

Adsorción de sulfuro de hidrógeno del biogás mediante virutas de hierro pretratadas para su reaprovechamiento energético

Soledad Torres-Calderón

Universidad Peruana Unión, EP de Ingeniería Ambiental Lima, Perú.

e-mail: soledadtorres@upeu.edu.pe

Michel Jazmín Paucar-Palomino

Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental, Lima, Perú.

e-mail: mjpaucarp@uni.edu.pe

Noé Benjamín Pampa-Quispe

Universidad Peruana Unión, EP de Ingeniería Ambiental Lima, Perú.

e-mail: noepampa@upeu.edu.pe

RESUMEN

El presente estudio tiene como fin determinar el sistema de adsorción de sulfuro de hidrógeno (H_2S) eficiente entre las torres de lecho fijo 1 con virutas de hierro pre tratadas con ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH) al 5,0 % y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con cloruro de sodio (NaCl) torre de lecho fijo 2. Las pruebas se realizaron en el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB); las mediciones fueron realizados mediante monitoreo directo (medidor de monogas Tango X1) e indirecta (medición de pesos). Los resultados indican que la mayor adsorción del H_2S se dio en la torre de lecho fijo 2 con una eficiencia de 99,58 %. En cuanto a la variación de pesos incrementó 69,0 g en comparación con el tratado con HCl y NaOH que tuvo 28,6 g.

Palabras-clave: Adsorción, biogás, sulfuro de hidrógeno, torres de lecho fijo.

Adsorption of hydrogen sulfide from biogas through pretreated iron shavings for energy reuse

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the efficient hydrogen sulphide (H_2S) adsorption system between fixed bed 1 to iron shavings pretreated with hydrochloric acid (HCl) and sodium hydroxide (NaOH) at 5,0% and hydrogen peroxide (H_2O_2) with sodium chloride (NaCl) fixed bed tower 2. Tests were performed on the Upflow Anaerobic Reactor (UASB); the measurements were made through direct monitoring (meter of monogas Tango X1) and indirect (measurement of weights). The results indicate that the highest adsorption of H_2S occurred in the fixed bed tower 2 with an efficiency of 99, 58 %. As for the weight variation, it increased 69,0 g compared to the one treated with HCl and NaOH, which had 28,6 g.

Keywords: Adsorption, biogas, hydrogen sulfide and fixed bed towers

INTRODUCCION

El biogás es una fuente de energía renovable y sostenible producido por fermentación anaeróbica de materia orgánica (García 2014). El biogás contiene un porcentaje de 40 a 75 % de metano (CH_4), 15 a 60 % de dióxido de carbono (CO_2) y constituyentes menores tales como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3). El H_2S es el contaminante más común que restringe el uso directo de biogás, ya que acelera la corrosión de los servicios públicos y reduce la vida útil de las tuberías y otras instalaciones (Varnero et al. 2012). La concentración de H_2S en el biogás puede variar de 0,1 a 2,0 % es decir a (1000 – 20000 ppm). Sin embargo; los que industrializan la electricidad recomiendan valores límites entre 0,01 a 0,03 % v/v (100 a 300 ppm) para controlar el problema de la corrosión en los sistemas.

El Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR-UNI), cuenta con un tratamiento primario de aguas residuales, formado por un proceso de tratamiento anaerobio de Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) y lagunas secundarias. Sin embargo; posee el problema de olores, principalmente por la producción de biogás en el reactor UASB. Una investigación realizada por Krayzelova et al. (2014) afirma la presencia de 34 % de sulfuro de hidrógeno en el biogás y sulfuro de 49 % en un reactor UASB siendo el caso de CITRAR-UNI. Según Tilahun et al. (2017) el biogás producido en el reactor UASB, emite olores desagradables para el ambiente y dañinos para la salud ya que tiene impurezas (sulfuro de hidrogeno y mercaptanos).

Desde el año 1996 el Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR FIA-UNI) se ha caracterizado por ser un centro de formación y capacitación para estudiantes y profesionales interesados en el desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo; en los últimos años se ha desencadenado un conflicto socio ambiental con los pobladores de los asentamientos humanos El Milagro y El Ángel, poblaciones que se encuentran aledañas al CITRAR. La causa principal es el problema de olores desagradables debido a que se emplea en uno de los procesos el reactor UASB. Vergara et al. (2002) menciona que el sistema genera compuestos orgánicos volátiles sulfurados como el H_2S , principal causante del problema socio-ambiental.

La presencia de olores desagradables se debe a que CITRAR emplea en su proceso el tratamiento anaerobio. Este tratamiento está dada por la digestión anaeróbica, una solución atractiva al problema de la eliminación de lodos de depuradora, sin embargo, la materia orgánica se transforma en CH_4 y CO_2 por la acción de diferentes grupos de bacterias metanogénicas. Vergara et al. (2002) afirma que no solo se produce CH_4 , también se generan compuestos orgánicos volátiles sulfurados como el H_2S , principal causante de los desagradables olores, asimismo Shirai et al. (2013) mencionan que se caracteriza por ser un gas incoloro, posee olor a huevo descompuesto, crea una llama azul cuando quema y crea un gas tóxico, el dióxido de azufre (SO_2). Respirar o tener contacto con el H_2S sería muy peligroso y dañino para la salud.

El H_2S en el biogás afecta negativamente al rendimiento de la cogeneración al corroer algunos componentes críticos dentro del motor y tiene que ser eliminado para mejorar la calidad del biogás. Por ello es necesario la aplicación de una metodología de tratamiento de biogás económica y eficiente para la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con la finalidad de evitar el daño y los estándares de calidad requeridos de acuerdo con el uso final de biogás. Por tanto, la presente investigación tiene como objetivo el de evaluar la eficiencia de desulfuración de biogás generado en la planta, mediante la adsorción empleando virutas de hierro tratadas

previamente con reactivos quelantes con ciertas modificaciones a la metodología de Cendales (2006). El Instituto de Energía de Hanoi comprobó y recomendó tratar las virutas de hierro con soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) y ácido clorhídrico (HCl) al 5 % para acelerar la reacción siendo que la reacción hierro (Fe) y H₂S es muy lenta, para una remoción más efectiva del H₂S.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tratamiento del Sulfuro de Hidrógeno

Las pruebas de desulfuración de biogás se realizaron en el Centro de Investigación de Tratamiento de aguas Residuales y Residuos Peligrosos. Ubicado en el distrito de la Independencia de la ciudad de Lima. Las pruebas experimentales se realizaron en la estación de verano, teniéndose como valor máximo de concentración de sulfuro de hidrógeno (H₂S) el de 250 ppm y mínimo el de 30 ppm con la disminución de la radiación solar.

La relación de la concentración H₂S es directamente proporcional a la temperatura del ambiente. La cuantificación de la eficiencia del sistema se realizó mediante medición indirecta, que consistió en el pesado del medio adsorbente por capas cada 2 días, luego de que el biogás circule por las torres de lecho fijo durante 12 horas.

Se realizó la medición directa, que consistió en medir con el detector monogas por difusión Tango Tx1-Doble sensor durante dos semanas la concentración de H₂S en el afluente y efluente de las torres de lecho fijo, todas las mediciones se realizaron in situ.

Tratamiento de Virutas de hierro

Se realizó la limpieza de las virutas para eliminar residuos de ácidos grasos y otras impurezas, se procedió a secar, seguido a ello se sumergieron las virutas limpias en una solución de HCl a 5 % por 10 minutos, se extrajeron y se dejaron secar a medio ambiente. Posteriormente se sumergió todo en una solución de NaOH al 5 % durante 10 min, se extrajo y se dejó secar al medio ambiente. Del mismo modo en la torre de lecho fijo 2 se utilizó una solución de peróxido de hidrógeno y NaCl para el secado durante 30 min.

Diseño de las torres de lecho fijo

Se realizó la construcción de dos torres de lecho fijo con una altura de 37 cm, y 10,2 cm de diámetro, los datos considerados para el diseño fueron de 111,6 L/h de biogás, temperatura de ambiente 19 °C y concentración máxima del sulfuro de hidrógeno de 180 ppm registrados por 3 años.

Los materiales, equipos y reactivos empleados fueron tubos de PVC, llaves de paso, mangueras de conducción de ½", bomba de succión de 25 L/s, y los reactivos fueron la solución de ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH) al 5 %, 100 mL de cada uno, peróxido de hidrógeno (H₂O₂), 250 mL y cloruro de sodio (NaCl), 100 g.

Diseño y análisis estadístico

Para el tratamiento de datos se aplicó el diseño estadístico de regresión y correlación para ajustar a un modelo de primer orden; para ejecutar las comparaciones se aplicó la prueba T de variables dependientes, para el análisis se realizó el ajuste, la normalidad, ANOVA a 95 % y gráficos de comparación a intervalo de confianza, utilizando el programa Statistic 13.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la medición directa

La medición se realizó teniendo en cuenta la variación de los pesos de cada torre de lecho fijo compuesta por virutas de hierro sometidas ambas a tratamiento químico previo, ya que según la revisión bibliográfica el sulfuro de hierro al entrar en contacto con el hierro precipita lo cual se identifica al producirse una coloración negruzca.

La eficiencia se determinó con la ecuación 1 con los datos obtenidos de un monitoreo continuo del afluente de biogás (biogás antes de pasar por el medio adsorbente) y efluente (biogás luego del medio adsorbente).

$$E (\%) = 100(Ca-Ce)/Ca \quad (1)$$

donde:

Ca = concentración del sulfuro de hidrógeno, afluente a las torres de lecho fijo

Ce = concentración del sulfuro de hidrógeno, efluente a las torres de lecho fijo.

E = eficiencia de remoción del sulfuro de hidrógeno (%)

Para comparar las eficiencias entre la torre de lecho fijo 1 y 2 se calculó el promedio total diario de las eficiencias determinadas de cada torre, obteniéndose que el promedio total de la torre de lecho fijo 1 fue de 96,36 % de eficiencia y de la torre de lecho fijo 2 fue 99,70 %. Según este análisis la torre de lecho fijo 2 obtuvo una eficiencia relativamente mayor en la adsorción del H₂S en comparación con la torre de lecho fijo 1 como muestra la tabla 1. La figura 1 muestra el incremento gradual de pesos en función del tiempo, donde la torre de lecho fijo 2 tiene un incremento mayor respecto a la torre de lecho fijo 1. Según la figura 2, la torre de lecho fijo 2 que fue sometida a un tratamiento previo con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y NaCl, presentó un incremento de 69,4 g, valor mayor al que obtuvo la torre de lecho fijo 1 que fue sometida a un tratamiento previo con HCl y NaOH, que obtuvo un incremento de 28,6 g, por lo que se puede afirmar que la torre de lecho fijo 2 presentó un mayor rendimiento respecto a la torre de lecho fijo 1.

La tabla 2 muestra la comparación de variables dependientes de las dos torres, las virutas de hierro como medio de adsorción tienen un efecto estadísticamente significativa entre el tratamiento Pre y Post para la concentración del H₂S teniendo p=0,0003 y 0,0004 respectivamente, y en la figura 1 se observa la comparación por gráfico de Box y Whisker, la adsorción de H₂S del post tratamiento entre ambas torres que fueron de 8,21 y 0,74 ppm respectivamente, evidenciando que la torre de lecho fijo 2 tuvo un óptimo de menor concentración de H₂S.

La figura 2 muestra las comparaciones entre Pre y Post de las torres 1 y 2, se observa una concentración menor del sulfuro de hidrogeno en Post en los dos tratamientos de la torre de lecho fijo 2, lo que indica una diferencia significativa en cuanto a las medias de los datos de la concentración de H₂S del post tratamiento de las torres de lecho fijo 1 y 2 con concentraciones de 8,22 y 0,74 ppm respectivamente.

La tabla 3 indica que existe un efecto significativo de comparación entre el tratamiento Post para la torre 1 y la torre 2. La figura 2 corrobora que el tratamiento Post de la torre de lecho fijo 2 en la adsorción del sulfuro de hidrógeno en cuanto a medias de los datos de la concentración de H₂S del afluente 74,58 y efluente 0,74 ppm.

Tabla 1. Result. de efíc. de adsorción de H₂S de entrada y salida de torres de lecho fijo 1 y 2

Tiempo		Afluente	Torre de Lecho fijo 1 HCl y NaOH		Torre de Lecho fijo 2 H ₂ O ₂ y NaCl	
Día	Hora	Concentración de H ₂ S (ppm)	Efluente Concentración de H ₂ S (ppm)	Eficiencia de adsorción del H ₂ S (%)	Efluente Concentración de H ₂ S (ppm)	Eficiencia de adsorción del H ₂ S (%)
0	09:30	32,7	0	100	0	100
	11:00	42,4	0	100	0	100
	12:30	32,1	0	100	0	100
	13:30	4,1	0	100	0	100
	14:30	8,1	0	100	0	100
2	10:30	48,4	0	100	0	100
	11:30	36	0	100	0	100
	12:30	28,3	0	100	0	100
	13:30	20,4	0	100	0	100
	14:30	22,4	0	100	0	100
	15:30	5,9	0	100	0	100
4	09:30	77,7	6,9	91,119	0	100
	10:30	171,5	21,7	87,346	1,5	99,125
	11:30.	268,9	24,2	91,000	2,5	99,070
	12:30	235,4	52,3	77,782	5,1	97,833
	14:00	79	6,1	92,278	1,1	98,607
	15:00	19,7	5,9	70,050	0,5	97,461
8	10:30	21	0,1	99,523	0	100
	11:30	83	10,5	87,349	0	100
	12:30	95,2	12	87,394	1,2	98,730
	14:30	33,2	2,7	91,867	0	100
	15:30	14,4	1	93,055	0	100
9	10:30	26,6	1,3	95,112	0	100
	14:30	17,4	0,9	94,827	0	100
	15:30	9,9	0	100	0	100
11	09:30	28,2	0	100	0	100
	12:30	84,4	3,4	95,971	1,4	98,341
	13:30	85,7	5	94,165	0,5	99,416
	14:30	41	2,1	94,878	0	100
	15:30	28,8	0	100	0,3	98,958
Promedio				94,79±7.23		99,58±0.73

Tabla 2. Prueba T para muestras dependientes de Pre y Post de torre de lecho fijo 1y 2

Variables	Diferencias marcadas significativas en p <0,05							
	Media	SD	N	Dif.	S.D. Dif.	t	df	p
Pre (Torre 1)	74,78	74,58						
Post (Torres 1)	8,21	12,77	19	66,57	63,73	4,55	18	0,0003
Pre (Torre 2)	74,78	74,58						
Post (Torre 2)	0,74	1,27	19	74,05	73,50	4,4	18	0,0004

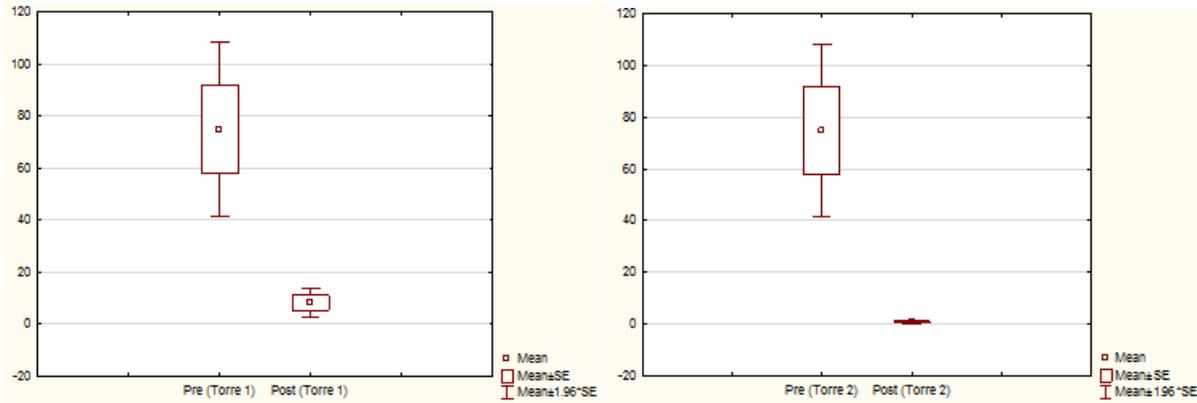


Figura 1. Comparación de la eficiencia de remoción de Pre y Post de torres 1 y 2

Tabla 3. Prueba T para muestras dependientes de comparación de la eficiencia de concentración Post torre 1 y 2

Variable	Las diferencias marcadas son significativas en $p < 0,05$									
	Media	SD	N	Dif	S.D. Dif.	t	df	p	Confianza -95,000 %	Confianza +95,000 %
Post Torre 1	8,22	12,75								
Post Torres 2	0,74	1,27	19	7,47	11,58	2,81	18	0,011	1,89	13,05

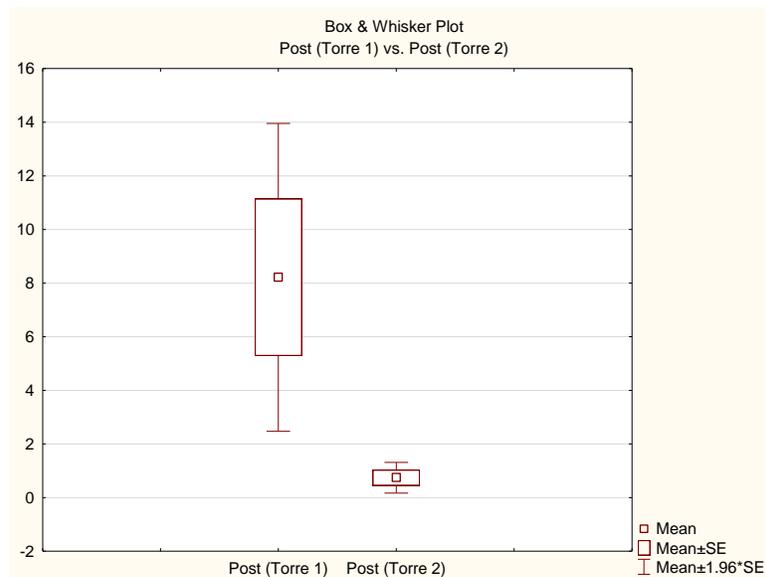


Figura 2. Comparación de la eficiencia de la remoción del H₂S para torre 2 y 1

La tabla 4 muestra los resultados del monitoreo indirecto mediante el medio adsorbente y variación de adsorbente en peso de las virutas de hierro empleadas como medios de remoción del H₂S.

Tabla 4. Resultados del monitoreo en función de los pesos del medio adsorbente del H₂S

Trat.	Día	Torre de Lecho fijo 1: HCl y NaOH		Torre de Lecho fijo 2: H ₂ O ₂ y NaCl	
		Medio adsorbente (g)	Variación (g)	Medio adsorbente (g)	Variación (g)
1	0	358,1	0	429,2	0
2	1	360,7	2,6	432,4	3,2
3	5	358,9	0,8	435,4	6,2
4	8	363,0	4,9	442,0	12,8
5	12	361,2	3,1	443,6	14,4
6	22	364,2	6,1	456,6	27,4
7	29	369,7	11,6	468,6	39,4
8	33	369,7	11,6	469,4	40,2
9	43	374,9	16,8	482,7	53,5
10	50	378,5	20,4	489,7	60,5
11	56	379,9	21,8	491,0	61,8
12	57	384,6	26,5	496,3	67,1
13	61	381,6	23,5	498,4	69,2
14	64	386,7	28,6	498,2	69,0

La figura 3 muestra la diferencias de eficiencia en la variación de adsorción entre las torres de lecho fijo 1 y 2. La torre de lecho de fijo 2 tiene un comportamiento lineal con un ajuste de 0,99 y la torre de lecho fijo 1 también lineal con ajuste de 0,96 en la variación de peso de adsorbente en su relación con el tiempo.

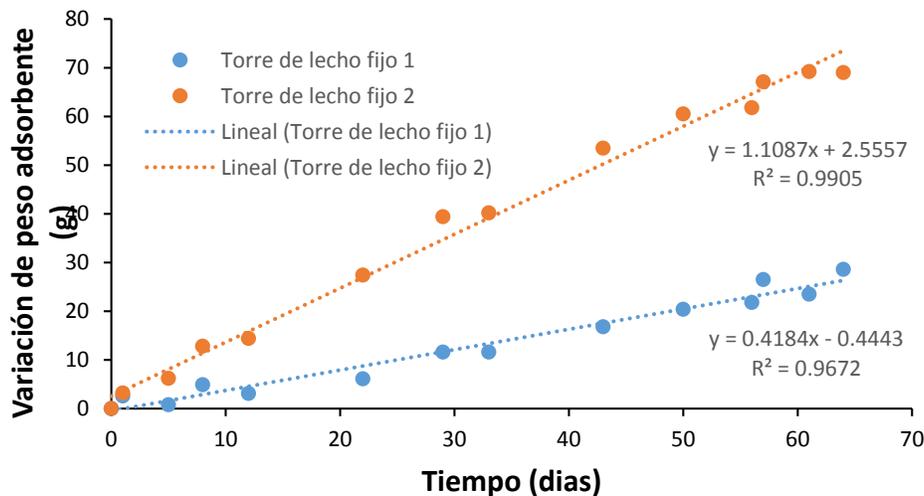


Figura 3. Variación de peso del medio adsorbente en función a tiempo

La tabla 5 muestra el análisis de varianza (ANOVA) de peso entre las dos torres, lo que estadísticamente indica que existe una distribución normal en los datos observados y que tiene un efecto significativo en la regresión lineal de la variación de peso con respecto al tiempo. La torre de lecho fijo 2 muestra que tiene una mejor adsorción de la concentración el proceso de remoción del sulfuro de hidrógeno.

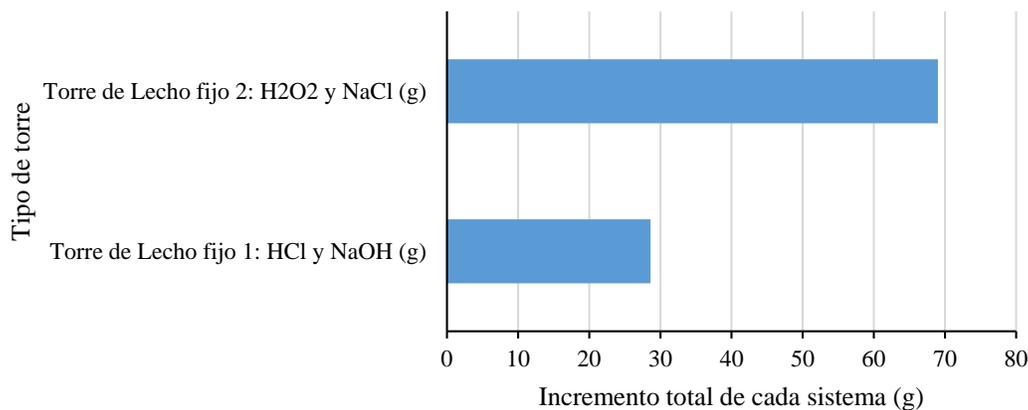
Tabla 5. Análisis de variancia (ANOVA) de variación de peso en torres de lecho fijo 1 y 2

Efecto	Torre de lecho fijo 1					Torre de lecho fijo 2				
	SS	dF	MS	F	p	SS	dF	MS	F	p
Regresión	1279,32	1	1279,32	354,09	0,000	8981,88	1	8981,88	1254,15	0,000
Residual	43,355	12	3,613			85,940	12	7,162		
Total	1322,67					9067,82				

En la tabla 6 se muestra que la torre de lecho fijo 2 tiene un mayor efecto significativo de adsorción que la torre de lecho fijo 1, asimismo corroborada en la figura 4 en la gráfica de histograma. Esto indica que el peso de las virutas de hierro fue mayor lo que implica mayor adherencia del H₂S en las virutas de hierro, por tanto la mayor eficiencia en la adsorción del H₂S.

Tabla 6. Prueba T para muestras independientes de variación de peso en torres de lecho fijo 1 y 2

Variable	Las diferencias marcadas son significativas en p <0,05							
	Media	SD	N	Diff.	S.D. Dif.	t	df	p
Torre de lecho fijo 1	12,73571	10,08682						
Torre de lecho fijo 2	37,47857	26,41070	14	-24,7429	16,68047	-5,55	13	0,000094

**Figura 4. Diferencia de incremento total de cada sistema de tratamiento**

La tabla 7 muestra los valores de análisis de eficiencia en función de pesos, según el análisis de variación de pesos respecto al peso inicial de las mallas antes de ser sometidas a los tratamientos respectivos. La torre de lecho fijo 2, que fue sometida a un tratamiento previo con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y NaCl presentó un incremento de 69 g, valor mayor al que obtuvo la torre de lecho fijo 1, que fue sometida a un tratamiento previo con HCl y NaOH y obtuvo un incremento de 28,6 g, por lo que se puede deducir que la torre de lecho fijo 2 presentó un mayor rendimiento respecto a la torre de lecho fijo 1.

Tabla 7. Análisis de eficiencia en función de los pesos

Torre de Lecho fijo 1: HCl y NaOH (g)		Torre de Lecho fijo 2: H ₂ O ₂ y NaCl (g)	
m (g)	Δ: mf-mi (g)	m (g)	Δ: mf-mi (g)
358,10	0,0	429,2	0,0
360,70	2,60	432,4	3,2
358,90	-1,80	435,4	3,0
363,00	4,10	442,0	6,6
361,20	-1,80	443,6	1,6
364,20	3,00	456,6	13
369,70	5,50	468,6	12
369,70	0,00	469,4	0,8
374,90	5,20	482,7	13,3
378,50	3,60	489,7	7,0
379,90	1,40	491,0	1,3
384,60	4,70	496,3	5,3
381,60	-3,00	498,4	2,1
386,70	5,10	498,2	-0,2
Incremento Total	28,60	Incremento Total	69,0

Según el análisis de regresión lineal aplicado a los datos monitoreados en función del peso de los medios adsorbentes de las torres de lecho fijo 1 y 2, en la figura 5 se afirma que las torres 1 y 2 tienen un comportamiento lineal del medio adsorbente con relación con el tiempo, con ajuste de coeficiente de determinación (R^2) de 0,991 y 0,967 respectivamente, existe una distribución normal y tienen un efecto linealmente significativo (tabla 8). La torre de lecho fijo 2 pre tratada con ácido H₂O₂ y NaCl es más eficiente en adsorción que la torre de lecho fijo 1, ya que existe una relación positiva entre las dos variables, la pendiente 1,1087 de la recta de torre de lecho fijo 2 que corta con el eje horizontal es mayor que la pendiente de la torre de lecho fijo 1.

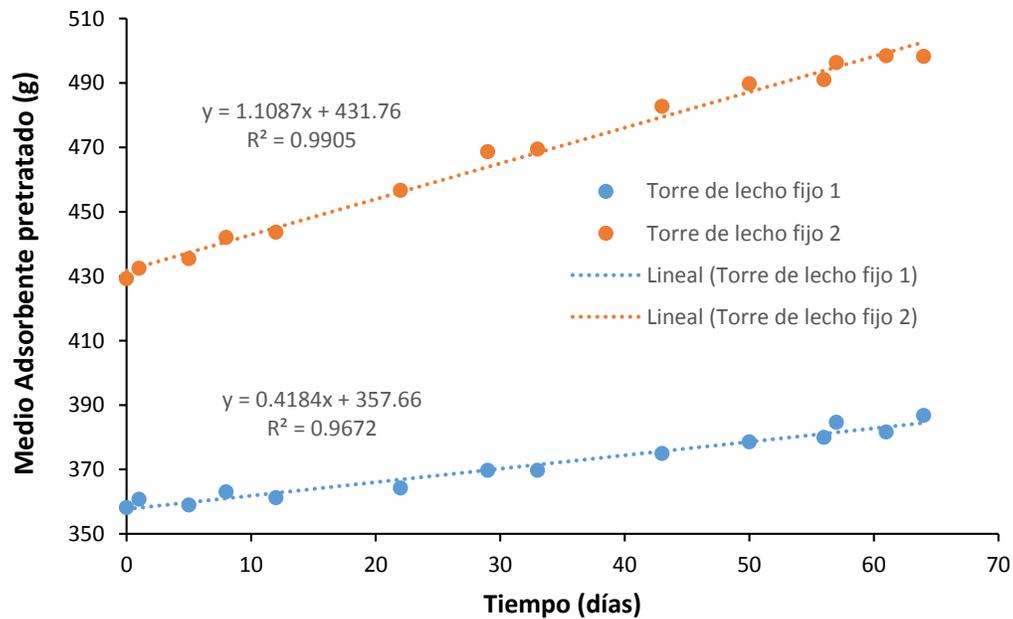


Figura 5. Comportamiento del peso en función del tiempo torre 1 y torre 2

Tabla 8. Análisis de variancia (ANOVA) medio adsorbente en torres de lecho fijo 1 y 2

Efecto	Torre de lecho fijo 1					Torre de lecho fijo 2				
	Df	SQ	MQ	F	p	Df	SQ	MQ	F	p
Regresión	1	1279,317	1279,317	354,0977	0,000	1	8981,883	8981,883	1254,157	0,000
Residual	12	43,35473	3,612894			12	85,94025	7,161687		
Total	13	1322,672				13	9067,824			

La tabla 9 muestra la comparación entre medios adsorbentes en torres de lecho fijo 1 y 2, indicando que existe una diferencia significativa entre las torres, la torre de lecho fijo 2 muestra como media 37,48 e indica la concentración de H₂S; en ese medio adsorbente el H₂S es menor, comparada con la torre de lecho fijo 1 se tiene 370,84, lo que corrobora la eficiencia del sistema 2 en la desulfuración de biogás.

Tabla 9. Prueba T para muestras dependientes de medios adsorbentes en torres de lecho fijo 1 y 2

Variable	Las diferencias marcadas son significativas en p <0,05							
	Media	SD	N	Dif.	S.D. Dif.	t	Df	p
Torre de lecho fijo 1	370,835	101,744	14	-21,4988	1,77093	2,160	13	0,000000
Torre de lecho fijo 2	37,47857	26,41070	14					

Las soluciones de hidróxido de sodio son muy efectivas para eliminar CO₂ y H₂S, el H₂S se adsorbe rápido por lo que se puede conseguir una selectividad parcial con tiempos de contacto (Araujo y Vázquez 2015). La remoción del sulfuro de hidrógeno (H₂S) del biogás puede ser a través de la adsorción, donde los materiales utilizados deben contener óxidos, óxidos hidratados o hidróxido de hierro.

Siendo el caso empleado, con una diferencia de pre tratamiento de las virutas de hierro (Muñoz 2007) para evitar la presencia de óxidos de hierro y solventes en las virutas fue necesario someterlas a un proceso de lavado. Para ello se utilizó una solución de HCl con 0,1 N. Posterior a ello se realizó un lavado con NaOH formándose la reacción siguiente, ver ecuación (2), para neutralizar la reacción y tener aún más eficiencia en la adsorción del gas H₂S.



Los materiales utilizados fueron el Fe₂O₃ y el hidróxido de hierro superficie Fe (OH)₃, los cuales capturan el sulfuro de hidrógeno en su superficie interior, formando sulfuro de hierro y agua, ecuaciones (3) y (4).



Las reacciones de formación del sulfuro de hierro para el óxido e hidróxido de hierro fueron ligeramente endotérmicas, siendo necesario una temperatura mínima de 12 °C para que las mismas ocurran, la temperatura del ambiente se encontraba en ese rango, haciendo posibles las reacciones para la desulfuración de biogás. Por otro lado Muñoz (2007) afirma que las soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) son muy efectivas para eliminar el CO₂ y H₂S, el H₂S se adsorbe rápido por lo que se puede conseguir una selectividad parcial con tiempos de contacto bajos y a bajas temperaturas.

Las soluciones alcalinas presentan una alta eficiencia, sin embargo deben ser mantenidas a altos valores de pH para evitar la liberación de H₂S. En los resultados del presente trabajo se obtuvo una eficiencia de remoción de 96,36 %. El sistema pre tratado con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y cloruro de sodio (NaCl) mostró una eficiencia mayor, ya que al reaccionar el cloruro de sodio con el hierro se forma el cloruro férrico, compuesto que adsorbe el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y lo transforma en sulfuro de hierro.

Ello se debe al incremento del poder del agente oxidante del peróxido de hidrógeno al entrar en contacto con el cloruro férrico. Según Esplugas et al. (2002) y Pignatello et al. (2006) al combinar el peróxido de hidrógeno con hierro en fase homogénea reacciona formando radicales hidroxilo OH; este radical libre tiene un fuerte poder de oxidación y se forma por la descomposición catalítica del peróxido de hidrogeno en medio ácido.

Durante la etapa de monitoreo se cuantificó un incremento significativo en el peso de las virutas de hierro respecto al peso inicial, lo cual fue un indicador de que se llevaba a cabo el mecanismo de adsorción del gas H₂S y asimismo se observó una clara diferencia de cambio de color respecto a la inicial. En los resultados se obtuvo que el incremento total en peso de la torre de lecho fijo 1 fue de 28,6 g y el de la torre de lecho fijo 2 de 69 g, por lo que se evidenció que la torre de lecho fijo 2, fue la que tuvo mayor eficiencia en la adsorción del sulfuro de hidrógeno.

CONCLUSIONES

La desulfuración del biogás generado por un reactor UASB, en mayor remoción se logró con la torre de lecho fijo 2 con medio de adsorción de virutas de hierro pre tratadas con peróxido de hidrógeno y cloruro de sodio con una eficiencia de 99,58 % de remoción, en comparación con la torre de lecho fijo 1 tratada previamente con ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH) que obtuvo una eficiencia de 94,79 % por medición directa, permitiendo el reaprovechamiento energético del biogás.

Es posible determinar la eficiencia de remoción del H₂S mediante diferencia de pesos del medio adsorbente respecto a la inicial, el medio adsorbente sometido a un tratamiento previo de los mismos reactivos mencionados anteriormente presentó un incremento de 69 g respecto a la inicial en comparación con el tratado con HCl y NaOH en que se obtuvo solo 28,6 g; a mayor diferencia de peso mayor eficiencia en la adsorción del H₂S en el sistema. Por tanto, la torre de lecho fijo 2 presenta mayor eficiencia en la remoción del sulfuro de hidrógeno.

Las virutas de hierro pre tratadas con ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH) al 5 % para una de las torres de lecho fijo 1 y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) con cloruro de sodio (NaCl) para el segundo, demostraron estadísticamente que su eficiencia de adsorción del gas (H₂S) es mayor en comparación con las virutas de hierro empleadas sin ningún tratamiento.

REFERENCIAS

- Araujo, A. G. T. y Vázquez, J. A. R.** (2015). “Técnicas para la disminución en la concentración de ácido sulfhídrico en el biogás”. *Jóvenes en la Ciencia*, Vol. 5, 2019, ISSN 2395-9797, Universidad de Guanajuato, Salamanca, México.
- Cendales A.** (2006). “Utilización del metano generado en un reactor anaerobio como fuente de energía en una industria de gaseosas”. Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad De La Salle, Bogotá.
- Esplugas S., Gimenez J., Contreras S., Pascual E. and Rodriguez M.** (2002). “Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation”, Elsevier, Vol.36, no.4, pp. 1034-1042, ISSN 0043-1354, Depto. de Ing. Química y Metalurgia de la Universidad de Barcelona, Barcelona, España.
- Garcia C.** (2014). “Montagem e operação de unidade de adsorção em leito fixo para remoção de H₂S de corrente gasosa”, Tesis de maestría, Departamento de hidráulica y saneamiento, Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil.
- Krayzelova L., Bartacek J., and Nina Kolesarova, P. J.** (2014). “Microaeration for hydrogen sulfide removal in UASB reactor”, Elsevier, vol. 172, pp. 297-302, ISSN 0960-8524, Institute of Chemical Technology, Prague, Czech Republic.
- Muñoz M.** (2007). “Viabilidad de un proceso para la eliminación conjunta de H₂S y NH₃ contenido en efluentes gaseosos”, Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz, Andalucía, España.
- Pignatello J., Oliveros E. and Mackay A.** (2006). “Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 36, pp. 1-84, ISSN 1547-6537, Connecticut Agricultural Experiment Station, Connecticut, USA.
- Shirai H., Ikeda M., and Aramaki H.** (2013). “Characteristics of hydrogen sulfide formation in pulverized coal combustion”, Elsevier, vol. 114, pp. 114-119, ISSN 0016-2361, Central Research Institute of Electric Power Industry, Nagasaka, Japan.
- Tilahun E., Bayrakdar A., Sahinkaya E., and Calli B.** (2017). “Performance of polydimethylsiloxane membrane contactor process for selective hydrogen sulfide removal from biogas”. Elsevier, vol. 61, pp. 250-257, ISSN 0956-053X, Department of Environmental Engineering, Marmara University, Turkey.
- Varnero M., Carú M., Galleguillos K. y Achondo P.** (2012). “Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica”, *Información Tecnológica*, vol. 23, no. 2, pp. 31 – 40, ISSN 0718-0764, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Vergara A., Aroca G., Alarcón N. and Montoya F.** (2002). “Modeling and simulation of a Biofilter for Treatment of Gas Contaminated with Sulfur Compounds.” *Información Tecnológica*, vol.13, no. 3, pp.17–24, ISSN 0716-8756, Universidad Católica de Temuco, Temuco, Chile.