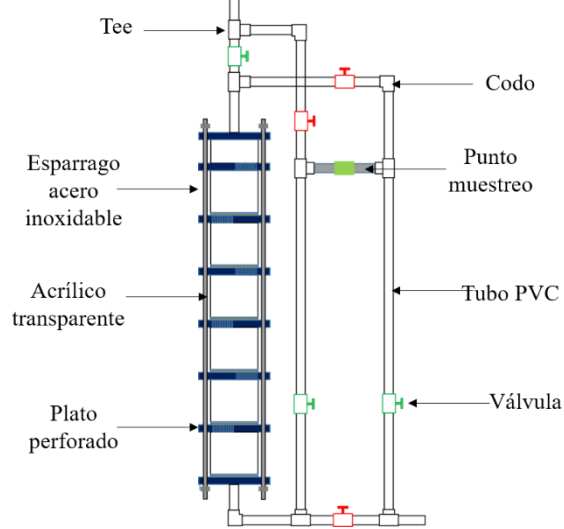
Figura 6. Tarjeta Arduino® Mega 2560.



Fuente: [https://paruro.pe/sites/default/files/ArduinoMega2560\\_R3\\_Front.jpg](https://paruro.pe/sites/default/files/ArduinoMega2560_R3_Front.jpg)

**1.1.5 Diseño mecánico del equipo de purificación de biogás.** El equipo consiste en una columna empacada semi ordenada, estructurada en módulos, cada etapa o módulo está conformada por un plato perforado y una carcasa tubular. Las secciones se insertan perpendicularmente en el plato inferior y superior haciendo sello por medio de un empaque plástico y se mantienen unidas entre sí por cuatro espárragos que atraviesan la estructura. La unidad cuenta con un único punto de muestro y un juego de válvulas periféricas que según su posición permiten modificar la corriente analizada, inicio o salida del equipo según convenga. El diseño detallado del equipo se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Diseño mecánico equipo de purificación.



Fuente: autor

## 1.2 FASE 2: DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN

**1.2.1 Dimensionamiento.** Las variables necesarias para el dimensionamiento del equipo son el flujo de biogás, contenido de  $H_2S$ , material de empaque y tiempo de funcionamiento autónomo deseado. En este caso el equipo fue instalado en un BDG construido previamente por el grupo de DA de la UIS, en la finca Marsella, ubicada a 9 km del casco urbano de Girón Santander. Según Mantilla y Rojas<sup>21</sup>, este biodigestor funciona a base de estiércol bovino y aguas lluvias, con producción promedio de biogás de  $0,9 \text{ m}^3/\text{día}$ .

El contenido de fase activa en el material de empaque elaborado es obtenido del proceso de caracterización por DRX. De acuerdo con Rasi<sup>22</sup>, se fija un tiempo

<sup>21</sup> MANTILLA, Laura y ROJAS, Gustavo. Implementación de un reactor rural para la digestión anaerobia de estiércol bovino en la finca marcella. Trabajo de grado Ingeniería Química. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Fisicoquímicas. 2015.

<sup>22</sup> RASI, Saija, VEIJANEN, A y RINTALA, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. [En línea]. Agosto, 2007. [Consultado 25 Oct. 2017] Disponible en: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544206003033>

autónomo de funcionamiento de 6 meses (180 días) para remoción de H<sub>2</sub>S y 15 días eliminación de humedad. La concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás se estableció en 169 ppm, siendo este valor el más alto reportado en la literatura. Adicionalmente, se supone el flujo de biogás saturado en humedad, utilizando un factor de sobredimensionamiento del 200%.

**1.2.2 Construcción de la unidad de purificación.** La estructura de cada etapa está formada por un tubo acrílico transparente de 10 cm de diámetro por 10 cm de altura y 3mm de espesor. Los platos de 15 cm, se construyeron en polietileno de alta densidad perforados con 26 agujeros de 5/24” distribuidos en media circunferencia. Cada plato posee un canal de 4 mm de profundidad y 3 mm de espesor torneado en ambas caras, en donde se introduce un o-ring de caucho (junta tórica) encargado de garantizar el sello hermético.

Adicionalmente los platos cuentan con cobertura de malla de acero y tela absorbente, la estructura está unida transversalmente por 4 espárragos de acero inoxidable, con bases cuadradas de acero al carbón de 15 cm, tubería periférica y válvulas de PVC soldadas, el punto de muestreo está construido en acero inoxidable 304 grado alimenticio.

El tubo acrílico transparente permite ver la evolución del proceso. Sin embargo, se recomienda utilizar tubo de PVC debido a su menor costo. El listado detallado de componentes se encuentra en el Anexo 6. En esta sección se contó con la asesoría técnica del ingeniero mecánico Franklin Patiño.

### **1.3 FASE TRES: PUESTA EN MARCHA Y MONITOREO SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS**

**1.3.1 Instalación.** La instalación del módulo se realizó a una distancia de 2,5 m del biodigestor, ubicado entre el equipo y el reservorio de gas. La conexión se debe realizar lo más cerca posible al biodigestor, debido a que en este punto el biogás posee una mayor presión. El flujo de biogás a través del filtro genera una caída de presión que podría evitar el llenado efectivo de los reservorios. La unidad se mantuvo bajo techo, con el propósito de evitar la afectación por humedad de los componentes electrónicos.

**1.3.2 Monitoreo.** Se monitoreó la unidad durante 14 días revisando las condiciones físicas generales del equipo, buscando identificar posibles fallos o deficiencias no consideradas durante el diseño. La toma de datos se realizó de forma continua en periodos de 7 días, alternando el punto de muestreo para el biogás iniciando con las condiciones de entrada y posteriormente las de salida. Se trabajó con una frecuencia de almacenamiento de datos de 120 segundos. De esta forma se obtuvo la composición promedio de H<sub>2</sub>S en la corriente de biogás antes y después de ser purificada.

### **1.4 FASE CUATRO: ANÁLISIS ECONÓMICO SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS**

Basado en los resultados experimentales y los costos asociados a la compra de materiales y mano de obra para la construcción de la unidad de purificación de biogás, se elaboró un análisis económico calculando los costos operación y mantenimiento (OPEX) y costo de fabricación (CAPEX). Los costos están basados

en precios del mercado colombiano para el año 2017 y se transforman a USD utilizando una TRM de \$3.000 COP/USD.

## 2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 2.1. DISEÑO SISTEMA PURIFICACIÓN DE BIOGÁS

**2.1.1. Elaboración material de empaque.** Las 4 marcas de ácido muriático utilizadas se seleccionaron de forma aleatoria buscando garantizar que la elaboración del material de empaque no dependa del uso de una marca en particular. Aunque no se realizó un análisis fisicoquímico, las pruebas permitieron determinar que no todos los productos vendidos como ácido muriático están elaborados a partir de ácido clorhídrico. Esta inferencia se hace de la observación cualitativa del proceso de baño ácido.

Los ensayos de oxidación con la marca 1 presentaron cambio de color en la solución. La reacción llevada a cabo con el ácido muriático de la marca 2 fue exotérmica y emitió un gas de olor fétido e irritante. Con respecto a la marca 3 no se presentaron cambios en el color de la solución ni desprendimiento apreciable de calor.

En las pruebas realizadas con la marca 4 se observó el desprendimiento de vapores color herrumbre. El control no presentó variación de color ni desprendiendo de calor comportándose de forma similar al ácido muriático de la marca 3. La Figura 8 muestra un registro fotográfico de los cupones de lana de acero oxidados.

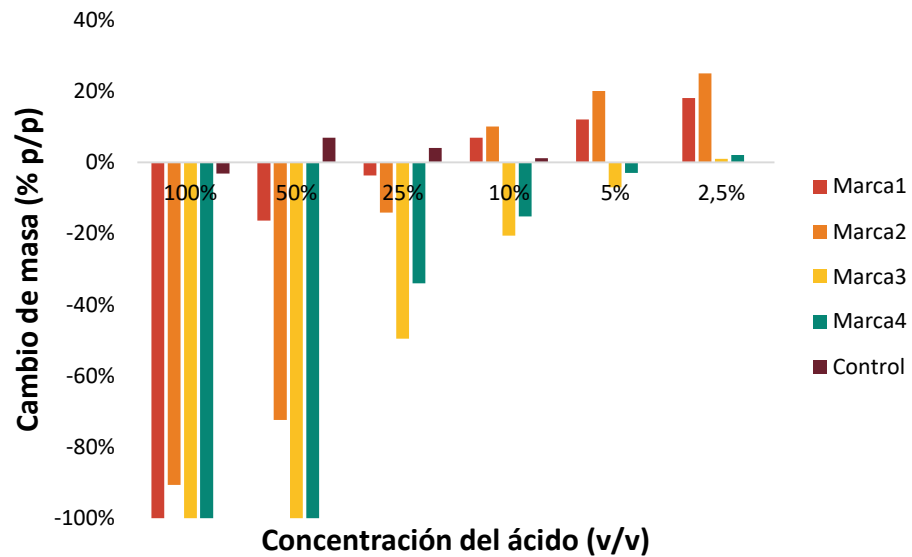
Figura 8. Cupones de lana de acero oxidados usando diferentes ácidos.



Fuente: autor

Las pruebas realizadas según lo descrito en el numeral 2.2.1. permitieron establecer la cantidad mínima de ácido muriático comercial a ser usada durante la elaboración del material de empaque. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 9.

Figura 9. Cambio de masa en la muestra sometida a oxidación.



Fuente: autor

Se evidenció que todas las muestras elaboradas a partir de ácido comercial presentaron reducción en la masa posterior a su preparación para concentraciones de ácido iguales o superiores al 25% v/v. En concentraciones del 100% y 50% v/v de las Marcas 1 y 2 se observó 100% de pérdida en la masa del material. A concentración de ácido del 2,5% v/v se consigue un cambio de masa positivo en todas las muestras.

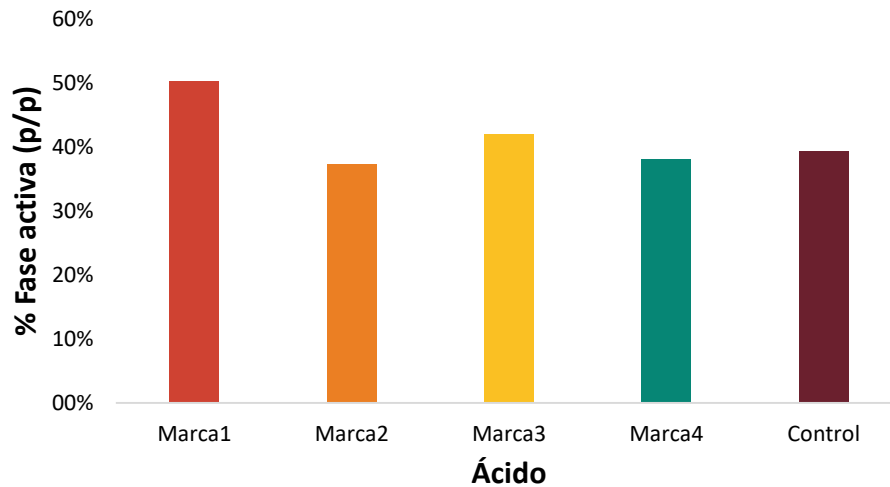
El Control presentó un comportamiento independiente con una pérdida de masa máxima del 3% a una concentración del 100% v/v y una ganancia de masa máxima del 7% a concentración del 50% v/v.

La selección de la concentración de ácido se realizó teniendo en cuenta dos parámetros: a) el menor porcentaje de pérdida de masa y b) la integridad estructural del material elaborado.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se estima que la mínima concentración de ácido muriático comercial necesaria para llevar a cabo el proceso de oxidación es del 2,5% en volumen. Por lo tanto, se requieren 0,8 ml de ácido y 31,2 ml de agua por gramo de material a tratar. Para efectos prácticos se aproxima el valor a 1 ml de ácido y 31 ml de agua, es decir 10 ml de ácido/esponjilla y 310 ml de agua/esponjilla, a esta concentración se obtiene un material con cierto grado de flexibilidad que permite ser manipulado sin pérdidas considerables de óxido.

**2.1.2. Caracterización material de empaque.** El material obtenido del proceso de oxidación con una concentración de 2,5% v/v de solución ácida fue caracterizado por DRX, el resumen de los resultados de muestra en la Figura 10.

Figura 10. Porcentaje de fase activa en el material de empaque.



Fuente: autor

Se considera fase activa a la suma de todos los óxidos de hierro cristalinos presentes en la muestra, el porcentaje máximo de fase activa encontrado fue de 53% p/p y el mínimo de 29% p/p con un valor promedio del 41% p/p. Se concluye que el proceso diseñado para la elaboración de óxido de hierro a partir esponjilla de lana de acero y ácido muriático comercial es una forma efectiva de obtener material de empaque para la purificación de biogás.

Las pruebas de DRX permitieron identificar la formación de una familia de óxidos de hierro. En total se encontraron 8 óxidos diferentes, el más abundante de ellos fue la Lepidocrocita  $\text{Fe}+3\text{O}(\text{OH})$ , seguido por la Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y la Magemita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Según Teja y Koh<sup>23</sup>, la variabilidad en las composiciones se debe a que la síntesis de óxidos es un proceso muy difícil de controlar, debido a que ligeros cambios en las condiciones de elaboración o la estructura misma del material precursor derivan en la formación de compuestos diferentes.

<sup>23</sup> TEJA, Aryn. S & KOH, Pei. Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles. [En línea]. Junio, 2009. [Consultado 13 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960897408000168>>

Debido a que la absorción del H<sub>2</sub>S presente en el biogás ocurre al darse la reacción entre la fase activa del material de empaque y el gas ácido, es importante describir correctamente la cinética de las reacciones llevadas a cabo. Sin embargo, la literatura es limitada con respecto a la cinética de estas reacciones, debido al alto nivel de especificidad de cada uno de los óxidos obtenidos. Por lo anterior, para efectos de este trabajo de investigación se decidió representar la familia de óxidos mediante un único compuesto con cinética de reacción conocida.

En este caso se eligió la Magemita, tercer óxido más abundante en las muestras, dado que, según Díaz<sup>24</sup> y Lorente<sup>25</sup>, es la molécula modelo utilizada en los textos de purificación de gas natural y biogás al describir el proceso de absorción con óxido de hierro.

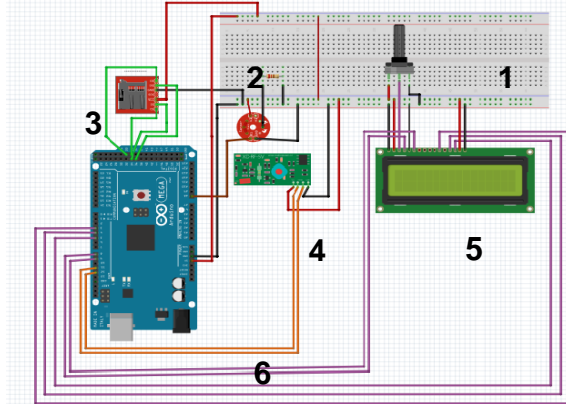
**2.1.3. Equipo de sensado.** En la Figura 11 se muestra el diseño esquemático del equipo de sensado, el diagrama de circuitos de la unidad se encuentra en el Anexo 8.

---

<sup>24</sup> DÍAZ, Manuel. Op. cit.,

<sup>25</sup> LORENTE, J. P. Desulfuración de gas de síntesis a alta temperatura y presión por absorción en óxidos regenerables. [En línea]. 2010. [Consultado 22 Sep. 2017] Disponible en: <<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6424/07CAPITULO2.pdf?sequence=7>>

Figura 11. Equipo de sensado continuo de H<sub>2</sub>S.



Donde:

- 1) Potenciómetro (resistencia variable).
- 2) Sensor MQ136.
- 3) Módulo de tarjeta Micro SD.
- 4) Módulo de radio frecuencia.
- 5) Pantalla LCD.
- 6) Arduino® Mega 2560.

Fuente: autor

La señal emitida por el sensor y recibida por la tarjeta de microcontroladores es traducida en una señal analógica que puede variar entre 0 y 1023. Según Rodríguez y Rumbo<sup>26</sup>, para transformar esta medida en un valor de concentración de H<sub>2</sub>S, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración con patrones el cual no pudo ser realizado, de modo que se identificó el punto cero del sensor haciendo pasar nitrógeno grado analítico y se supuso una relación lineal entre la concentración de H<sub>2</sub>S y el valor de la señal analógica como sugieren trabajos anteriores realizados con el mismo tipo de sensor.

El código elaborado permite variar entre cuatro modos básicos de funcionamiento utilizando el control remoto de radio frecuencia. El modo A muestra y almacena los valores de concentración de H<sub>2</sub>S en ppm, el modo B la frecuencia en la toma de datos, el modo C el tiempo de energizado del equipo y el modo D muestra los valores analógicos de la concentración de H<sub>2</sub>S. Estos modos pueden ser modificados mediante la escritura del código. En la Figura 12 se muestra el equipo construido.

<sup>26</sup> RODRIGUEZ, Cesar y & RUMBO, Jamel. Implementación de un sensor para la detección y cuantificación de H<sub>2</sub>S en gases de pirólisis de llantas. Trabajo de grado Ingeniería Química. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físicoquímicas. 2015.

Figura 12. Equipo medición de H<sub>2</sub>S.



Fuente: autor

## 2.2. DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS

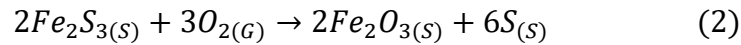
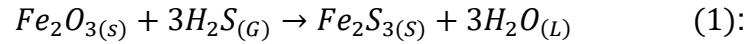
**2.2.1. Dimensionamiento sistema de purificación de biogás.** Con el porcentaje de fase activa, el flujo de biogás y la concentración de H<sub>2</sub>S se realizó el dimensionamiento de la unidad. Se fijó la temperatura ambiente en 25°C y la presión en 101.325 Pa. Los valores de entrada y parámetros utilizados se encuentran en la Tabla 3. En el Anexo 7 se encuentran los cálculos detallados.

Tabla 3. Valores de entrada y parámetros utilizados durante el proceso de dimensionamiento.

Valores de entrada			Parámetros		
Nombre	Valor	Unidades	Nombre	Valor	Unidades
Flujo de biogás	0,9	m <sup>3</sup> /día	Peso molecular Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	160	g/mol
Concentración entrada H <sub>2</sub> S	169	ppm	Peso molecular H <sub>2</sub> O	18	g/mol
Tiempo de funcionamiento autónomo	180	días	Porcentaje absorción de sílice	25%	% p/p
Factor sobredimensionamiento	200%	%	Densidad sílica gel	0,64	g/cm <sup>3</sup>
Porcentaje fase activa	29%	% p/p			

Fuente: autor

Partiendo de las reacciones (1) y (2):



Flujo de H<sub>2</sub>S:

$$F_{H_2S} = \frac{F_{Bg} * C_{H_2S}}{1.000.000} = \frac{0,9 \frac{m^3}{día} Bg * 169 ppm H_2S}{1.000.000} = 1,52 * 10^{-4} \frac{m^3 H_2S}{día}$$

Dónde:

F<sub>H<sub>2</sub>S</sub>: Flujo de H<sub>2</sub>S (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>S/día)

F<sub>Bg</sub>: Flujo de biogás (m<sup>3</sup>/día)

C<sub>H<sub>2</sub>S</sub>: Concentración de H<sub>2</sub>S a la entrada del equipo.

Requerimiento estequiométrico de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:

$$N_{Fe_2O_3} = eq_{\frac{Fe_2O_3}{H_2S}} * N_{H_2S} = 3 \frac{mol Fe_2O_3}{mol H_2S} * 6,22 * 10^{-3} \frac{mol H_2S}{día} \\ = 2,07 * 10^{-3} \frac{mol Fe_2O_3}{día}$$

Dónde:

N<sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>: Requerimiento molar de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (mol Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/día)

eq<sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>: coeficiente estequiométrico Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>S

N<sub>H<sub>2</sub>S</sub>: Flujo molar de H<sub>2</sub>S.

Requerimiento material de empaque:

$$ME = \frac{FA}{\%FA} = \frac{119,4 g Fe_2O_3}{29\%} = 411,6 g \text{ Material empaque}$$

Dónde:

ME: Material de Empaque (g Material empaque)

FA: Requerimiento de Fase Activa

%FA: Porcentaje de fase activa (p/p) presente en el material.

Número de esponjillas requeridas:

$$ER = \frac{ME}{PE} * (1 - \%AM) = \frac{411,6 \text{ g Material empaque}}{9,42 \frac{\text{g}}{\text{Esponjilla}}} * (1 - 17\%)$$
$$= 36,3 \text{ Esponjillas} \cong 36 \text{ Esponjillas}$$

Dónde:

ER: Esponjillas Requeridas (Unidades)

PE: Masa de una esponjilla

%AM: Porcentaje de aumento en la masa del material de empaque.

Agua a absorber:

$$A = N_{H_2S} * M_{H_2O} \left( eq_{\frac{H_2O}{H_2S}} + \frac{HU_{Bg}}{1.000} \right)$$
$$= 6,22 * 10^{-3} \frac{\text{mol} H_2S}{\text{día}}$$
$$* 18 \frac{\text{g} H_2O}{\text{mol}} \left( 1 \frac{\text{mol} H_2O}{\text{mol} H_2S} + 19,96 \frac{\text{g} H_2O}{\text{kg} Bg} * \frac{1}{1.000} \right) = 13,33 \text{ g} \frac{H_2O}{\text{día}}$$

Dónde:

A: Flujo de agua (g H<sub>2</sub>O)

HU<sub>Bg</sub>: Humedad del biogás (gH<sub>2</sub>O/kgBg).

Requerimiento gel de sílice:

$$SG = \frac{A}{\%AbsorciónSG} * fs * TrS * \%A_{H_2O} = \frac{13,33 \frac{\text{g}}{\text{día}}}{25\%} * 200\% * 10 \text{ días} * 0,5$$
$$= 533 \text{ g gel de sílice}$$

Dónde:

SG: Requerimiento gel de sílice (g)

TrS: Tiempo de recambio para el gel de sílice

%A<sub>H<sub>2</sub>O</sub>: Porcentaje de absorción de agua deseado.

Esponjillas por etapa:

$$E = \frac{ER}{E_{Etapa}} = \frac{36 \text{ Esponjillas}}{6 \text{ Etapas}} = 6 \frac{\text{Esponjillas}}{\text{Etapa}}$$

Dónde:

E: Esponjillas por etapa (Unidades/ etapa).

Previamente se determinó que la altura generada por 6 esponjillas es de 10 cm aproximadamente.

Altura útil

$$H = H_{Esponjilla} + h = 60 \text{ cm} + 10 \text{ cm} = 70 \text{ cm}$$

Dónde: H: Altura del equipo (cm).

Los cálculos anteriores permiten establecer que la unidad de purificación de biogás tiene un tamaño de 70 cm de altura útil y un diámetro de 10 cm, permitiendo su portabilidad e instalación en forma modular. Las características más importantes del equipo se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Características principales de la unidad purificación de biogás.

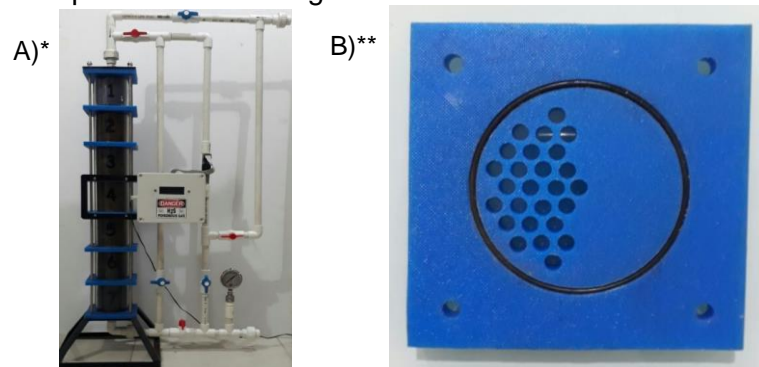
<b>Condiciones de operación</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Flujo biogás	0,9	m <sup>3</sup> /día
Concentración de entrada de H <sub>2</sub> S	163	ppm
Humedad	Saturado	-
<b>Dimensiones del equipo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Diámetro	10	cm
Altura fase activa	70	cm
Periodo de regeneración esponjilla	180	días
Periodo de regeneración esponjilla	10	días
Número de etapas	7	unidades
Fase activa	412	g
Gel de sílice	500	g

Fuente: autor

Se creó una hoja de cálculo que, a partir del flujo de biogás y tipo de sustrato empleado, estima la dimensión del equipo, de forma que para la instalación de nuevos BDG o el cambio en los parámetros de operación del ya existente, se pueda modificar o construir fácilmente una nueva unidad de purificación.

**2.2.2 Construcción sistema de purificación de biogás.** En la Figura 13 se muestra la unidad de purificación de biogás construida.

Figura 13. Unidad de purificación de biogás construida.



\*Equipo de purificación    \*\*Vista frontal de plato perforado  
Fuente: autor

Adicional al cuerpo del filtro se requirió construir una base en forma de pirámide truncada como la observada en la figura que permite soportar la estructura. El módulo tiene un peso aproximado de 10 kg, que facilita trasladar la unidad sin dificultades. En el Anexo 10 y 11 se adjuntan los planos del equipo y el manual de ensamblaje y operación del equipo.

## 2.3 PUESTA EN MARCHA SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS

**2.3.1 Instalación sistema de purificación de biogás.** El sistema fue instalado según lo previsto realizando un corte en la tubería de conducción de biogás acoplado la unidad de purificación por medio de uniones universales, fue necesario tender cerca de 50 m de cableado eléctrico de una fuente de 120 voltios para proveer de energía al sistema. En la Figura 14 se muestra el equipo instalado.

Figura 14. Equipo de purificación de biogás instalado en BDG finca Marcella.

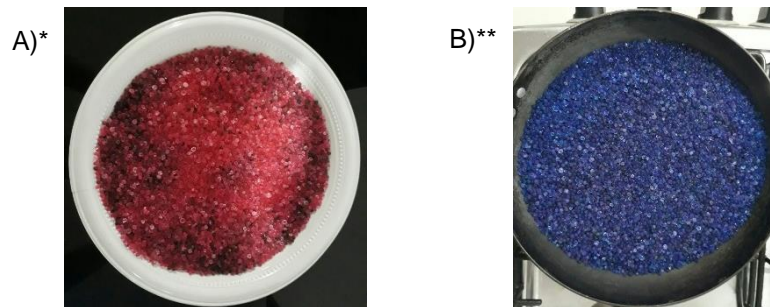


\*Vista frontal \*\*Vista lateral  
Fuente: autor

**2.3.2 Monitoreo sistema de purificación de biogás.** El proceso de monitoreo se realizó durante 14 días de forma continua. Los primeros siete días, por medio del posicionamiento del sistema de válvulas, se midió la composición de biogás a la entrada del equipo. A partir del octavo día se invirtió la posición de las válvulas para medir la composición a la salida del equipo.

Luego del muestreo se retiró el gel de sílice para su regeneración y cuantificación de humedad retirada al biogás. En la Figura 15 se muestra el cambio de coloración del material húmedo y seco respectivamente, antes y después de su regeneración por calentamiento.

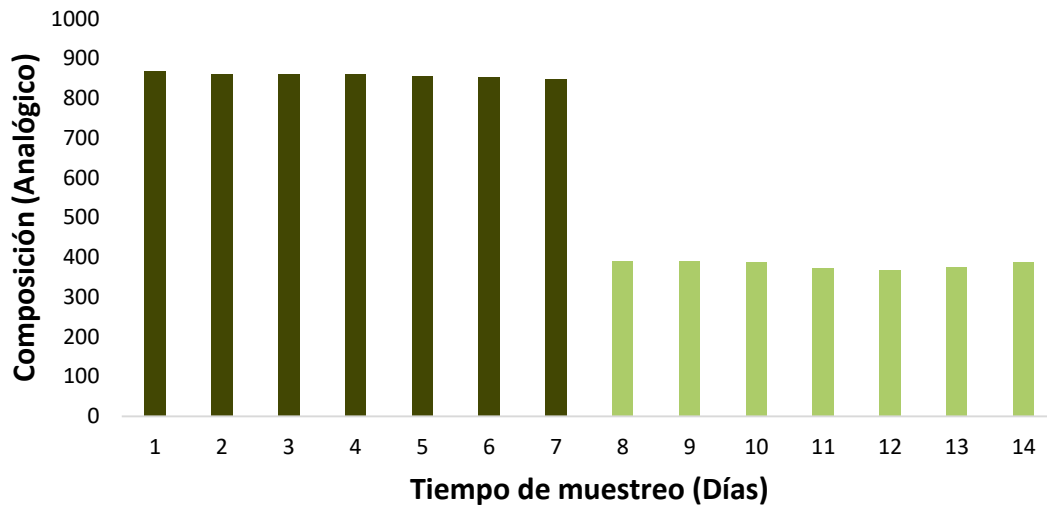
Figura 15. Cambio de coloración material húmedo y seco



\*Material extraído de la unidad    \*\*Material regenerado  
Fuente: autor

Se evidenció un aumento en la masa del gel de sílice de 63 g lo que corresponde a un porcentaje de remoción de humedad de 47,3% respecto a los valores teóricos. Referente a la concentración de  $H_2S$ , en la Figura 16 se muestra el resultado del proceso de monitoreo.

Figura 16. Composición de H<sub>2</sub>S en flujo de biogás BDG finca Marcella.



Fuente: autor

En la Figura 16 se presenta la composición de H<sub>2</sub>S durante el periodo de muestreo. Los primeros 7 días se registró un promedio de 859 (máximo de 869 y mínimo de 850). La composición a la salida del equipo registro un promedio de 382 (máximo de 392 y mínimo de 369) (ver Figura 15). El porcentaje de remoción de H<sub>2</sub>S del biogás se calculó así:

$$\%Re = \frac{(S_I - S_0) - (S_F - S_0)}{S_I - S_0} * 100 = \frac{(859 - 80) - (382 - 80)}{859 - 80} * 100 = 61,14\%$$

Dónde:

% Re = porcentaje remoción de H<sub>2</sub>S.

S<sub>I</sub>: Señal la entrada del equipo.

S<sub>F</sub>: Señal a la salida del equipo.

S<sub>0</sub>: Señal del equipo en aire limpio.

La remoción de 61,14% de H<sub>2</sub>S demuestra una buena efectividad del equipo para limpiar el biogás de este compuesto.

## **2.4 ANÁLISIS ECONÓMICO SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS**

El Costo capital (CAPEX) asociado a la construcción de la unidad de purificación y sensor de H<sub>2</sub>S fue de USD \$386,24 con una vida media esperada de los componentes de 4 años, sumando la mayor parte del valor los costos de materiales USD \$149,24 y mano de obra USD \$160, mientras que el costo operacional (OPEX) fue tan solo de USD \$21,6/año, siendo el consumo de energía eléctrica el principal aportante a este valor USD \$8/año, el cálculo detallado del CAPEX y OPEX se encuentra en el Anexo 12.

De esta forma se logra cumplir con el objetivo de construir un equipo a un precio accesible para las poblaciones rurales que se adapte a las características socioeconómicas de la región y el país. El CAPEX y OPEX de la unidad pueden reducirse significativamente a USD \$30 y USD \$6,4/mes respectivamente, simplificación el diseño y no midiendo la composición de H<sub>2</sub>S en el biogás. Se puede ofrecerse la alternativa de un equipo más robusto como el elaborado en el presente trabajo o una unidad simplificada más económica según las características particulares del proyecto lo demanden.

### 3. CONCLUSIONES

- La unidad de purificación construida permite eliminar un 61,14% de H<sub>2</sub>S y 47,3% de humedad; constituyéndose en una alternativa satisfactoria para la purificación de biogás proveniente de biodigestores de bajo costo.
- El baño con ácido muriático al 2,5% v/v y secado por aireación natural permite inducir oxidación de forma acelerada y efectiva en la lana de acero, siendo una alternativa técnica y económicamente factible para la elaboración de material de empaque para purificación de biogás aplicada a biodigestores de bajo costo.
- La unidad de purificación de biogás construida posee un CAPEX de USD \$386,24 y un OPEX de USD \$21,6/año constituyendo una solución viable económicamente para la purificación del biogás de los biodigestores de bajo costo.

#### 4. RECOMENDACIONES

- Elaborar la curva de calibración del sensor para obtener valores de concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás.
- Estudiar las condiciones de elaboración del material de empaque buscando maximizar el porcentaje de fase activa y reducir la variabilidad en los óxidos formados.
- Investigar detalladamente la cinética de reacción entre el H<sub>2</sub>S y la familia de óxidos formados.
- Probar con otros sensores de la familia MQ para determinar si la unidad de filtrado tiene influencia en la composición de otros contaminantes como el CO o el NH<sub>3</sub>.
- Evaluar el aislamiento eléctrico del equipo de sensado con una fuente de corriente independiente que permita su uso en zonas con dificultades en el flujo eléctrico.
- Evaluar el desempeño de otras unidades variando el diseño mecánico de las mismas.
- Construir una cocina solar para regenerar el gel de sílice sin consumo de biogás.

## BIBLIOGRAFÍA

Agencia Andaluza de la Energía. Estudio básico del biogás. [En línea] España. Septiembre, 2011. [Consultado 9 Sep. 2017] Disponible en: <[https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio\\_basico\\_del\\_biogas\\_0.pdf](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio_basico_del_biogas_0.pdf) >

ALLEGUE, Laura & HINGE, Jørgen. Biogas upgrading. Evaluation of methods for H<sub>2</sub>S removal. [En línea] Dinamarca. Diciembre, 2014. [Consultado 9 Sep. 2017] Disponible en: <[https://www.teknologisk.dk/\\_/media/60599\\_Biogas%20upgrading.%20Evaluation%20of%20methods%20for%20H2S%20removal.pdf](https://www.teknologisk.dk/_/media/60599_Biogas%20upgrading.%20Evaluation%20of%20methods%20for%20H2S%20removal.pdf) >

BOTERO, Raúl., & PRESTON, Thomas. Biodigestores de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. [En línea]. 1987. [Consultado 10 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/04-biodigestores.pdf> >

CASTRO, L, et al. Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of. [En línea]. Colombia. Septiembre, 2017. [Consultado 02 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417306740> >

CHILE. MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual de biogás. [En línea]. Chile, 2011. [Consultado 20 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf> >

CHOU, Tse, et al. Selective Removal of H<sub>2</sub>S from Biogas by a Packed Silica Gel Adsorber Tower. [En línea]. Diciembre, 1986. [Consultado 02 Oct. 2017] Disponible en: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/btpr.5420020408/abstract;jsessionid=5E2DEA8FE52FD400BE153D704EB770D0.f04t03> >

COLOMBIA. OFICINA DEL ALTO COMISIONADO PARA LA PAZ. Acuerdo para la terminación del conflicto y la construcción de una paz estable y duradera. [En línea] Colombia. Noviembre, 2016. [Consultado 10 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.altocomisionadoparalapaz.gov.co/procesos-y-conversaciones/Documentos%20compartidos/24-11-2016NuevoAcuerdoFinal.pdf>>

DÍAZ, Manuel. Eliminación del sulfuro de hidrógeno en el biogás. [En línea]. Cuba, 2015. [Consultado 10 Sep. 2017] Disponible en: <<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia41/HTML/Articulo05.htm>>

FONTENELLE, Marcellus, et al. Evaluation of Corrosion Caused by the use of In Natura Biogas in Steam Generator Boilers of Carbon Steel Structural Elements. [En línea]. Brasil, 2017. [Consultado 10 Sep. 2017] Disponible en: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392017000300725&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392017000300725&script=sci_arttext)>

GARFÍ, Marianna, et al. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. [En línea]. Julio, 2016. [Consultado 02 Sep. 2017] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116001015>>

GONG, Jianwei, et al. Micromachined nanocrystalline silver doped SnO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>S sensor. [En línea]. Marzo, 2006. [Consultado 02 Sep. 2017] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400505004107>>

HERRERO, Jaime. Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación. [En línea]. Bolivia. 2008. [Consultado 10 Ago. 2017] Disponible en: <<http://www.bivica.org/upload/biodigestores-familiares.pdf>>

HERRERO, Jaime, et al. Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biodigestores de pequeña y mediana escala en LAC. [En línea]. Septiembre, 2016. [Consultado 5 Sep. 2017] Disponible en: <<http://www.cipav.org.co/pdf/BiodigestoresRedBioLAC.pdf>>

LORENTE, J. P. Desulfuración de gas de síntesis a alta temperatura y presión por absorción en óxidos regenerables. [En línea]. 2010. [Consultado 22 Sep. 2017] Disponible en:

<<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6424/07CAPITULO2.pdf?sequence=7>>

MANAHAN, Stanley. Introducción a la química ambiental. México: Reverté. [En línea]. México, 2007. [Consultado 22 Sep. 2017] Disponible en: <<http://blog.utp.edu.co/lilianabueno/files/2015/08/Introduccion-a-la-Quimica-Ambiental-S.-E.-Manahan2.pdf>>

MANTILLA, Laura y ROJAS, Gustavo. Implementación de un reactor rural para la digestión anaerobia de estiércol bovino en la finca marcella. Trabajo de grado Ingeniería Química. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físicoquímicas. 2015.

MOKHATAB, Saeid, POE, William y MAK, John. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Elsevier. [En línea]. Estados Unidos, 2015. [Consultado 12 Oct. 2017] Disponible en: <[https://books.google.com.co/books?id=xXKDBAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=handbook+natural+gas&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=handbook%20natural%20gas&f=false](https://books.google.com.co/books?id=xXKDBAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=handbook+natural+gas&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=handbook%20natural%20gas&f=false)>

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Hydrogen sulfide: human health aspects. [En línea]. Suiza, 2003. [Consultado 15 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad53.pdf>>

RASI, Saija, VEIJANEN, A y RINTALA, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. [En línea]. Agosto, 2007. [Consultado 25 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544206003033>>

RODRIGUEZ, Cesar y & RUMBO, Jamel. Implementación de un sensor para la detección y cuantificación de H<sub>2</sub>S en gases de pirólisis de llantas. Trabajo de grado Ingeniería Química. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físicoquímicas. 2015.

SIEFERS, Andrea. A novel and cost-effective hydrogen sulfide removal technology using tire derived rubber particles. [En línea]. Estados Unidos, 2010. [Consultado 25 Oct. 2017] Disponible en: <<http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2291&context=etd>>

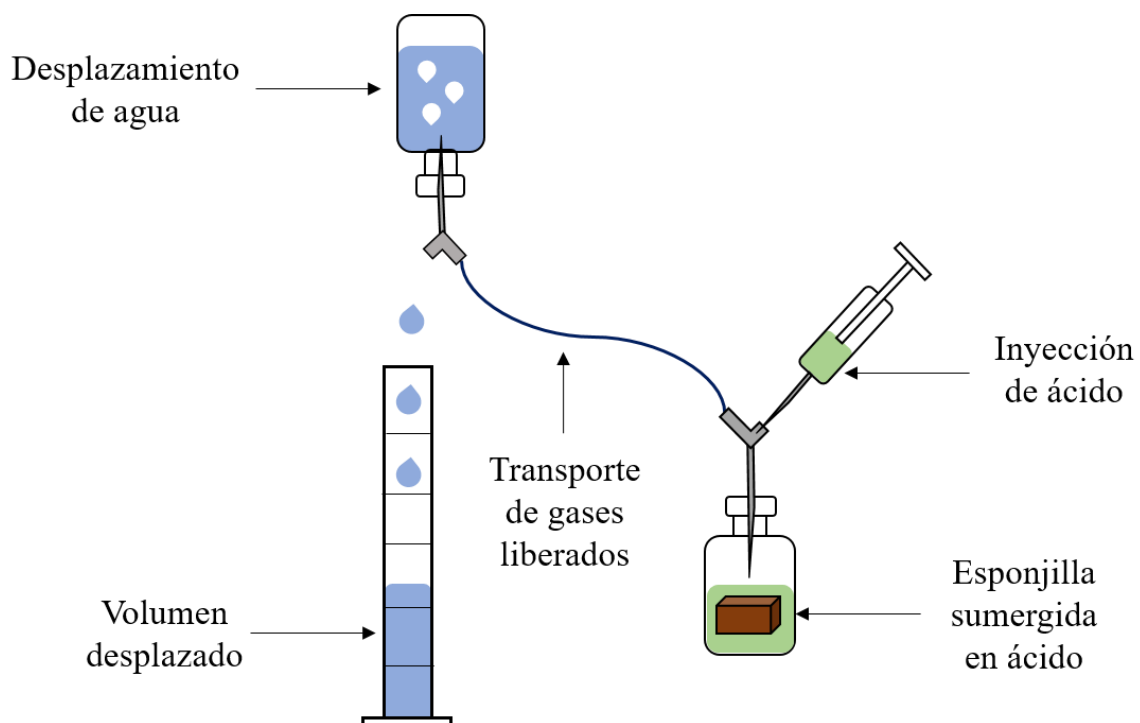
GABRIEL, David y SIERRA, Hugo. Purificación y usos del biogás. Barcelona: [En línea]. España, 2017. [Consultado 13 Oct. 2017] Disponible en: <[https://books.google.com.co/books?id=K1loDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Purificaci%C3%B3n+y+usos+del+biog%C3%A1s&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Purificaci%C3%B3n%20y%20usos%20del%20biog%C3%A1s&f=false](https://books.google.com.co/books?id=K1loDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Purificaci%C3%B3n+y+usos+del+biog%C3%A1s&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Purificaci%C3%B3n%20y%20usos%20del%20biog%C3%A1s&f=false)>

TEJA, Aryn. S & KOH, Pei. Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles. [En línea]. Junio, 2009. [Consultado 13 Oct. 2017] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960897408000168>>

VÍQUEZ, Joaquín. Remoción del sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S (g))/ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S (aq)) en el biogás. [En línea]. 2010. [Consultado 25 Oct. 2017] Disponible en: <<http://nebula.wsimg.com/858cfa23e4f7673d37430eb60925c021?AccessKeyId=11F7CE3E4517D29E4C81&disposition=0&alloworigin=1>>

## ANEXOS

Anexo A. Modelo experimental determinación de relación ácido muriático/agua para elaboración de material de empaque.



# Anexo B. Ficha técnica 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	AC OR DC
R <sub>L</sub>	Load resistance	can adjust	
R <sub>H</sub>	Heater resistance	31Ω ± 5%	Room Tem
P <sub>H</sub>	Heating consumption	less than 800mw	

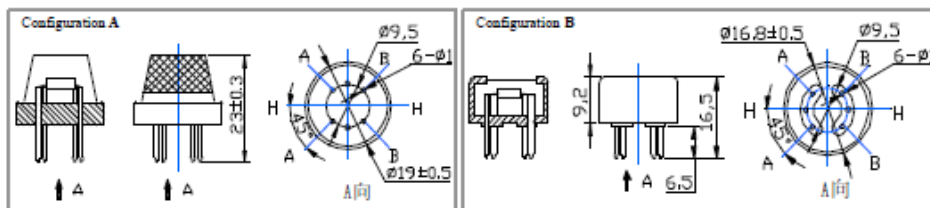
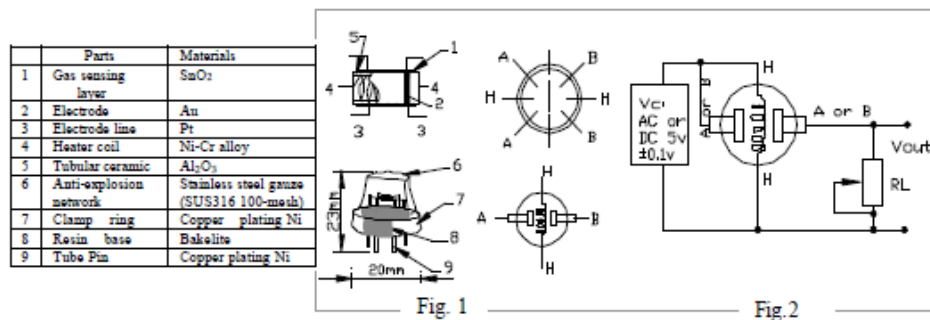
#### B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T <sub>ao</sub>	Using Tem	-10°C-45°C	
T <sub>as</sub>	Storage Tem	-20°C-70°C	
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	30KΩ -200KΩ (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°C ± 2°C V <sub>c</sub> :5V±0.1 Humidity: 65%±5% V <sub>H</sub> : 5V±0.1		
Preheat time	Over 24 hour		

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



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](mailto: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

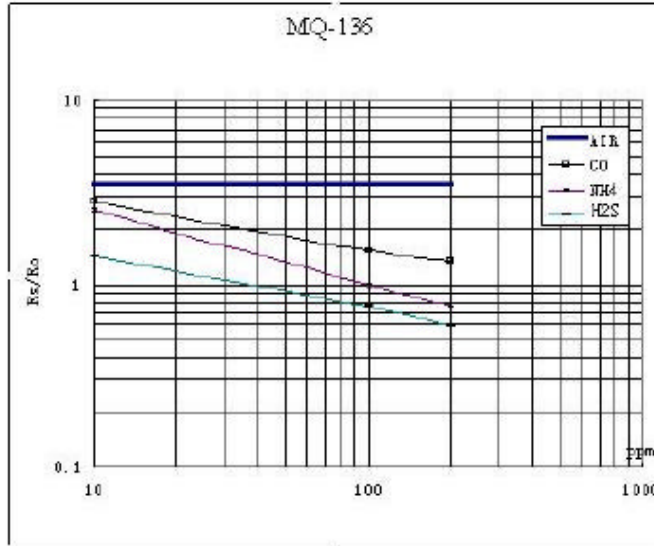


Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-136 for several gases. in their: Temp: 20 C、 Humidity: 65%、 O<sub>2</sub> concentration 21%、 RL=20k Ω  
 R<sub>0</sub>: sensor resistance at 10ppm of H<sub>2</sub>S in the clean air.  
 R<sub>s</sub>: sensor resistance at various concentrations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

Fig.3 sensitivity characteristics of the MQ-136

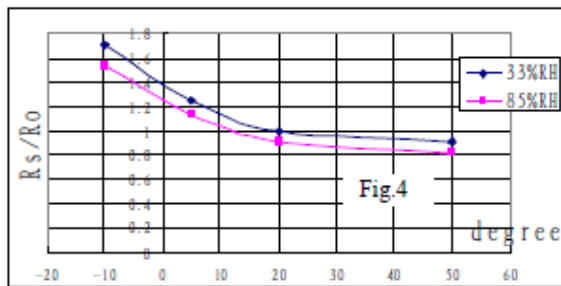
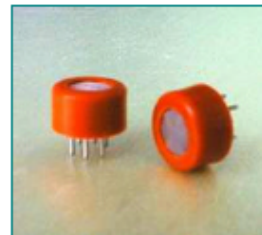


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-136 on temperature and humidity. R<sub>0</sub>: sensor resistance at 10ppm of H<sub>2</sub>S at 33%RH and 20 degree.  
 R<sub>s</sub>: sensor resistance at 10ppm of H<sub>2</sub>S at different temperatures and humidity.

**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<sub>L</sub>) about 20 KΩ (10KΩ to 47 KΩ).

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



## Anexo C. Caracterización material de empaque por DRX

	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión: 01
		Página 1 de 4

FECHA	DIA	MES	ANO	INFORME	INF-402-16-DRX
	27	12	2016		


DATOS DEL CLIENTE			
Empresa	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
Nombre	Profesor HUMBERTO ESCALANTE		
Dirección	Cra 27 con Novena Ciudadela Universitaria.	Nit o C.C	890.201.213-4
Ciudad	Bucaramanga-Colombia	Orden de Compra	No aplica
e-mail	<a href="mailto:escala@uis.edu.co">escala@uis.edu.co</a>	Teléfono	6344000 EXT.

METODOLOGIA DE TRABAJO																									
Preparación de las muestras	<ul style="list-style-type: none"> <li>El espécimen seleccionado de la muestra fue molido y homogenizado en un mortero de ágata y llevado a un tamaño de partícula menor a 38 <math>\mu\text{m}</math> (400 mesh). Posteriormente, el espécimen seleccionado fue montado en portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.</li> <li><b>Nota:</b></li> <li>Los análisis fueron realizados sobre el espécimen pasante de la malla 400 mesh.</li> <li>Se observaron virutas en el espécimen seleccionado de la muestra que no pasaron la malla 400 mesh.</li> </ul>																								
Condiciones de medición	<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:</li> </ul> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 60%;">Voltaje</td> <td>40 (kV)</td> </tr> <tr> <td>Corriente</td> <td>40 (mA)</td> </tr> <tr> <td>Rendija de Divergencia</td> <td>0,6 mm</td> </tr> <tr> <td>Rendijas Soller Primario</td> <td>2,5°</td> </tr> <tr> <td>Muestreo</td> <td>0,02035° 2theta</td> </tr> <tr> <td>Rango de Medición</td> <td>3,5-70,0° 2Theta</td> </tr> <tr> <td>Radiación</td> <td>CuK<math>\alpha</math>I</td> </tr> <tr> <td>Filtro</td> <td>Níquel</td> </tr> <tr> <td>Uso de Anti-dispersor de Aire</td> <td>Si</td> </tr> <tr> <td>Detector</td> <td>Lineal LynxEye</td> </tr> <tr> <td>Tipo de barrido</td> <td>A pasos</td> </tr> <tr> <td>Tiempo de muestreo</td> <td>0,6 segundos</td> </tr> </table>	Voltaje	40 (kV)	Corriente	40 (mA)	Rendija de Divergencia	0,6 mm	Rendijas Soller Primario	2,5°	Muestreo	0,02035° 2theta	Rango de Medición	3,5-70,0° 2Theta	Radiación	CuK $\alpha$ I	Filtro	Níquel	Uso de Anti-dispersor de Aire	Si	Detector	Lineal LynxEye	Tipo de barrido	A pasos	Tiempo de muestreo	0,6 segundos
Voltaje	40 (kV)																								
Corriente	40 (mA)																								
Rendija de Divergencia	0,6 mm																								
Rendijas Soller Primario	2,5°																								
Muestreo	0,02035° 2theta																								
Rango de Medición	3,5-70,0° 2Theta																								
Radiación	CuK $\alpha$ I																								
Filtro	Níquel																								
Uso de Anti-dispersor de Aire	Si																								
Detector	Lineal LynxEye																								
Tipo de barrido	A pasos																								
Tiempo de muestreo	0,6 segundos																								
Ensayo	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Análisis Cualitativo</b> El análisis cualitativo de las fases presentes en el espécimen seleccionado de la muestra se realizó mediante la comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del <i>International Centre for Diffraction Data (ICDD)</i>.</li> </ul>																								

Universidad industrial de Santander, Km. 2 Vía al Refugio Sede UIS-Guatiguará, Edificio de Investigaciones, Laboratorio de Rayos-X, Laboratorio 104, Piedecuesta, Santander, PBX 6344000 Ext. 3512

Apartado Aereo N°678, Email: [calidadrx@uis.edu.co](mailto:calidadrx@uis.edu.co) NIT 890.201.213-4

Página 1 de 4

	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión: 01
		Página 2 de 4

	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Análisis Cuantitativo</b> El análisis cuantitativo de las fases encontradas se realizó mediante el refinamiento por el Método de Rietveld del perfil observado habiéndole agregado al espécimen seleccionado de la muestra identificada con código EIPS una cantidad conocida de un estándar interno (<i>Aluminum oxide, Corundum, α-phase</i>) correspondiente al 19,99%.</li> </ul>
<b>Tratamiento de las muestras</b>	Químico <input type="checkbox"/> Térmico <input type="checkbox"/> Ninguno <input checked="" type="checkbox"/>

TOMA Y ANÁLISIS DE DATOS			
Fecha de recepción de las muestras	02/11/2016	Fecha de medición	14/12/2016
Tipo de muestras	Inorgánica	Fecha análisis de resultados	15/12/2016

### RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 1, se describen cada una de las fases cristalinas presentes en el espécimen seleccionado de la muestra con código EIPS. Estas fases fueron identificadas con la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). En la Figura 1, se muestra el perfil de difracción obtenido con los análisis comparativos de las fases encontradas. La fase de corindón identificado en el espécimen seleccionado corresponde al estándar interno (*Aluminum oxide, Corundum, α-phase*) utilizado para el análisis cuantitativo.

#### 1. OFAMI (EIPS):

Tabla 1. Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno EIPS.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Fe	000-87-0721	Hierro alfa	3,5%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	000-39-1436	Maghemita	18,7%
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	000-88-0866	Magnetita	N.C
	Fe O ( O H )	000-81-0462	Goethita	N.C
	Fe O O H	000-70-0714	Oxido hidróxido de hierro-gama	30,3%
Total Cristalino				52,5%
Amorfos y otros				47,5%

**Nota:**

- N.C = No Cuantificable** (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).


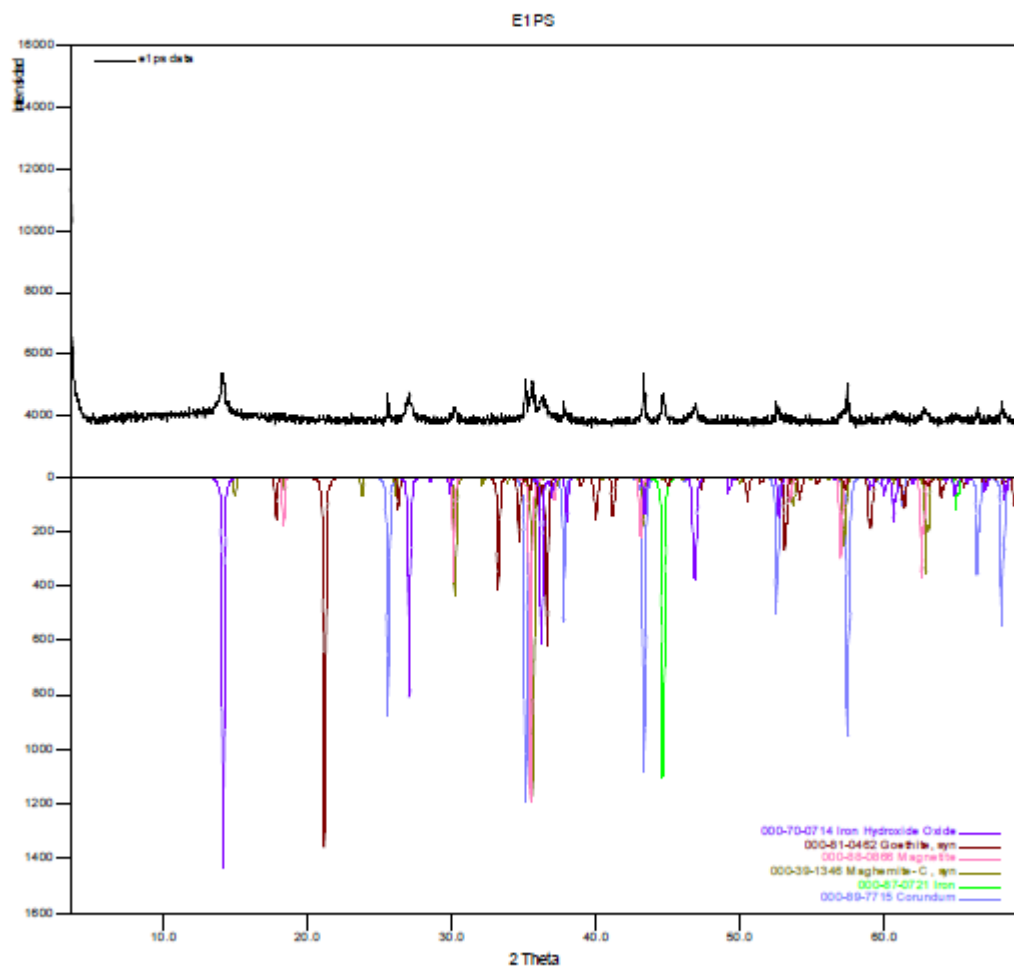


	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión: 01 Página 3 de 4

Figura 1. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E1PS.



**Nota:**


En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.

 	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión: 01
		Página 4 de 4

**Observaciones:**

- Los resultados se relacionan únicamente al espécimen de la muestra analizada.
- Para corroborar la presencia de las fases reportadas se debe realizar un análisis elemental.
- Si desea expresar su percepción con respecto al presente servicio o ensayo, hágalo por medio del correo electrónico [calidadrx@uis.edu.co](mailto:calidadrx@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:	Aprobó:
Qco. John Deiver Bonilla Jaimes Profesional Analista Laboratorio de rayos-X PQ. 4175	Qco. Msc. Jose Hernando Quintana Mendoza Director Técnico laboratorio de rayos-X PQ. 3408	Dr. José Antonio Henao Martínez. Director Laboratorio Rayos-X PQ. 0321

	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Código: F-T-D-04
			Versión: 01
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>		Página 1 de 21

FECHA	DIA	MES	AÑO	INFORME	INF-007-17-DRX
	15	02	2017		

DATOS DEL CLIENTE			
Empresa	Universidad Industrial de Santander		
Nombre	Humberto Escalante		
Dirección	Cra 27 calle 9 ciudadela universitaria	Nit o C.C	890.201.213-4
Ciudad	Bucaramanga	Orden de Compra	
e-mail	escala@uis.edu.co	Teléfono	30020166870

METODOLOGIA DE TRABAJO	
Preparación de las muestras	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los especímenes seleccionados de las muestras fueron molturados y homogenizados en un mortero de ágata y llevados a un tamaño de partícula menor a 38 <math>\mu\text{m}</math> (400 mesh). Posteriormente, los especímenes seleccionados de las muestras fueron montados en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) con centro de silicio "low background" y 0,5 mm de cavidad mediante la técnica de llenado frontal.</li> </ul> <p><b>Notas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Los análisis fueron realizados sobre los especímenes pasantes de la malla 400 mesh.</li> <li>Debido a características físicas (aglomeración) de los especímenes seleccionados de las muestras identificadas con códigos internos E2FW y E2FX dichos especímenes no fueron tamizados.</li> <li>Se observaron virutas en los especímenes seleccionados de las muestras identificadas con códigos internos E2FP, E2FQ, E2FR, E2FS, E2FV, que no pasaron la malla de 400 mesh.</li> <li>Las virutas observadas en los especímenes seleccionados de las muestras identificadas con códigos internos E2FQ y E2FV (virutas de especímenes escogidos al azar) fueron montadas en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) con centro de silicio "low background" mediante la técnica de "ZeroBackground" para su posterior medición y análisis cualitativo (Ver anexo 1).</li> </ul>

 	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	Código: F-T-D-04
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión: 01
		Página 2 de 21

Condiciones de medición	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se realizó en un difractor de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:</li> </ul> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Voltaje</td><td style="text-align: right;">40 (kV)</td></tr> <tr><td>Corriente</td><td style="text-align: right;">40 (mA)</td></tr> <tr><td>Rendija de Divergencia</td><td style="text-align: right;">0,6 mm</td></tr> <tr><td>Rendijas Soller Primario</td><td style="text-align: right;">2,5°</td></tr> <tr><td>Muestreo</td><td style="text-align: right;">0,02035° 2theta</td></tr> <tr><td>Rango de Medición</td><td style="text-align: right;">3,5°-70,0° 2Theta</td></tr> <tr><td>Radiación</td><td style="text-align: right;">CuKα1</td></tr> <tr><td>Filtro</td><td style="text-align: right;">Níquel</td></tr> <tr><td>Uso de Anti-dispersor de Aire</td><td style="text-align: right;">Si</td></tr> <tr><td>Detector</td><td style="text-align: right;">Lineal LynxEye</td></tr> <tr><td>Tipo de barrido</td><td style="text-align: right;">A pasos</td></tr> <tr><td>Tiempo de muestreo</td><td style="text-align: right;">0,8 segundos</td></tr> </table>	Voltaje	40 (kV)	Corriente	40 (mA)	Rendija de Divergencia	0,6 mm	Rendijas Soller Primario	2,5°	Muestreo	0,02035° 2theta	Rango de Medición	3,5°-70,0° 2Theta	Radiación	CuKα1	Filtro	Níquel	Uso de Anti-dispersor de Aire	Si	Detector	Lineal LynxEye	Tipo de barrido	A pasos	Tiempo de muestreo	0,8 segundos
Voltaje	40 (kV)																								
Corriente	40 (mA)																								
Rendija de Divergencia	0,6 mm																								
Rendijas Soller Primario	2,5°																								
Muestreo	0,02035° 2theta																								
Rango de Medición	3,5°-70,0° 2Theta																								
Radiación	CuKα1																								
Filtro	Níquel																								
Uso de Anti-dispersor de Aire	Si																								
Detector	Lineal LynxEye																								
Tipo de barrido	A pasos																								
Tiempo de muestreo	0,8 segundos																								
Ensayo	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Análisis Cualitativo</b> Los análisis cualitativos de las fases presentes en los especímenes seleccionados de las muestras se realizaron mediante la comparación de los perfiles observados con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del <i>International Centre for Diffraction Data</i> (ICDD).</li> <li><b>Análisis Cuantitativo</b> Los análisis cuantitativos de las fases encontradas se realizaron mediante el refinamiento por el Método de Rietveld de los perfiles observados habiéndole agregado a los especímenes seleccionados de las muestras identificadas con códigos E2FO, E2FP, E2FQ, E2FR, E2FS, E2FT, E2FU, E2FV, E2FW y E2FX una cantidad conocida de un estándar interno (<i>Aluminum oxide, Corundum, α-phase</i>) correspondiente al 19,91; 19,95; 19,51; 20,09; 19,53; 20,41; 20,10; 21,60; 19,99 y 19,72% respectivamente.</li> </ul>																								
Tratamiento de las muestras	Químico <input type="checkbox"/> Térmico <input type="checkbox"/> Ninguno <input checked="" type="checkbox"/>																								

TOMA Y ANÁLISIS DE DATOS			
Fecha de recepción de las muestras	24/01/2017	Fecha de medición	01/02/2017-08/02/2017
Tipo de muestras	Inorgánica	Fecha análisis de resultados	01/02/2017-08/02/2017

	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04
		Versión: 01
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Página 3 de 21

## RESULTADOS OBTENIDOS

En las Tablas 1 a la 10, se describen cada una de las fases cristalinas presentes en los especímenes seleccionados de las muestras con códigos E2FO, E2FP, E2FQ, E2FR, E2FS, E2FT, E2FU, E2FV, E2FW y E2FX. Estas fases fueron identificadas con la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). En las Figuras 1 a la 10, se muestran los perfiles de difracción obtenidos con los análisis comparativos de las fases encontradas. La fase de corindón identificado en los especímenes seleccionados corresponde al estándar interno (*Aluminum oxide, Corundum,  $\alpha$ -phase*) utilizado para los análisis cuantitativos.

### 1. OFAM2 (E2FO):

**Tabla 1.** Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FO.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$Fe + 3 O (OH)$	000-44-1415	Lepidocrocita	28,9%
	$Fe_3 O_4$	000-88-0315	Magnetita	20,7%
	$Fe_{1-966} O_{2-963}$	000-89-5894	Maghemita Q	N.C
	$Si O_2$	000-83-2468	Cuarzo	N.C
	Fe	000-89-7194	Hierro	1,0%
Total Cristalino				50,6%
Amorfos y otros				49,4%



**Nota:**

- N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

### 2. OFAM3 (E2FP):

**Tabla 2.** Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FP.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$Fe + 3 O (OH)$	000-44-1415	Lepidocrocita	28,1%
	$Fe_3 O_4$	000-88-0315	Magnetita	14,9%
	$Fe_{1-966} O_{2-963}$	000-89-5894	Maghemita Q	N.C
	Fe	000-89-7194	Hierro	4,5%
Total Cristalino				47,5%
Amorfos y otros				52,5%

 	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión: 01
		Página 4 de 21

**Nota:**

- **N.C = No Cuantificable** (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

3. OFAM4 (E2FQ):

**Tabla 3.** Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FQ.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$Fe + 3 O (OH)$	000-44-1415	Lepidocrocita	20,4%
	$Fe_3 O_4$	000-88-0315	Magnetita	6,5%
	$Fe_{1-966} O_{2-963}$	000-89-5894	Magnetita Q	N.C
	$Fe_3 O_5 (OH)_8 Cl_{1-35}$	000-80-1770	Alaganeíta	N.C
	Fe	000-89-7194	Hierro	2,5%
Total Cristalino				29,4%
Amorfos y otros				70,6%

**Nota:**

- **N.C = No Cuantificable** (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).



4. OFAM5 (E2FR):

**Tabla 4.** Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FR.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$Fe + 3 O (OH)$	000-74-1877	Lepidocrocita	2,6%
	$Fe_3 O_4$	000-74-0748	Magnetita	41,6%
	$Fe_3 O_4$	000-88-0315	Magnetita	N.C
	$Fe O (OH)$	000-81-0464	Goethita	N.C
	Fe	000-87-0721	Hierro	1,0%
Total Cristalino				45,2%
Amorfos y otros				54,8%

**Nota:**

- **N.C = No Cuantificable** (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

		<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	Código: F-T-D-04
		<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión: 01
			Página 5 de 21

#### 5. OFAM6 (E2FS):

**Tabla 5.** Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FS.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$Fe +_3 O (OH)$	000-44-1415	Lepidocrocita	28,7%
	$Fe_{1-966} O_{2-963}$	000-89-5894	Maghemita Q	N.C
	$Fe_3 O_4$	000-88-0315	Magnetita	6,1%
	$Fe O (OH)$	000-81-0462	Goethita	N.C
	Fe	000-89-7194	Hierro	4,8%
Total Cristalino				39,6%
Amorfos y otros				60,4%


**Nota:**

- N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

#### 6. OFAM7 (E2FT):

**Tabla 6.** Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FT.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$Fe +_3 O (OH)$	000-44-1415	Lepidocrocita	28,4%
	$Fe_3 O_4$	000-88-0315	Magnetita	3,4%
	$Fe_2 O_3$	000-89-0598	Hematita	N.C
	$Fe_{1-966} O_{2-963}$	000-89-5894	Maghemita Q	8,1%
	$Si O_2$	000-78-1254	Cuarzo	1,7%
	Fe	000-89-7194	Hierro	4,3%
Total Cristalino				45,9%
Amorfos y otros				54,1%

	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	Código: F-T-D-04
		Versión: 01
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Página 6 de 21

- **N.C = No Cuantificable** (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

#### 7. OFAM8 (E2FU):

**Tabla 7.** Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FU.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$Fe + 3 O (OH)$	000-74-1877	Lepidocrocita	30,3%
	$Fe_3 O_4$	000-75-0449	Magnetita	N.C
	$Fe_3 O_4$	000-88-0315	Magnetita	14,6%
	$Fe_2 O_3$	000-89-0598	Hematita	N.C
	$Fe O$	000-77-2355	Wuestita	0,5%
	$Si O_2$	000-70-3755	Cuarzo	0,9%
	$Fe$	000-89-7194	Hierro	6,7%
Total Cristalino				53,0%
Amorfos y otros				47,0%



**Nota:**

- **N.C = No Cuantificable** (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

#### 8. OFAM9 (E2FV):

**Tabla 8.** Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FV.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$Fe + 3 O (OH)$	000-44-1415	Lepidocrocita	23,6%
	$Fe_{1.966} O_{2.963}$	000-89-5894	Maghemita Q	6,3%
	$Fe_3 O_4$	000-88-0315	Magnetita	3,9%
	$Fe O (OH)$	000-81-0463	Goethita	N.C
	$Fe$	000-89-7194	Hierro	4,9%
Total Cristalino				38,7%

 	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04
		Versión: 01
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Página 7 de 21

Amorfos y otros	61,3%
-----------------	-------

**Nota:**

- **N.C = No Cuantificable** (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible realizar su respectiva cuantificación).

**9. OHCLI (E2FW):**

**Tabla 9.** Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FW.

FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
$Fe_3O_4$	000-89-3854	Magnetita	35,2%
$Fe_8O_8(OH)_8Cl_{1-35}$	000-80-1770	Akaganeíta	5,6%
$Fe + 3 O(OH)$	000-74-1877	Lepidocrocita	N.C
$FeO(OH)$	000-18-0639	Óxido hidróxido de hierro	*N.C
Fe	000-89-7194	Hierro	0,9%
Total Cristalino			41,7%
Amorfos y otros			58,3%



**Nota:**

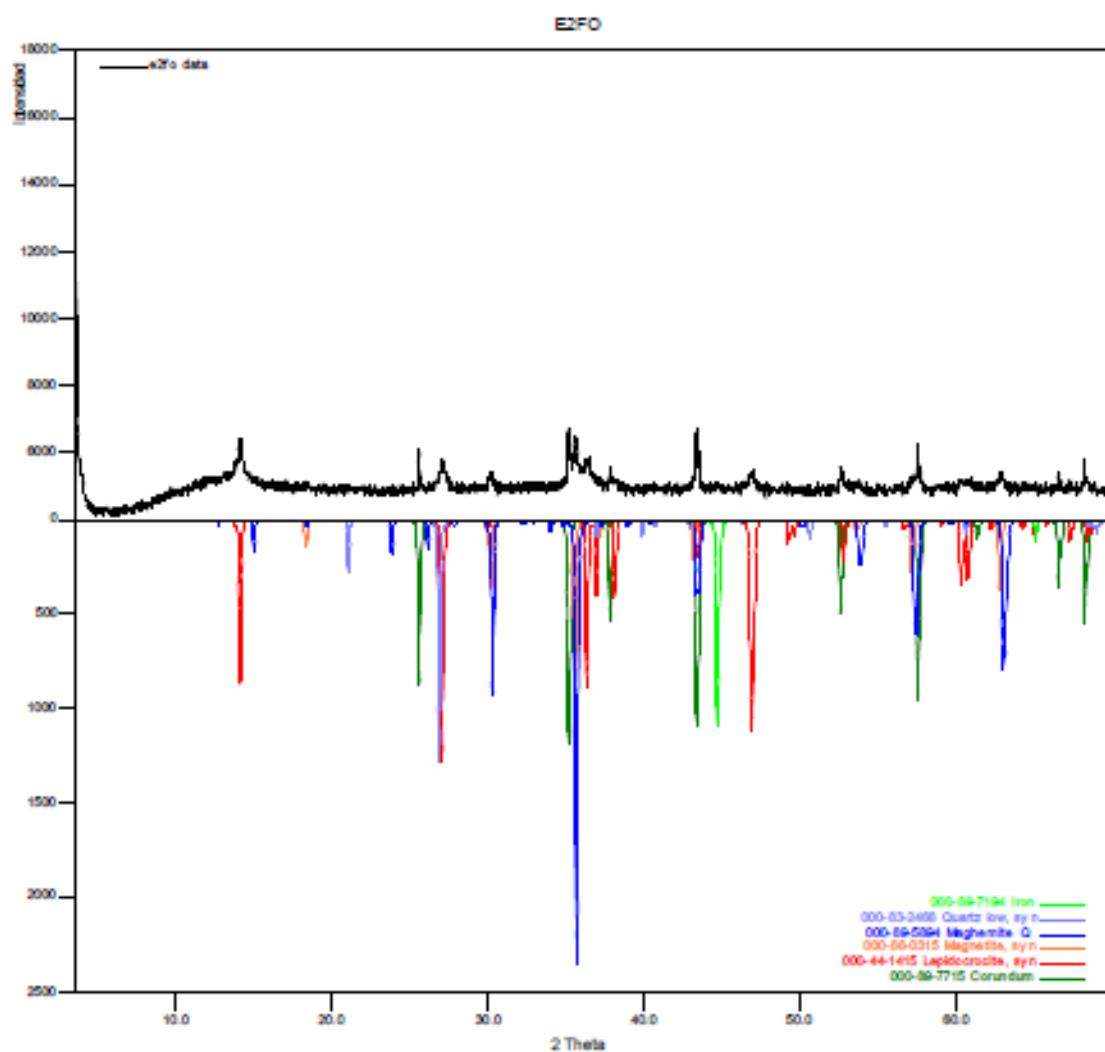
- **\*N.C = No Cuantificable** (La fase es identificada, sin embargo no hay un número de ICSD en la base de datos para realizar su respectiva cuantificación).

**10. OHCL2 (E2FX):**

**Tabla 10.** Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FX.


FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
$Fe_3O_4$	000-79-0417	Magnetita	36,1%
$Fe_3O_4$	000-88-0315	Magnetita	N.C
Fe	000-89-7194	Hierro	0,8%
Total Cristalino			36,9%
Amorfos y otros			63,1%

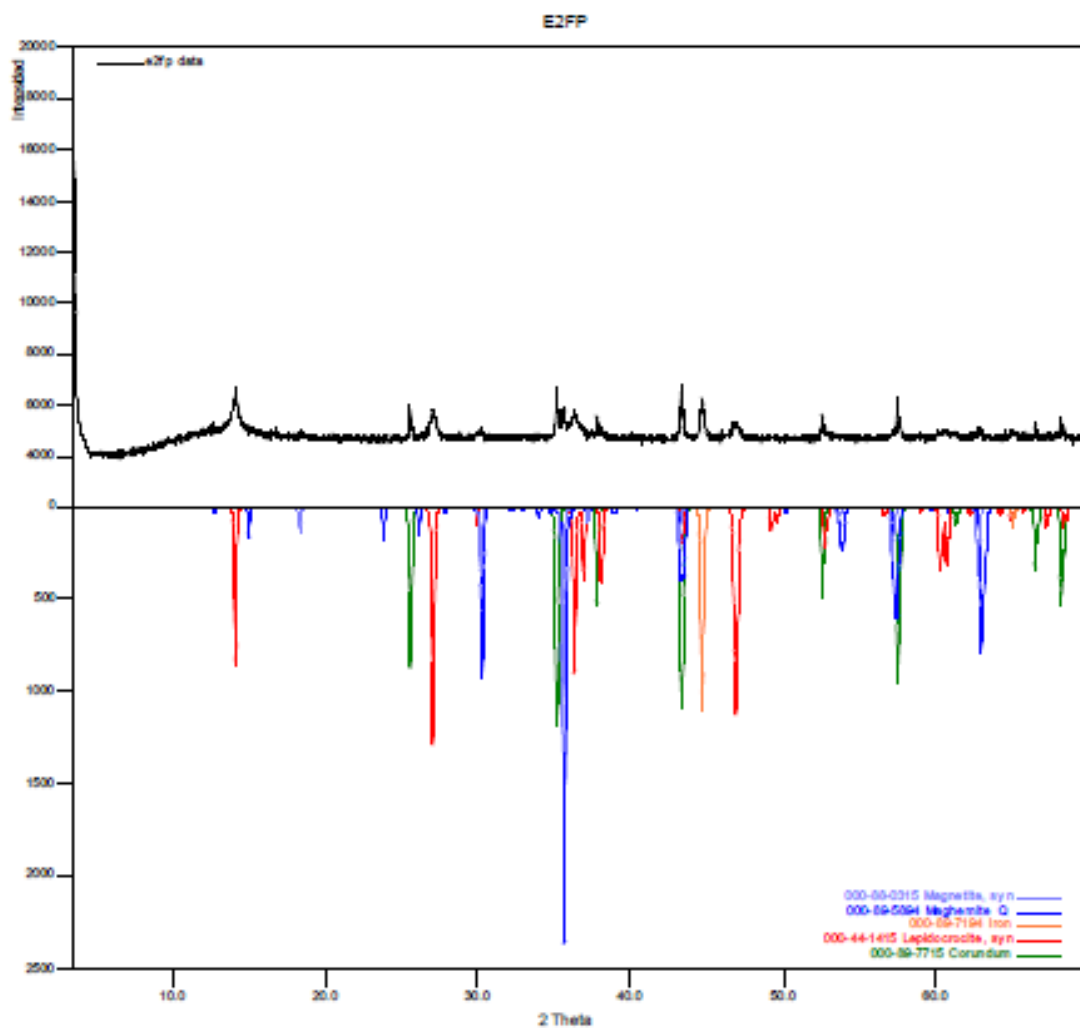
		<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	<b>Código: F-T-D-04</b>	
		<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>		<b>Versión: 01</b>
				<b>Página 9 de 21</b>



**Nota:**

En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.



 	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04
		Versión: 01
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Página 10 de 21

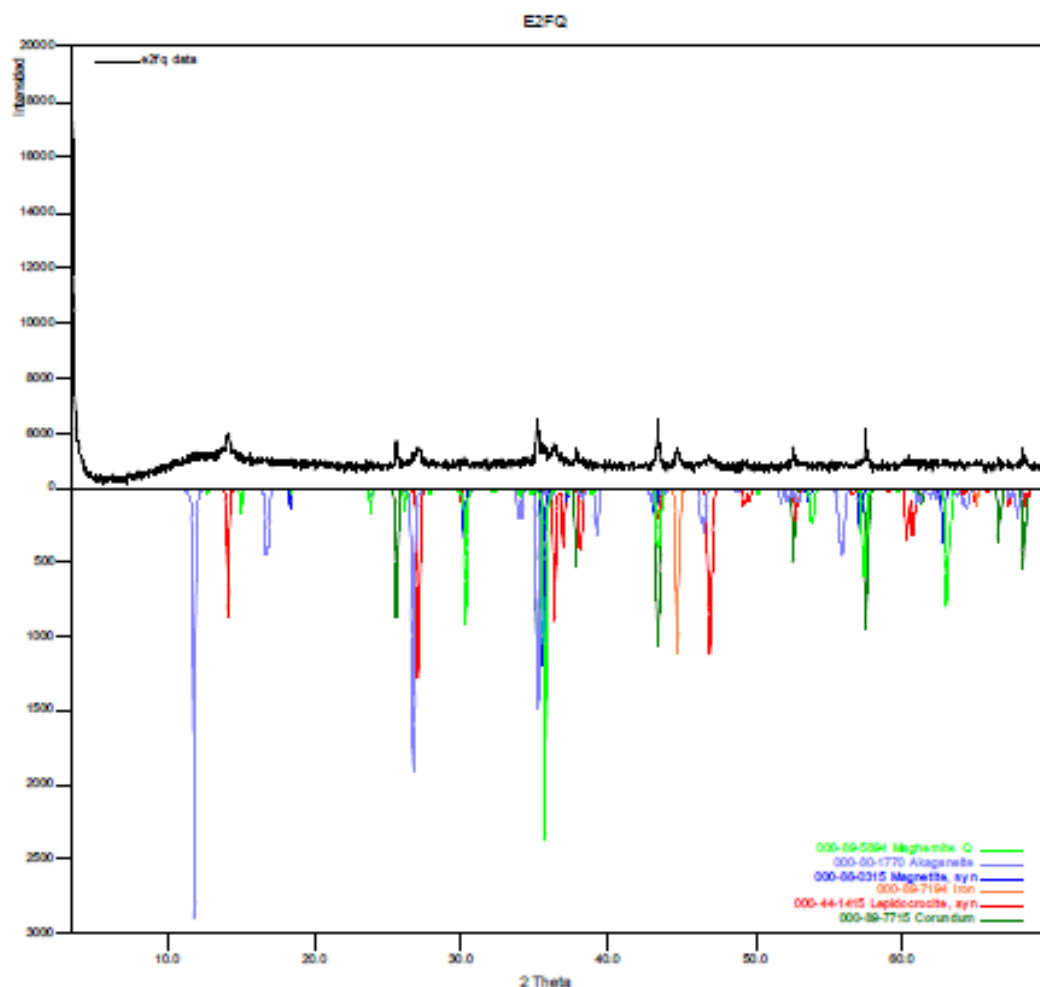


**Nota:**

En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.

Figura 3. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FQ.


		<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	<b>Código: F-T-D-04</b>
		<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	<b>Versión: 01</b>
			<b>Página 11 de 21</b>

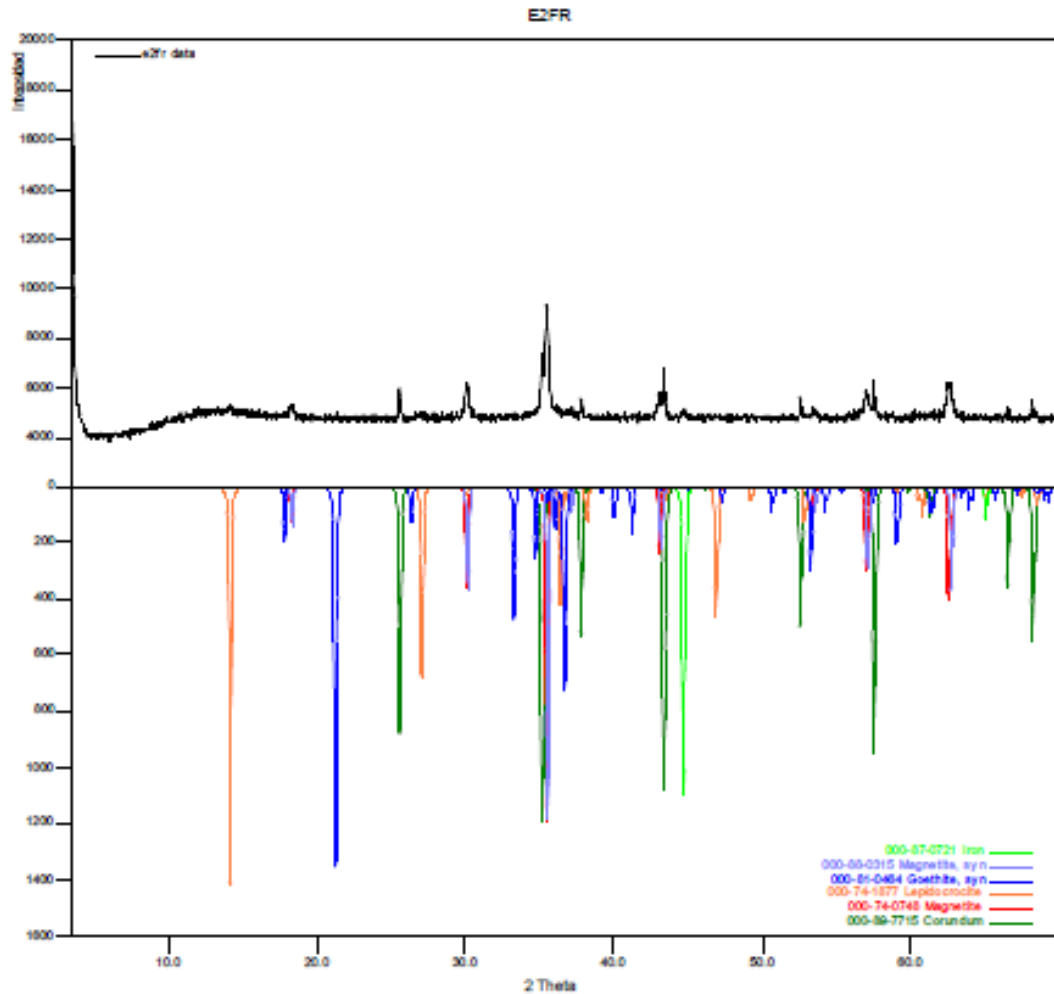


**Nota:**

En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.

**Figura 4.** Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FR.

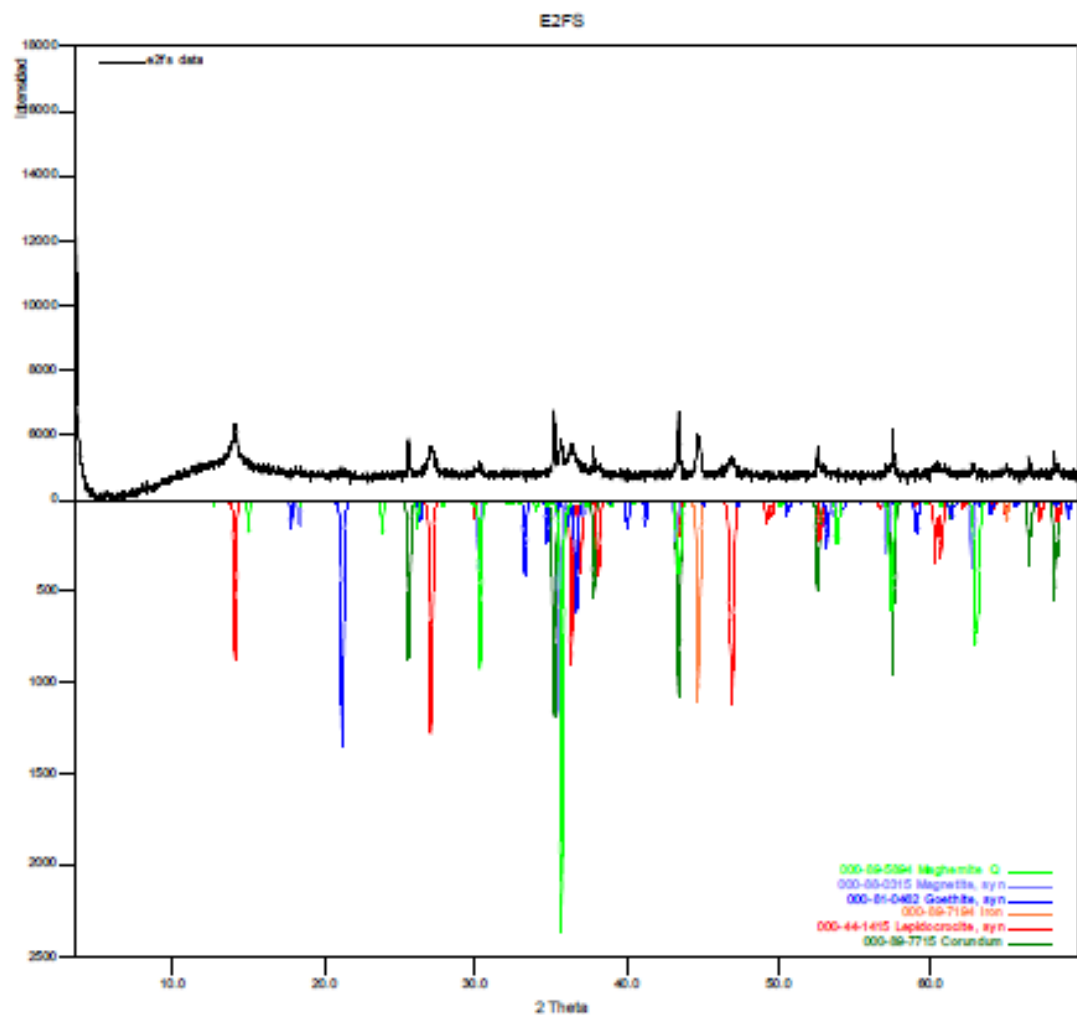
	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	Código: F-T-D-04
		<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>
		Versión: 01
		Página 12 de 21



**Nota:**



En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.

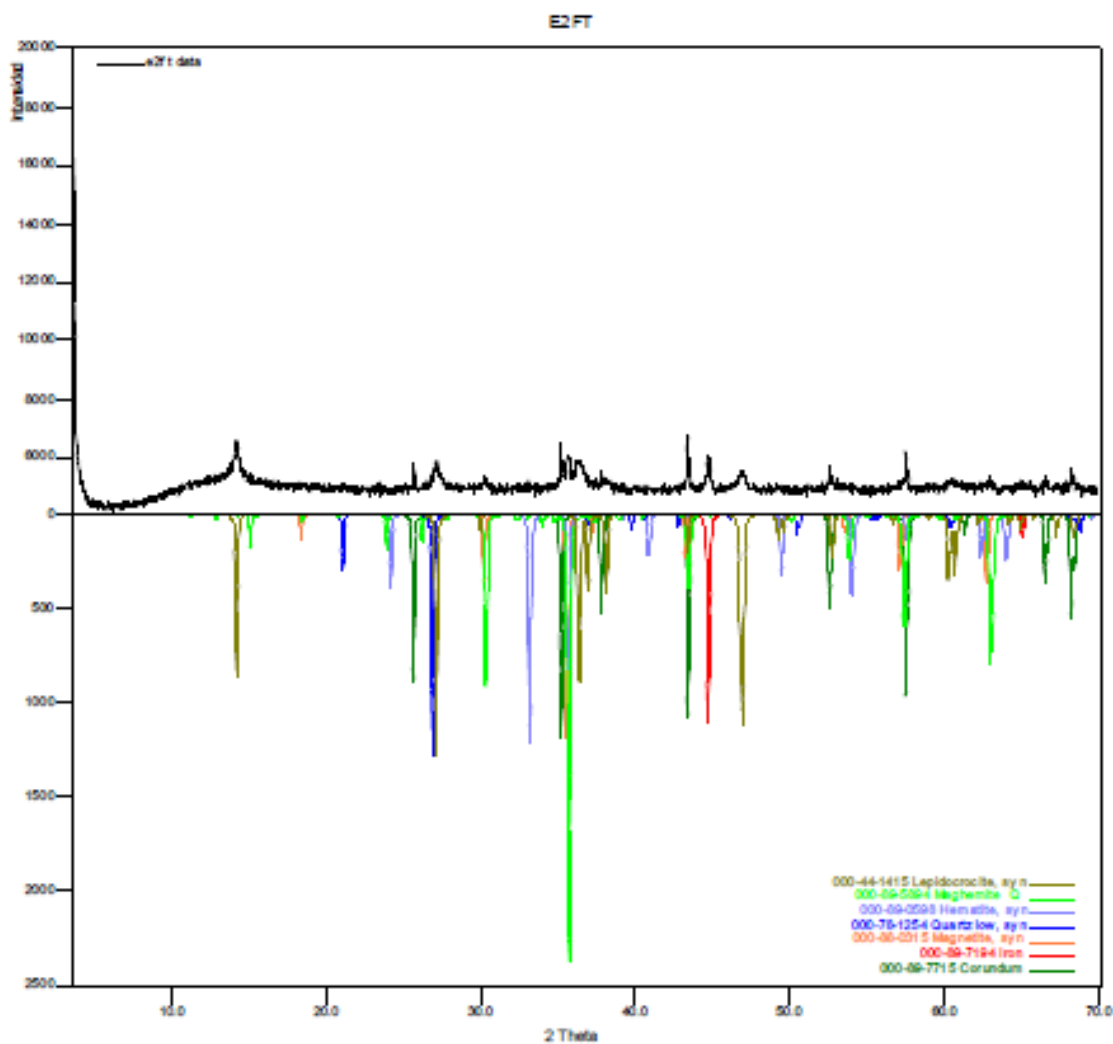
**Figura 5.** Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FS.



**Nota:**  
 En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.

**Figura 6.** Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FT.



		<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04	
		<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>		Versión: 01
				Página 14 de 21

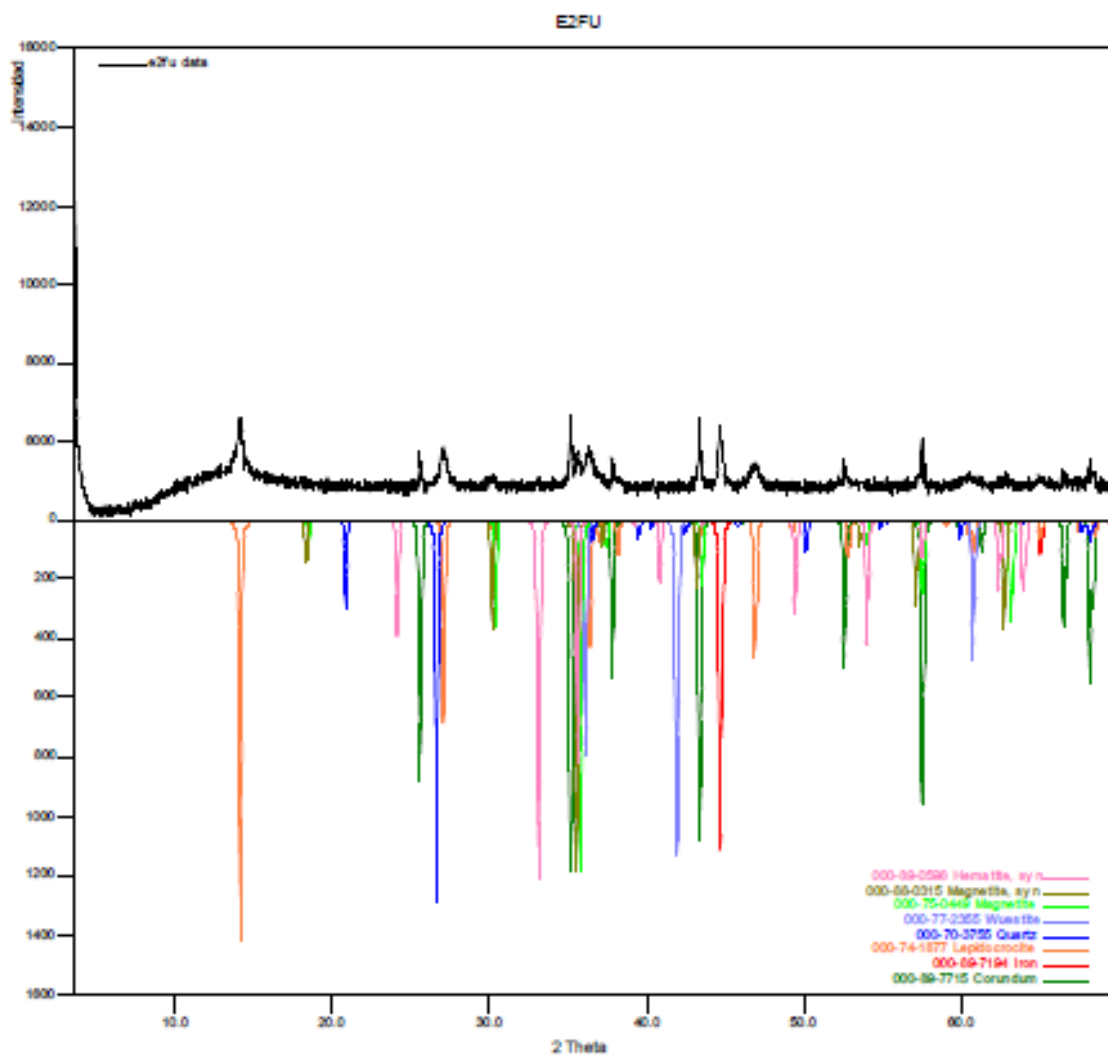


**Nota:**

En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.

**Figura 7.** Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FU.



		<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	<b>Código: F-T-D-04</b>
			<b>Versión: 01</b>
		<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	<b>Página 15 de 21</b>

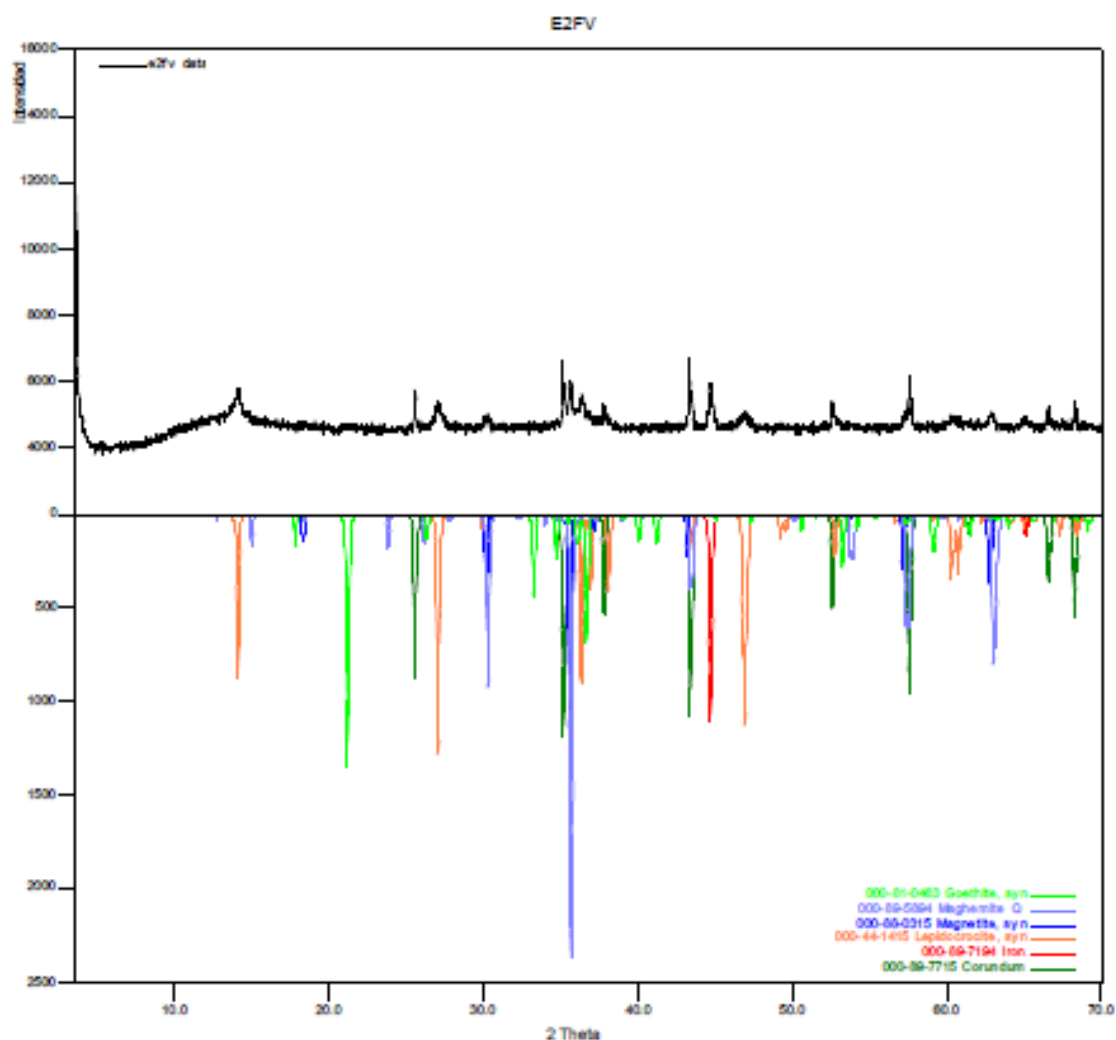


**Nota:**

En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.

**Figura 8.** Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FU.



		<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	<b>Código: F-T-D-04</b>
			<b>Versión: 01</b>
		<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	<b>Página 16 de 21</b>

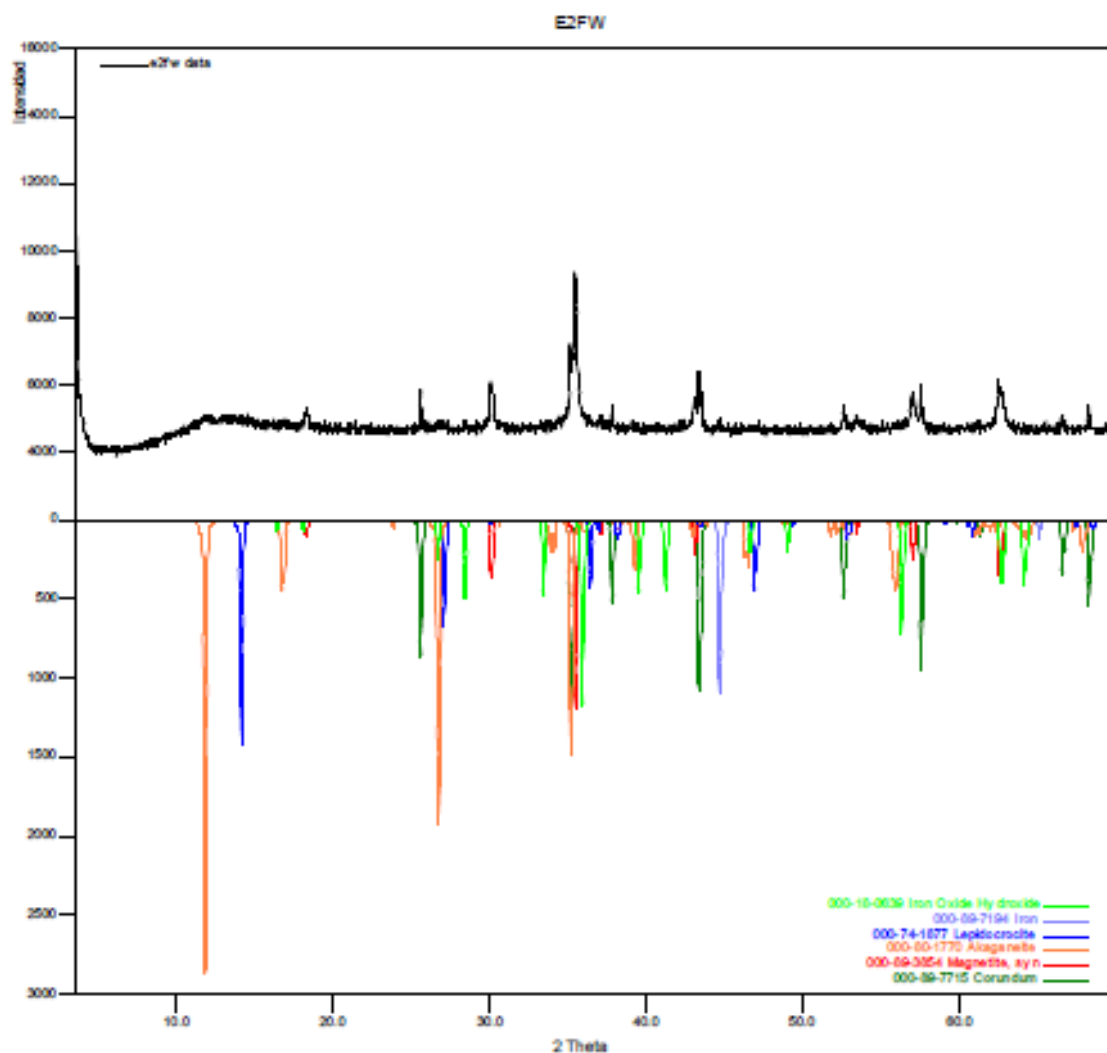


**Nota:**

En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.

**Figura 9.** Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FV.



		<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	<b>Código: F-T-D-04</b>
		<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	<b>Versión: 01</b>  <b>Página 17 de 21</b>

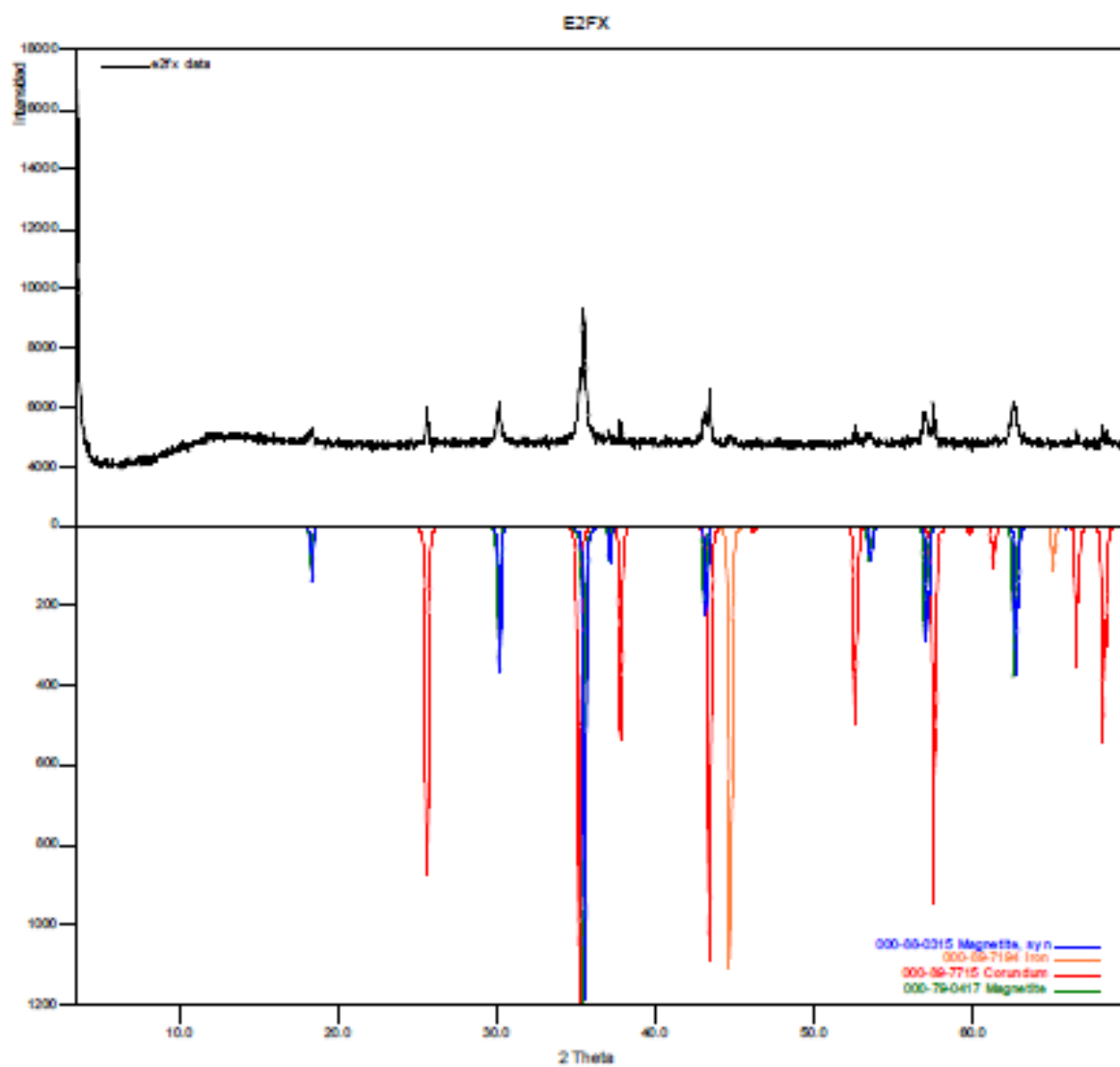


**Nota:**

En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.


**Figura 10.** Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FX.

		<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	<b>Código: F-T-D-04</b>
		<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	<b>Versión: 01</b>  <b>Página 18 de 21</b>



**Nota:**

En el perfil de difracción experimental, se observan señales con poca intensidad que no pudieron ser asignadas a alguna fase reportada en la base de datos PDF-2.

	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código F-T-D-04
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión 01
		Página 19 de 21

- Los resultados se relacionan únicamente a los especímenes de las muestras analizadas.
- Para corroborar la presencia de las fases reportadas se debe realizar un análisis elemental.
- Si desea expresar su percepción con respecto al presente servicio o ensayo, hágalo por medio del correo electrónico [calidad@uis.edu.co](mailto:calidad@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.

Atentamente;

Elaboró:

Revisó:

Aprobó:

John D. Bonilla Jaimes  
 Profesional Analista  
 Laboratorio de rayos-X  
 PQ-4175



Jose H. Quintana Mendoza  
 Director Técnico del Laboratorio  
 de rayos-X  
 PQ-3408

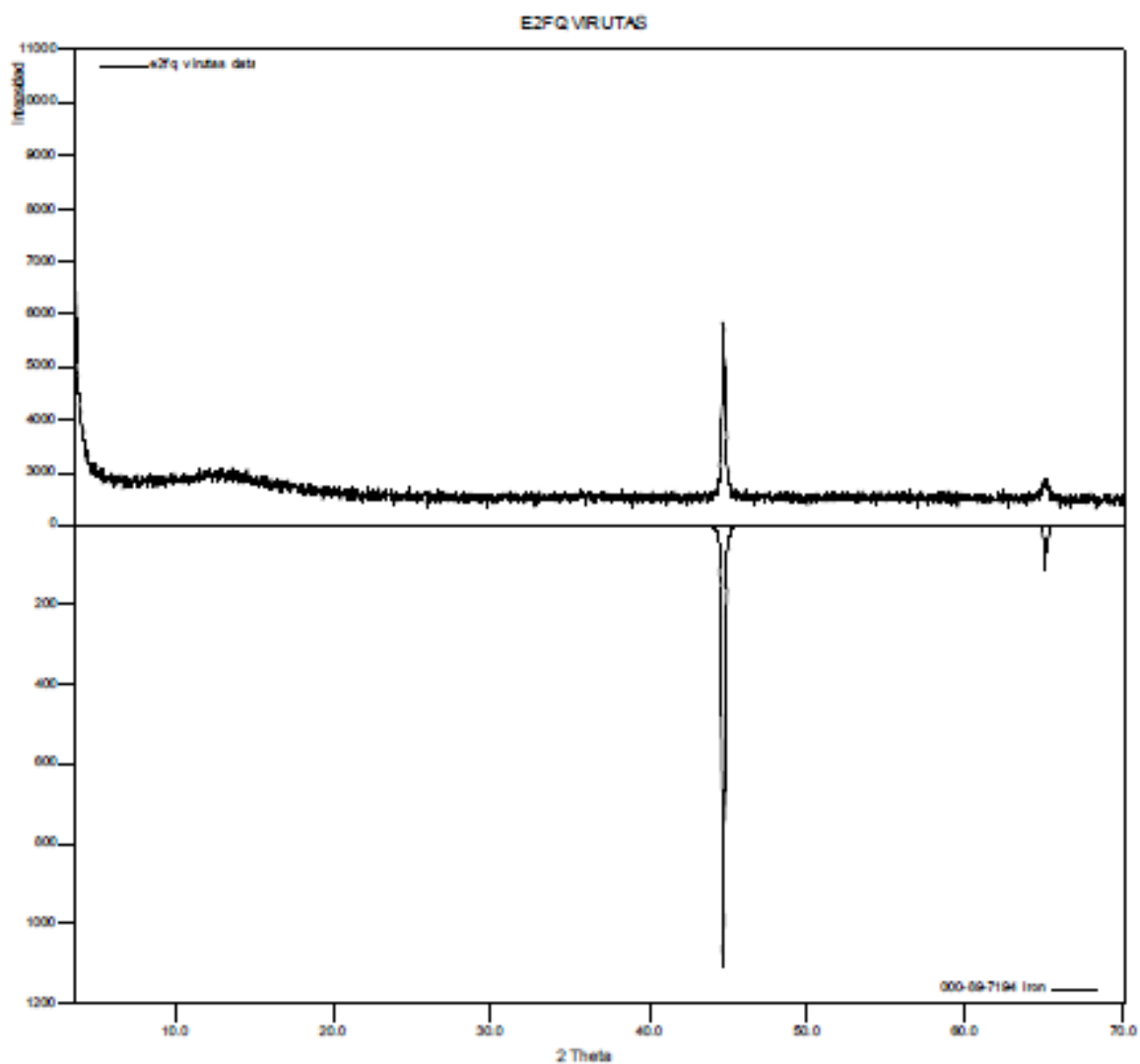
Jose A. Henao Martinez  
 Director del Laboratorio  
 de rayos-X  
 PQ-0321

#### ANEXO I



En las virutas de los especímenes seleccionados de las muestras identificadas con códigos internos E2FQ y E2FV (Figuras 11 y 12 respectivamente) se identificó con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) la fase de Hierro con número de tarjeta PDF 000-89-7194.

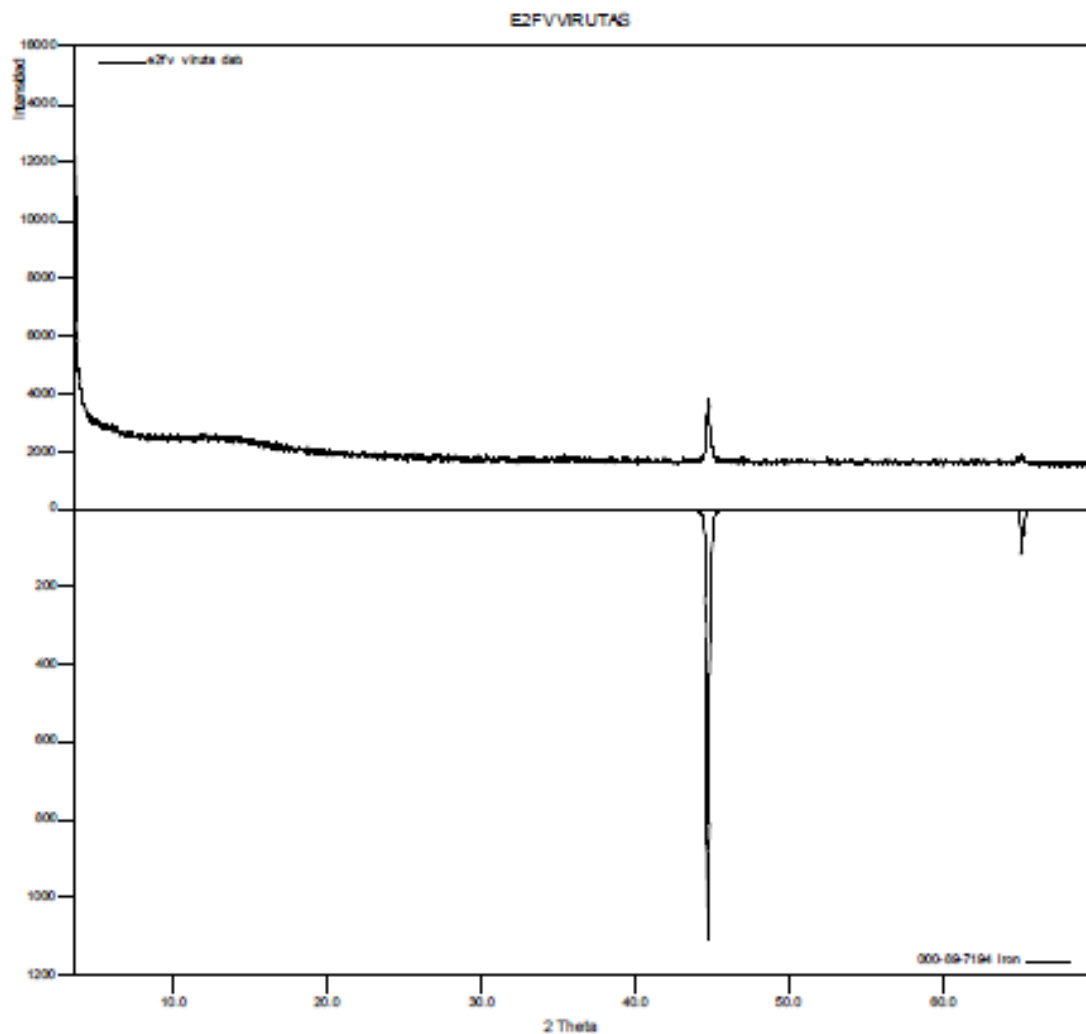
**Figura 11.** Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en las virutas del espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FQ.

 	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión: 01 Página 20 de 21



**Figura 12.** Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en las virutas del espécimen seleccionado de la muestra con código interno E2FV.

 	<b>LABORATORIO DE RAYOS X</b> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: F-T-D-04
	<b>INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X</b>	Versión: 01 Página 21 de 21



Anexo D. Lista de materiales utilizados durante construcción del equipo de sensado

1) Arduino® Mega2560



2) Sensor MQ136:



3) Caja derivación:



4) Cable plano:



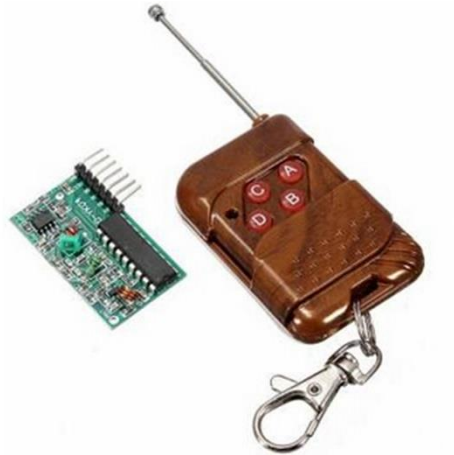
5) Módulo Micro SD para Arduino®:



6) Memoria Micro SD 4 GB



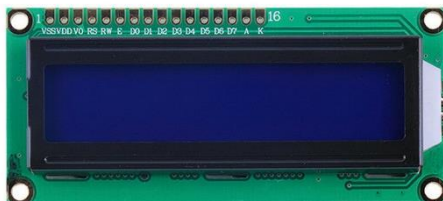
7) Módulo radio frecuencia para Arduino®:



8) Potenciómetro:



9) Pantalla LCD:



10) Placa de baquelita



## Anexo E. Código sensor

// Este código permite traducir los datos obtenidos por el sensor diseñado por el grupo de Digestión Anaerobia para la medición de H<sub>2</sub>S en el biogás.

// MANUEL RAMIRO CORREDOR CRUZ ING. QUÍMICO UIS

// JOSE LUIS SALAMANCA COY ING. ELECTRÓNICO UIS

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
#include <SD.h>
```

```
File Archivo;
```

```
bool a=0;
```

```
bool b=0;
```

```
bool c=0;
```

```
bool d=0;
```

```
bool falloSD=0;
```

```
//Con esta linea puedo cambiar el modo predeterminado de encendido
```

```
byte modo=4;
```

```
long tiempo,tiempo1,tiempo2,tiempo3,tiempo4=0;
```

```
//modifiqué el pin de entrada de cero (0) a (1)
```

```
int sensor = A1;
```

```
int sensando=1;
```

```
int sensorValue = 0;
```

```
int delay_datos;
```

```
float Concentracion;
```

```
LiquidCrystal lcd(11, 10, 5, 4, 3, 2);
```

```
void Guardar_sd()
```

```

{
    /* ESCRIBIENDO DATOS EN LA MEMORIA SD DE ARDUINO */

    //Se abre el documento sobre el que se va a leer y escribir
    Archivo = SD.open("Datos.txt", FILE_WRITE);

    //Se comprueba que el archivo se ha abierto correctamente y se procede a
    //escribir en él.
    if (Archivo)
    {
        //Se escribe información en el documento de texto datos.txt.
        if(sensando==1)
        {
            Archivo.print(Concentracion);
            Archivo.println(" [ppm]");
        }
        if(sensando==2)
        {
            Archivo.print(sensorValue);
            Archivo.println(" [sensor]");
        }
        //Se cierra el archivo para almacenar los datos.
        Archivo.close();

        //Se muestra por el monitor que los datos se han almacenado correctamente.
        Serial.println("Todos los datos fueron almacenados");
    }

    //En caso de que haya habido problemas abriendo datos.txt, se muestra por pantalla.

```

```

else
{
    Serial.println("El archivo datos.txt no se abrió correctamente");
}

/* FIN DE LA ESCRITURA DE DATOS EN LA MEMORIA SD DE ARDUINO */
}

void impresion_en_lcd()
{
    lcd.clear();

    if(modo==1)
    {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Concentracion");

        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(Concentracion);

        lcd.print(" PPM");

        //Se modifica la frecuencia en la toma de datos para el modo PPM

        delay_datos=120;

        sensando=1;
    }

    if(modo==2)
    {
        lcd.setCursor(0, 0);

        lcd.print("Frec Datos SD");
    }
}

```

```

    lcd.setCursor(0, 1);

    lcd.print(delay_datos);

    lcd.print(" s");
}

if(modos==3)
{
    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print(tiempo/1000);

    lcd.print(" segundos");

    lcd.setCursor(0, 1);

    if(sensando==1)lcd.print("Energizados PPM");

    if(sensando==2)lcd.print("Energizados ANLG");
}

if(modos==4)
{
    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("Sensor H2S D.A.");

    lcd.setCursor(0, 1);

    lcd.print(sensorValue);

    //se modifica la frecuencia en la toma de datos para el modo analógico

    delay_datos=20;

    sensando=2;
}

if(modos==10)
{

```

```

    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("Error SD.");

    lcd.setCursor(0, 1);

    lcd.print("REINICIAR");

    sensando=0;

}

}

void sensor_funcion() //toma de datos del sensor

{

    sensorValue = analogRead(sensor); //adquiere la medida del sensor

    Serial.println(sensorValue, DEC); //la muestra en el pc si esta conectado

    // Esta es la ecuación de que indica el valor de la concentración de H2S si se cambia de sensor

    // se debe modificar la ecuación del mismo, en este caso cambiar el valor de la pendiente y punto
    de corte en la siguiente línea.

    Concentracion=(sensorValue*0.269988583)-76.19832056;

    if (Concentracion < 0)

    {

        Concentracion=0;

    }

    if (sensorValue > 0)

    {

        // Activate digital output pin 8 - the LED will light up

```

```

digitalWrite(8, HIGH);

//Con esta linea puedo cambiar la frecuencia con la que se presentan los datos en pantalla
delay (5);
}
else {

// Deactivate digital output pin 8 - the LED will not light up
digitalWrite(8, LOW);
}
}

void setup()
{
pinMode(33, INPUT);
pinMode(34, INPUT);
pinMode(35, INPUT);
pinMode(36, INPUT);
pinMode(53, OUTPUT);
pinMode(8, OUTPUT);

lcd.begin(16, 2);

delay(10);

//Se establece comunicación con el monitor serial para la comprobación de la
//velocidad de toma de datos.
Serial.begin(9600);

lcd.print("Iniciando");

//Se muestra por pantalla que se va a iniciar la comunicación con la SD
Serial.print("Comenzando la comunicación con la tarjeta SD");

```

```

delay(1000);

//Se establece como salida el pin correspondiente a SS.

//Se muestra por el monitor si la comunicación se ha establecido correctamente

//o ha habido algún tipo de error.

if (!SD.begin(53))

{

    lcd.print("Fallo SD");

    Serial.println("Se ha producido un fallo al iniciar la comunicación");

    falloSD=1;

    return;

}

Serial.println("SD iniciada");

lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print("SD Inicianda");

delay(3000);

    Archivo = SD.open("Datos.txt", FILE_WRITE);

    Archivo.println("Inicio de sistema");

    Archivo.close();

}

void loop()

{

    if(falloSD==1)

```

```

{
    modo=10;
}

tiempo=millis();

if (tiempo-tiempo1>1000)

{
    Serial.print("tiempo");

    tiempo1=tiempo;

    impresion_en_lcd(); //muestra datos

    sensor_funcion();

}

if (tiempo-tiempo3>delay_datos*1000 )

{
    tiempo3=tiempo;

    if(falloSD==0)

    {

        if(sensando== 1 or sensando==2)

        {

            Guardar_sd(); //guarda datos en Sd

        }

    }

    else

    {

        Archivo = SD.open("Datos.txt", FILE_WRITE);

        Archivo.println("Sin guardar, modo distinto a sensado");

        Archivo.close();
    }
}

```

```
    }  
  }  
}  
a = digitalRead(33);  
b = digitalRead(34);  
c = digitalRead(35);  
d = digitalRead(36);  
if(a ==1)  
{  
  modo=1;  
}  
if(b ==1)  
{  
  modo=2;  
}  
if(c ==1)  
{  
  modo=3;  
}  
if(d ==1)  
{  
  modo=4;  
}  
}
```

Anexo F. Lista de materiales utilizados en construcción unidad de purificación

- 1) Tubo acrílico 10 cm de diámetro: 1 metro



- 2) Lámina polietileno de alta densidad: 1 unidad (45\*60 cm)



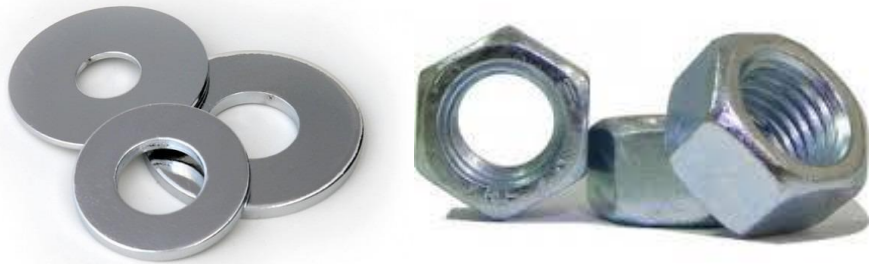
- 3) Espárragos acero inoxidable: 4\*5/16"



4) Ángulo acero al carbón: 3 m \*1/2"



5) Tuerca y arandelas: 8 unidades



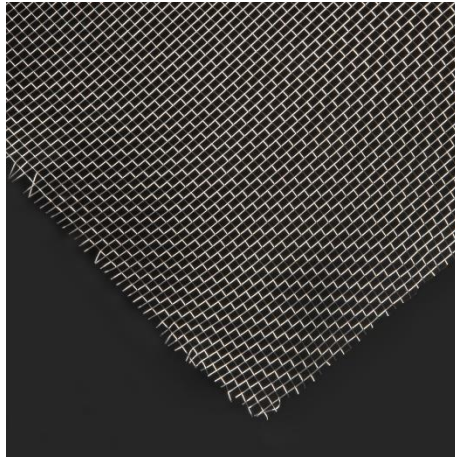
6) Lámina de acero a carbón 1/4": Unidad 15\*15 cm



7) Tuerca ciega: 4 Unidades



8) Malla fina acero: ½ m



9) Remaches ciegos: 18 unidades



10) Tubería PVC media pulgada: 5 m



11) Codos lisos PVC 1/2 ": 6 unidades



12) Tee lisa 1/2": 6 unidades



13) Unión universal ½": 4 unidades



14) Niple acero inoxidable 304 grado alimenticio ½": 30 cm



15) Válvula azul ½": 3 unidades



16) Válvula ½ " roja: 3 unidades



## Anexo G. Procedimiento detallado elaboración material de empaque.

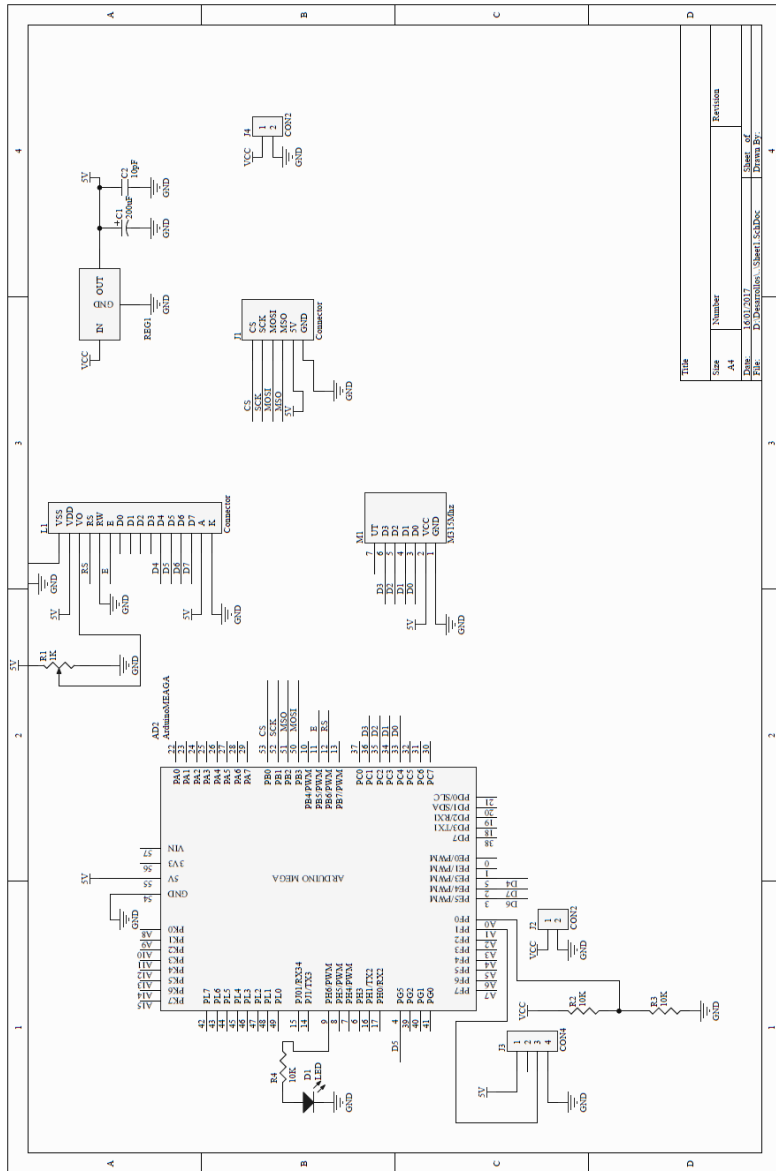
### Materiales:

- Ácido muriático comercial.
- Esponjillas lana de acero.
- Recipiente plástico.
- Agua.
- Guantes.
- Tapa bocas.
- Tijeras.

### Procedimiento:

- 1) Agregar 31 ml de agua por cada esponjilla a oxidar en el recipiente plástico.
- 2) Diluir 1 ml de ácido muriático por cada esponjilla a oxidar.
- 3) Cortar de forma transversal las esponjillas.
- 4) Ponerse guantes y tapa bocas para evitar contacto de la solución ácida con la piel y la inhalación de posibles vapores.
- 5) Sumergir la esponjilla previamente cortada en la solución haciendo oprimiendo suavemente su estructura para eliminar burbujas y permitir el humedecimiento de todo el material.
- 6) Realizar este proceso por 5 minutos.
- 7) Extraer la esponjilla de la solución ácida y retirar el exceso de humedad.
- 8) Ubicar en una superficie seca con aireación natural por 24 horas.
- 9) Verificar oxidación del material de forma visual.
- 10) Almacenar el material hasta su uso.

# Anexo H. Circuitos equipo sensado



## Anexo I. Dimensionamiento unidad de purificación

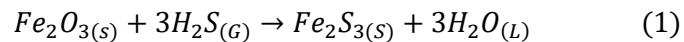
Valores de entrada:

- Flujo de biogás ( $F_{Bg}$ ): 0,9 m<sup>3</sup>/día.
- Concentración de H<sub>2</sub>S ( $C_{H_2S}$ ): 169 ppm.
- Periodo regeneración (TR): 180 días.
- Factor de sobredimensionamiento (fs): 2.
- Porcentaje de fase activa (%FA): 29% se fija este valor con el mínimo porcentaje encontrado durante las pruebas.

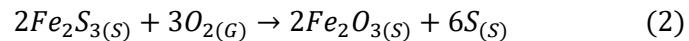
Parámetros:

- Peso molecular Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $M_{Fe_2O_3}$ ): 160 g/mol.
- Peso molecular H<sub>2</sub>O ( $M_{H_2O}$ ): 18 g/mol.
- Equivalente gramo Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ H<sub>2</sub>S ( $eq_{Fe_2O_3/H_2S}$ ): 1/3 mol Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/mol H<sub>2</sub>S.
- Equivalente gramo H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>S ( $eq_{H_2O/H_2S}$ ): 1 mol H<sub>2</sub>O/mol H<sub>2</sub>S.
- Absorción gel de sílice (%Absorción SG): 25% g H<sub>2</sub>O/g gel de sílice.
- Densidad gel de sílice ( $\rho_{SG}$ ): 0,64 g/cm<sup>3</sup>.
- Constante universal de los gases (R): 8,314 J/mol\*K.

Se parte de la reacción ocurrida entre el H<sub>2</sub>S y el óxido de hierro Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:



Seguido de la reacción entre el Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub> y el O<sub>2</sub>:



Se procede a realizar el dimensionamiento del equipo:

Determinación flujo de H<sub>2</sub>S:

$$F_{H_2S} = \frac{F_{Bg} * C_{H_2S}}{1.000.000} = \frac{0,9 \frac{m^3}{día} Bg * 169 ppm H_2S}{1.000.000} = 1,52 * 10^{-4} \frac{m^3 H_2S}{día}$$

Dónde:  $F_{H_2S}$ : Flujo de H<sub>2</sub>S (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>S/día).

Flujo molar de H<sub>2</sub>S:

$$N_{H_2S} = \frac{P * F_{H_2S}}{R * T} = \frac{101325 Pa * 1,52 * 10^{-4} \frac{m^3 H_2S}{día}}{8,314 \frac{J}{mol * K} * 298,14 K} = 6,22 * 10^{-3} \frac{mol H_2S}{día}$$

Dónde:  $N_{H_2S}$ : Flujo molar de  $H_2S$  (mol  $H_2S$ /día).

Requerimiento molar  $Fe_2O_3$ :

$$\begin{aligned} N_{Fe_2O_3} &= eq_{\frac{Fe_2O_3}{H_2S}} * N_{H_2S} = 3 \frac{mol Fe_2O_3}{mol H_2S} * 6,22 * 10^{-3} \frac{mol H_2S}{día} \\ &= 2,07 * 10^{-3} \frac{mol Fe_2O_3}{día} \end{aligned}$$

Dónde:  $N_{Fe_2O_3}$ : Requerimiento molar de  $Fe_2O_3$  (mol  $Fe_2O_3$ /día).

Requerimiento másico  $Fe_2O_3$ :

$$F_{Fe_2O_3} = N_{Fe_2O_3} * M_{Fe_2O_3} = 2,07 * 10^{-3} \frac{mol Fe_2O_3}{día} * 160 \frac{g}{mol Fe_2O_3} = 0,3 \frac{g Fe_2O_3}{día}$$

Dónde:  $F_{Fe_2O_3}$ : Requerimiento másico de  $Fe_2O_3$  (g  $Fe_2O_3$ /día).

Requerimiento fase activa:

$$FA = F_{Fe_2O_3} * TR * fs = 0,3 \frac{g Fe_2O_3}{día} * 180 días * 2 = 119,4 g Fe_2O_3$$

Dónde: FA: Fase Activa (g  $Fe_2O_3$ ).

Requerimiento material de empaque:

$$ME = \frac{FA}{\%FA} = \frac{119,4 g Fe_2O_3}{29\%} = 411,6 g \text{ Material empaque}$$

Dónde: ME: Material de Empaque (g Material empaque).

Número de esponjillas requeridas:

$$\begin{aligned} ER &= \frac{ME}{PE} * (1 - \%AM) = \frac{411,6 g \text{ Material empaque}}{9,42 \frac{g}{Esponjilla}} * (1 - 17\%) = 36,3 \text{ Esponjillas} \\ &\cong 36 \text{ Esponjillas} \end{aligned}$$

Dónde: ER: Esponjillas Requeridas (Unidades).

Agua generada por la reacción:

$$A = \frac{eq_{H_2O}}{H_2S} * N_{H_2S} * M_{H_2O} * TR$$
$$= 1 \frac{mol H_2O}{mol H_2S} * 6,22 * 10^{-3} \frac{mol H_2S}{día} * 18 \frac{g}{mol} * 180 \text{ días} = 20,1g H_2O$$

Dónde: A: Flujo de agua (g H<sub>2</sub>O).

Requerimiento gel de sílice:

$$SG = \frac{A}{\%AbsorciónSG} * fs = \frac{2400 g}{25\%} * 2 = 161 g \text{ gel de sílice}$$

Dónde: SG: Requerimiento gel de sílice (g).

Número de etapas requeridas

$$E = \frac{ER}{E_{Etapa}} = \frac{36 \text{ Esponjillas}}{6 \text{ Etapas}} = 6 \frac{\text{Esponjillas}}{\text{Etapa}}$$

Dónde: E: Esponjillas por etapa (Unidades/ etapa).

El número de 6 etapas se fija buscando obtener un valor entero de esponjillas por etapa, más una etapa adicional correspondiente al gel de sílice.

Altura material empaque

Previamente se determina que la altura generada por 6 esponjillas es de 10 cm aproximadamente.

$$H_{Esponjilla} = N_{Etapas} * H_{Etapa} = 6 \text{ Etapas} * 10 \frac{cm}{Etapa} = 60 \text{ cm de esponjilla}$$

Dónde: H<sub>Esponjilla</sub>: Altura esponjillas (cm).

Altura gel de sílice:

$$h = \frac{SG}{A_{Etapa} * \rho_{SG}} = \frac{161 g}{\pi * 5^2 cm^2 * 0,64 \frac{g}{cm^3}} = 3,2 \text{ cm}$$

Dónde: h: Altura gel de sílice (cm).

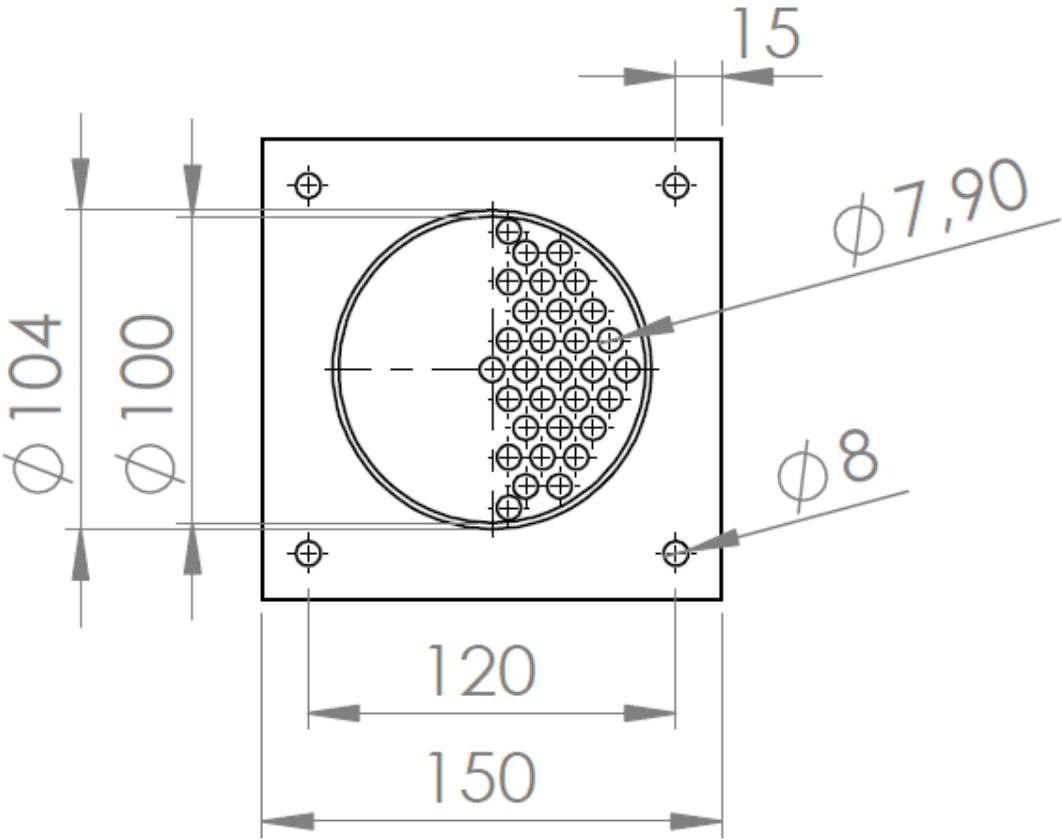
Como la altura obtenida para esta etapa es menor que la altura estándar de las demás etapas se fija su valor en 10 cm para estandarizar la altura.

Altura del equipo

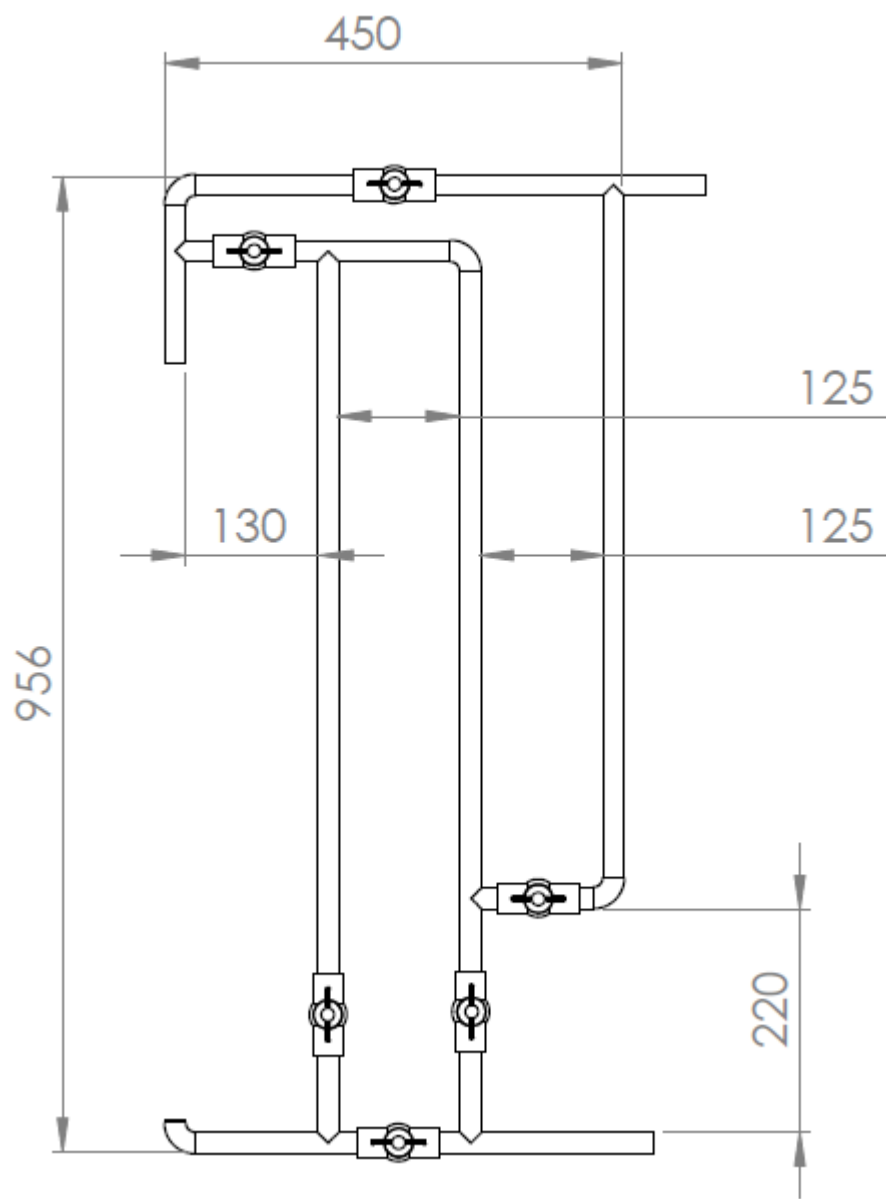
$$H = H_{\text{Esponjilla}} + h = 60 \text{ cm} + 10 \text{ cm} = 70 \text{ cm}$$

Dónde: H: Altura del equipo (cm).

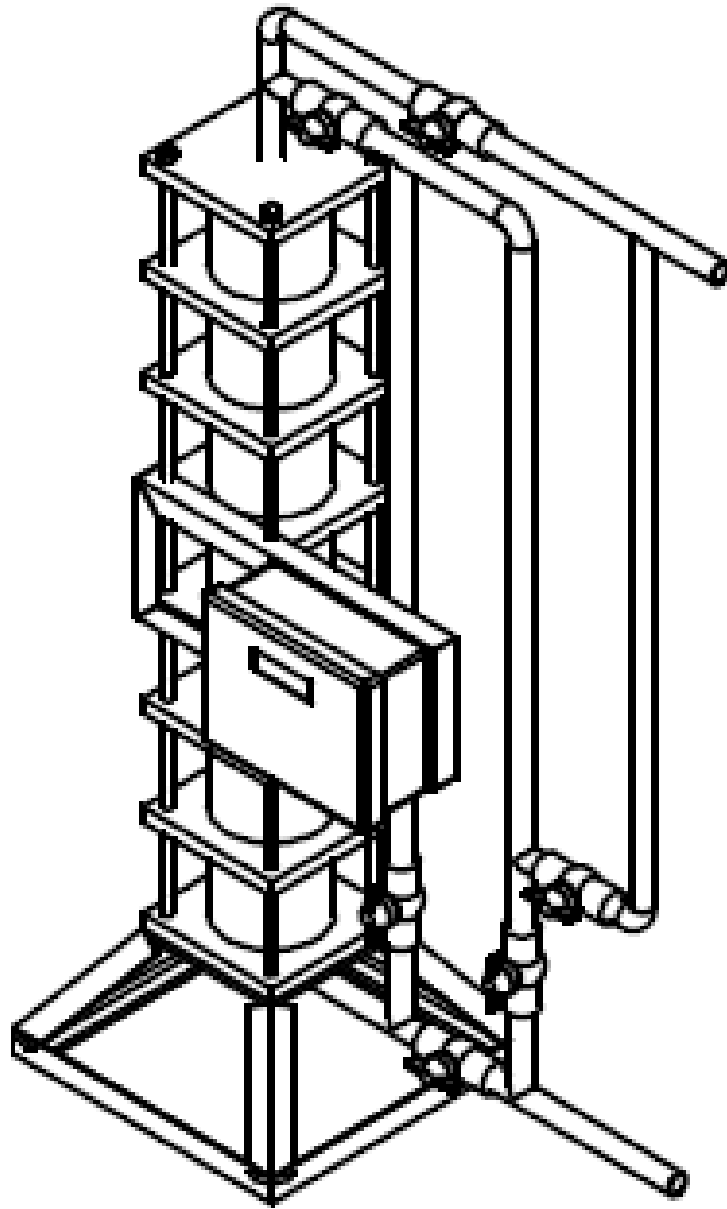
Anexo J. Planos unidad de purificación de biogás.



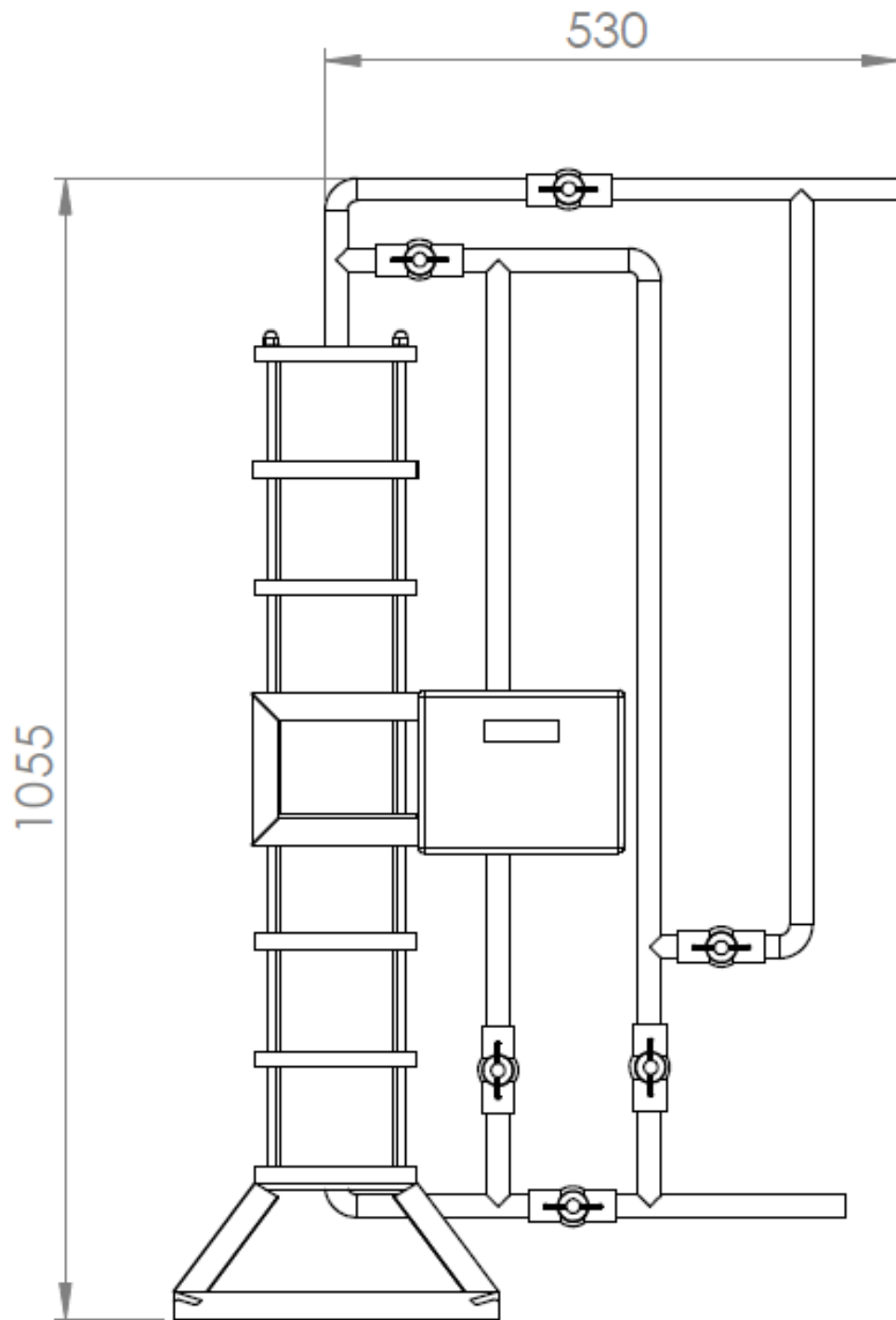
Plano 1: Plato perforado.



Plano 2: Sistema de tuberías.



Plano 3: Vista isométrica equipo purificación de biogás.



Plano 4: Vista frontal Unidad de purificación de biogás.

## Anexo K. Manual de ensamblaje y operación de Unidad de purificación de biogás.

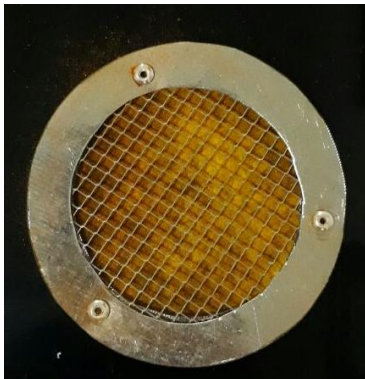
En este manual se describe de forma detallada el procedimiento de ensamblaje y mantenimiento de la unidad de purificación de biogás, junto con algunos consejos prácticos que pueden resultar útil al usuario.

### Procedimiento ensamblaje unidad purificación de biogás:

- 1) Insertar los espárragos en la base del equipo.
- 2) Deslizar la tapa inferior del equipo por los espárragos ya ubicados.



- 3) Insertar el o-ring en el canal de la tapa inferior.
- 4) Insertar la primera etapa en el canal.
- 5) Insertar la malla metálica en el fondo de la etapa.



- 6) Insertar la tela absorbente sobre la malla metálica.
- 7) Insertar las esponjillas en la etapa.



8) Insertar uno de los platos perforados con los o-ring previamente insertados.

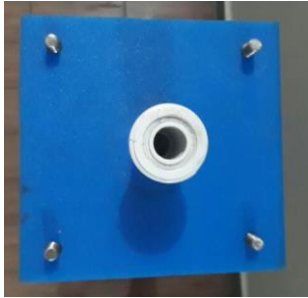


9) Repetir los pasos del 3 al 7 hasta completar las 6 primeras etapas.

10) En la etapa 7 insertar como relleno el gel de sílice.



11) Ubicar la tapa superior.



12) Poner placa metálica sobre tapa superior.



13) Insertar arandelas y tuercas en cada uno de los espárragos.

14) Apretar las tuercas suavemente una a la vez hasta la cabeza de los espárragos sobresalga.



15) Ubicar las tuercas ciegas en la punta que sobre sale de los espárragos.



16) Tomar sistema de tuberías y acoplarlo a la unidad por medio de las uniones universales.



17) Atornillar la unidad de medición de biogás por medio de la base.



18) Insertar el sensor MQ136 en el punto de muestreo.



- 19) Ajustar el sensor por medio de la pieza de acople ejerciendo una presión leve con el tornillo de esta misma.
- 20) Encender el sensor y verificar su correcto funcionamiento.



**Procedimiento recolección de datos unidad de medición:**

- 1) Desconectar la unidad de medición.
- 2) Girar los seguros de la caja de derivación ubicándolos en la posición CERO (0).
- 3) Retirar con suavidad la tapa de la caja de derivación.
- 4) Ejercen presión leve sobre la memoria Micro SD.
- 5) Retirar la memoria de la unidad.
- 6) Insertar en adaptador Micro SD a SD (ubicado al interior del equipo).
- 7) Insertar adaptador SD en computador.
- 8) Leer la memoria y extraer los datos (archivo txt.)
- 9) Borrar el archivo guardado dejando la memoria sin información almacenada.
- 10) Insertar la memoria Micro SD de vuelta al equipo de medición.
- 11) Sellar la caja de derivación ubicado los sellos en la posición UNO (1).
- 12) Reconectar la unidad de medición y verificar su correcto funcionamiento.

Anexo L. CAPEX y OPEX Unidad de purificación de biogás

<b>Item</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario (USD)</b>	<b>Valor total (USD)</b>
Arduino Mega 2560	1	10	10
Sensor MQ 136	1	25	25
Caja derivación	1	7	7
Cable plano	1	0.5	0.5
Módulo Micro SD	1	1	1
Memoria SD 4 GB	1	4	4
Control de radio frecuencia	1	5	5
Potenciómetro	1	0.5	0.5
Pantalla LCD	1	3	3
Placa Baquelita	1	1	1
Tubo acrílico	1	70	70
Lámina PHD	1	33	33
Esparragos acero inoxidable	4	2.5	10
Ángulo acero al carbón	1	2	2
Tuercas	4	0.1	0.4
Arandelas	4	0.1	0.4
Lámina acero al carbón	2	0.8	1.6
Tuerca ciega	4	0.2	0.8
Malla fina de acero	1	1	1
Remaches ciegos	18	0.03	0.54
Tubería PVC	5	2	10
Codo liso	4	0.5	2
Tee lisa	5	0.5	2.5
Unión universal	4	0.8	3.2
Niple acero inoxidable	1	7	7
Válvula	6	0.8	4.8
Mano de obra	80	2	160
Insumos y otros	1	20	20
<b>Total</b>			<b>386.24</b>

<b>Item</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario (USD)</b>	<b>Valor total (USD)</b>
Ácido muriático	2	0.8	1.6
Esponjillo lana de acero	40	0.1	4
Gel de sílice	1	4	4
Consumo energía	1	12	12
	<b>Total</b>		<b>21.6</b>