



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS MEDIANTE UNA COLUMNA DE ABSORCIÓN EN RÉGIMEN CONTINUO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO

**TESIS COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN
CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL**

P R E S E N T A

DIANA LAURA MORENO MORALES

DIRECTOR

DR. JOSÉ APOLINAR CORTÉS

CODIRECTOR

DR. OMAR CAMPUZANO CALDERÓN



MCIA
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH

MORELIA, MICHOACÁN; MARZO 2026



Índice contenido

Índice contenido	2
Lista de Figuras	4
Lista de Tablas	7
Resumen	8
abstract	8
1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 El biogás y principales impurezas	9
1.2 Antecedente histórico de la producción de biogás	10
1.3 Métodos más utilizados para purificar el biogás	10
1.4 Criterios de diseño para proceso de purificación del biogás	11
2 MARCO TEÓRICO	12
2.1 Generalidades	12
2.1.1 Biogás	12
2.1.2 Digestión anaerobia	13
2.2 Remoción de contaminantes del biogás	16
2.3 Sulfuro de hidrógeno	16
2.3.1 Reacción del H ₂ S con Hidróxido de Calcio [Ca(OH) ₂]	17
2.4 Dióxido de carbono	17
2.4.1 Reacción del CO ₂ con Hidróxido de Calcio [Ca(OH) ₂]	18
2.3 Torres de absorción	19
2.3.1 Empaque	22
3 ANTECEDENTES	23
3.1 Métodos para la purificación del biogás	24
3.1.1 purificación de biogás con NaOH:	24
3.1.2 purificación del biogás con dietanolamina:	25
3.1.3 purificación del biogás con metanol.	27
3.1.4 purificación del biogás con polietilenglicol (PEG)	29
3.1.5 purificación del biogás con N-metilpirrolidona (purisol) :	31
3.1.6 Absorción con Hidróxido de calcio [Ca(OH) ₂]	32
4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	34
4.1 Problemática general	34
4.2 Problemática específica	34
5 JUSTIFICACIÓN	35
6 HIPÓTESIS	36
7 OBJETIVOS	36
7.1 Objetivo general	36



7.2 Objetivos específicos	36
8 METODOLOGÍA	37
8.1 Diseño y construcción	37
8.1.1 Columna de absorción	39
8.1.2 Tanque de almacenamiento de biogás tratado	42
8.1.3 Tanque de medición de líquido desplazado	43
8.1.4 Tanque de almacenamiento de Ca(OH)_2	44
8.1.5 Elaboración de las Soluciones de Ca(OH)_2	45
8.1.6 Tanque de biogás	45
8.2 Experimentación	47
8.2.1 Operación de la columna de absorción	47
8.2.3 Variables de proceso	48
8.2.4 Altura del empaque	49
8.3 Parámetros de operación	50
8.3.1 Flujo de biogás inyectado	50
8.3.2 Holdup	50
8.3.3 Consumo energético	51
8.3.4 Tiempo de residencia	52
8.4 Operación general	52
8.4.1 Presión de operación	52
8.4.2 Diseño de experimento	53
8.5 Técnicas para determinaciones	55
8.5.1 Sulfatos	55
8.4.2 Carbonatos y bicarbonatos	57
8.4.3 Sulfuros	59
8.4.4 Dureza cálcica	60
8.4.5 Hidróxidos	62
9 ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
9.1 Construcción e instalación	63
9.1.1 Columna de absorción	63
9.1.2 Tanque de almacenamiento de biogás tratado	65
9.1.3 Tanque de medición de líquido desplazado	66
9.1.4 Tanque de almacenamiento de Ca(OH)_2	67
9.2 Experimentación	68
9.2.1 Determinaciones de valores del solvente y de la solución	68
9.3 Operación de la columna de absorción	70
9.3.1 Diseño de experimentos (Taguchi)	70



9.3.2 Corrida No. 1	74
9.3.4 Corrida No. 3	80
9.3.7 Corrida No. 6	86
9.3.9 Corrida No. 8	92
9.3.10 Composición del biogás purificado en función de las corridas del diseño experimental	98
10 CONCLUSIONES	99
11 RECOMENDACIONES	100
REFERENCIAS	101
ANEXOS	104
Anexo A	104
Anexo B	107

Lista de Figuras

<u>Figura 2.1 Diagrama de las fases de la digestión anaerobia</u>	<u>15</u>
<u>Figura 2.2 Diagrama de disociación de CO₂ en agua (Campuzano,2017).</u>	<u>18</u>
<u>Figura 2.3 Figura 2.3 Representación de una columna en contracorriente</u>	<u>19</u>
<u>Figura 2.4 Diagrama de reactor de columna de burbujeo (Campuzano, 2017)</u>	<u>21</u>
<u>Figura 2.5 Anillo Rasching</u>	<u>22</u>
<u>Figura 3.1. Purificación de biogás por medio de absorción química utilizando NaOH como solvente (Pacheco 2016).</u>	<u>24</u>
<u>Figura 3.2. Diagrama de bloques del proceso de purificación de biogás por medio de absorción química utilizando dietanolamina como solvente (Pacheco 2016).</u>	<u>26</u>
<u>Figura 3.3. Diagrama de bloques del proceso de purificación de biogás por medio de absorción utilizando metanol como solvente (Pacheco, 2016).</u>	<u>28</u>
<u>Figura 3.4. Diagrama de bloques del proceso de purificación de biogás por medio de absorción utilizando polietilenglicol como solvente (Pacheco, 2016).</u>	<u>29</u>
<u>Figura 3.5. Diagrama de bloques del proceso de purificación de biogás por medio de absorción utilizando N-metilpirrolidona como solvente.</u>	<u>31</u>
<u>Figura 3.6. Diagrama del reactor de columna de burbujeo (Campuzano, 2017)</u>	<u>33</u>



Figura 8.1 Diagrama de proceso de la columna de absorción.	38
Figura 8.2 Diagrama del reactor.	41
Figura 8.3 Diagrama del tanque de almacenamiento de gases	42
Figura 8.4 Diagrama del tanque de almacenamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	44
Figura 8.5 Válvula reguladora de presión	46
Figura 8.6 Tanque de biogás modelo	46
Figura 8.7 Sensor de conductividad eléctrica	48
Figura 8.8 Sensor de pH y temperatura.	48
Figura 8.9 Cromatógrafo de gases	48
Figura 8.10 Anillo Rasching	49
Figura 8.11. Rotámetro para medición de gas.	50
Figura 8.12. Medidor digital de consumo eléctrico	51
Figura 8.13. Minitab diseño de experimentos.	53
Figura 9.1. Columna de absorción	64
Figura 9.2 Tanque de almacenamiento de biogás tratado	65
Figura 9.3 Tanque del desplazamiento del líquido.	67
Figura 9.4 Tanque de almacenamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.	62
Figura 9.5 Resumen del modelo.	71
Figura 9.6 Análisis de varianza de medias.	72
Figura 9.7 Respuesta de medias.	72
Figura 9.8 gráfica de efectos principales para medias	73
Figura 9.9 Gráfica del comportamiento del pH y CE (corrida 1).	75
Figura 9.10 Gráfica de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos (corrida No.1).	76
Figura 9.11 Gráfica de dureza cálcica (Corrida No.1)	77



<u>Figura 9.12 Gráfica de Sulfatos y Sulfuros (Corrida No.1).</u>	79
<u>Figura 9.13 Gráfica de biogás (Corrida No.1).</u>	80
<u>Figura 9.14 Gráfica de pH y CE (corrida No.3).</u>	82
<u>Figura 9.15 Gráfica de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos. (corrida No.3).</u>	83
<u>Figura 9.16 Gráfica de dureza cálcica (corrida No.3).</u>	84
<u>Figura 9.17 Gráfica de Sulfatos y Sulfuros (corrida No.3).</u>	85
<u>Figura 9.18 Gráfica de biogás (corrida No.3).</u>	86
<u>Figura 9.19 Gráfica de pH y CE (corrida No.6).</u>	88
<u>Figura 9.20 Gráfica de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos (corrida No.6).</u>	89
<u>Figura 9.21 Dureza cálcica (corrida No.6).</u>	90
<u>Figura 9.22 Gráfica de sulfatos y sulfuros (corrida No.6).</u>	91
<u>Figura 9.23 Gráfica de biogás (corrida No.6).</u>	92
<u>Figura 9.24 Gráfica de pH y CE (corrida No.8).</u>	94
<u>Figura 9.25 Gráfica de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos (corrida No.8).</u>	95
<u>Figura 9.26 Gráfica de dureza cálcica (corrida No.8).</u>	96
<u>Figura 9.27 Gráfica de sulfatos (corrida No.8).</u>	97
<u>Figura 9.28 Gráfica de biogás (corrida No.8).</u>	98
<u>Figura 9.29 Gráfica de biogás purificado de cada corrida.</u>	99
<u>Figura A1</u>	107
<u>Figura B1</u>	109
<u>Figura B2</u>	110
<u>Figura B3</u>	111



Lista de Tablas

<u>Tabla 2.1. Caracterización del biogás (Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, 1980).</u>	<u>13</u>
<u>Tabla 2.2 Valor Energético Biogás Vs. otras fuentes (FAO, 2011)</u>	<u>15</u>
<u>Tabla 8.1 Equipo y accesorios para construcción del reactor.</u>	<u>39</u>
<u>Tabla 8.2 Equipo utilizado en la medición de los parámetros.</u>	<u>48</u>
<u>Tabla 8.3. Diseño de experimentos niveles y variables.</u>	<u>53</u>
<u>Tabla 8.4. Resultados minitab, experimentación.</u>	<u>54</u>
<u>Tabla. 9.1 Determinaciones iniciales.</u>	<u>68</u>
<u>Tabla 9.2 Experimentación en el reactor.</u>	<u>70</u>
<u>Tabla 9.3 Condiciones iniciales y finales (Corrida No.1)</u>	<u>74</u>
<u>Tabla 9.4 Condiciones iniciales y finales (Corrida No.3)</u>	<u>81</u>
<u>Tabla 9.5 Condiciones iniciales y finales (Corrida No.6).</u>	<u>87</u>
<u>Tabla 9.6 Condiciones iniciales y finales (Corrida No.8)</u>	<u>93</u>



Resumen

Para el caso de esta investigación se abordó la purificación del biogás generado a partir de la digestión anaerobia para ser aprovechado como fuente de energía limpia y sustentable. Teniendo como objetivo remover impurezas que reducen el poder calorífico y dañan los equipos provocando corrosión, como lo es el dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S).

Se diseñó y construyó una columna de absorción en régimen continuo, implementando la solución de hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], la metodología incluyó, diseño de experimentos, para evaluar las diferentes variables como flujo de gas, el flujo de líquido, empaque y la concentración del absorbente, los resultados obtenidos mostraron una alta eficiencia de remoción de los contaminantes y se logró incrementar la concentración de metano.

abstract

In this research, the purification of biogas generated from anaerobic digestion was addressed in order to utilize it as a clean and sustainable energy source. The main objective was to remove impurities that reduce its calorific value and cause equipment damage due to corrosion, particularly carbon dioxide (CO_2) and hydrogen sulfide (H_2S).

An absorption column operating under continuous flow conditions was designed and constructed, implementing a calcium hydroxide [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] solution as the absorbent medium. The methodology included an experimental design to evaluate different operational variables such as gas flow rate, liquid flow rate, packing material, and absorbent concentration. The results obtained showed a high removal efficiency of the contaminants and an increase in methane concentration.

Palabras clave: metano, biocombustible, digestión anaerobia, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico



1 INTRODUCCIÓN

1.1 El biogás y principales impurezas

Las energías limpias son aquellas que, en sus procesos de extracción, procesamiento y distribución, generan impactos ambientales mínimos. Ejemplos de estas energías incluyen la geotérmica, solar, eólica, hidroeléctrica y bioenergía. Entre sus principales ventajas se encuentran las bajas emisiones de gases de efecto invernadero, vinculadas directamente al cambio climático. Además, estas fuentes son consideradas alternativas viables frente al petróleo, especialmente en el sector transporte (Islas y Martínez, 2010).

Dentro de la bioenergía se encuentra el biogás, que se genera a partir de la transformación de materia orgánica (residuos naturales o antropogénicos) por medio de la digestión anaeróbica. (FAO, 2011).

En esta investigación se aborda el aprovechamiento del biogás generado a partir de la digestión anaerobia de materia orgánica como fuente de energía renovable y sostenible, además Se planteó específicamente la eliminación de las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S) del biogás, este último genera corrosión en los sistemas de aprovechamiento, comprometiendo la integridad estructural de los sistemas de conducción y equipos de generación (Varnero *et al.* 2014). Con la purificación lograda, se obtendrá un biogás rico en metano (CH_4), aumentando su poder calorífico hasta en un 30% con respecto al biogás crudo (FAO, 2013). Esto significa incrementar el valor energético de 7 kWh/m³ a 10 kWh/m³, lo que mejora la eficiencia energética del sistema, elimina olores desagradables causados por el H_2S y cumpliendo con normas ambientales para su uso como combustible (FAO, 2011).

Es importante destacar que las fuentes de biogás son ampliamente accesibles tanto en zonas rurales como urbanas, lo que favorece su implementación como una alternativa energética viable. Asimismo, la industria del biogás contribuye a la generación de empleo y promueve la gestión sostenible de los residuos orgánicos. En este contexto, la técnica de *cofiring* (combustión simultánea de distintos materiales) con biogás ha sido implementada en centrales eléctricas a base de carbón, con el objetivo de reducir el consumo de combustibles fósiles. (Damara y Dermawan, 2020).

Según lo reportado por Damara y Dermawan (2020), una cantidad de 23.36 toneladas mensuales de residuos orgánicos tiene el potencial de generar 525.58 m³ de biogás por metro cúbico de reactor al día. Este volumen permitiría generar hasta 22,996.72 kWh anuales de energía, además



de contribuir a la reducción de emisiones, con disminuciones estimadas de 1.19 kg de CO₂ y 7.61 kg de CH₄ al año.

1.2 Antecedente histórico de la producción de biogás

Los registros históricos señalan que la primera planta destinada a la producción de metano se estableció en el hospital de leprosos de Matunga, India, en 1897. Posteriormente, en 1914, se implementó otra instalación en Indonesia que empleaba residuos de tableros de paja como sustrato gaseoso (Khanal, 2008). Asimismo, se desarrollaron prototipos experimentales en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial debido a la escasez de combustibles fósiles, periodo en el que el interés por el biogás alcanzó un desarrollo significativo, según Wellinger et al. (2013).

Hacia la década de 1940, el desarrollo tecnológico del biogás fue impulsado por investigadores franceses en el norte de África mediante el aprovechamiento de residuos agrícolas, para el año 1950 ya se encontraban operando cerca de 1,000 plantas distribuidas en dicha región y en Francia (FAO, 1996).

Debido a que a partir del año 1970 los combustibles incrementaron sus costos y, observando que los ciudadanos quemaban hasta el 50% de los desechos del ganado; el gobierno de la India llevó a cabo un programa para la construcción de plantas de biogás comunitarias, y con esto, pudo aprovechar esta energía limpia. En este país la tecnología de plantas de biogás ya ha pasado por diferentes etapas, como la etapa experimental (1937–1950), la de planta piloto (1950–1963) y, finalmente, la etapa de campo (desde 1964), con esto se podría decir que esta tecnología ha sido una alternativa viable (Wellinger et al., 2013; FAO, 1996).

1.3 Métodos más utilizados para purificar el biogás

Los métodos de purificación del biogás se clasifican en cinco categorías principales: absorción física o química, adsorción, oxidación química, oxidación biológica y separación por membranas.

En adsorción química, se emplean compuestos como óxido de hierro e hidróxido de hierro, mientras que la adsorción física se realiza con carbón activado o zeolitas (Bak *et al.*, 2019). Recientemente, se ha explorado el uso de columnas de lecho fijo que combinan absorción y adsorción, logrando eliminar hasta un 90 % del H₂S y cercanas al 100% de CO₂ (Kusrini *et al.*, 2019).



1.4 Criterios de diseño para proceso de purificación del biogás

El biogás está siendo explotado a nivel mundial como sustituto del gas natural en función con su poder calorífico. Aunque el gas natural tiene un poder calorífico de 10 kWh/m³, el biogás posee un poder calorífico aproximado de 6 a 6.5 kWh/m³ gracias a su porcentaje de CH₄ (FAO, 2011).

El poder calorífico del biogás depende de la concentración de metano, por lo que se puede aumentar eliminando el CO₂ presente. Por lo tanto, es esencial aumentar el valor calorífico del biogás mediante la eliminación de CO₂ y otros gases traza, como el H₂S, para aumentar el contenido de CH₄ (Aryal *et al.*, 2021).

Además, siempre es conveniente tener en cuenta que la composición del producto purificado (biogás), debido al rápido incremento del costo (no solo económico, sino también operativo) de eliminar mayor cantidad de componentes no deseados conforme aumenta el nivel de pureza. Por lo que es importante, basarse en el criterio de menor costo que cumpla con las limitaciones técnicas y medioambientales.

Actualmente, una de las desventajas del biogás es su alto costo de producción en comparación con el gas natural. El biogás se produce a partir de residuos orgánicos que requieren recolección, transporte y procesamiento, así como instalaciones específicas como digestores anaeróbicos y control del proceso. La purificación es uno de los factores que más elevan el costo, dado que el biogás contiene impurezas, siendo aproximadamente 7 a 12 veces más caro que la extracción del gas natural.

Según la Administración de Información Energética (EIA, 2024), el costo del gas natural en EE. UU. en julio de 2024 es del orden 3.61 dólares por millón de Btu. Sin embargo, es importante considerar que el costo ambiental y social del gas natural puede ser mayor debido a la emisión de gases de efecto invernadero y otros impactos negativos asociados con su extracción.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

En año de 1776 el físico italiano Alessandro Volta, identificó por primera vez el metano (CH_4) como el gas inflamable en las burbujas que emergen de los pantanos, no se pudo imaginar la importancia que este gas podría llegar a tener para la sociedad humana en los siglos que estaban por venir (FAO, 2011).

De esta forma, el biogás desempeña un papel especial en el escenario del cambio fundamental de los patrones de suministro de energía de hoy, porque la electricidad y el calor se pueden producir a partir de este cuando se necesiten (Baredar, et al., 2020).

El biogás puede ser una fuente alternativa para la producción de combustibles neutros en carbono, debido a que la cantidad de CO_2 emitida durante su producción y combustión es compensada por la cantidad de CO_2 absorbida durante su ciclo de vida. Además, el biogás ofrece materias primas de alta calidad para diversas industrias. Esta característica distingue al biogás de otras energías renovables (ER), haciéndolo una alternativa principal a los combustibles fósiles (FAO, 2011).

Se sabe que los procesos bioquímicos como la digestión anaerobia, posibilita la degradación de la fracción orgánica biodegradable presente en los residuos sólidos o en los vertederos sanitarios, transformándola en biogás con alto contenido en metano, susceptible al aprovechamiento para la generación de energía, la producción de calor en varios procesos industriales, como materia prima para una gama de productos; además, formando un residuo final estabilizado, con alta eliminación de microorganismos patógenos. Incluso, es de destacar que un sistema de biogás también utiliza material vegetal o animal para la generación de energía.

Es importante hacer énfasis en la importancia del biogás, dado que, de no aprovecharse, puede resultar perjudicial, porque el metano es un gas altamente inflamable, el ácido sulfhídrico puede causar problemas en la salud y el la mezcla de CO_2 y CH_4 son un gases de efecto invernadero.

2.1.1 Biogás

En la actualidad el biogás tiene una relevancia sumamente importante en el escenario del cambio de los patrones de suministro de energía, siendo una de las fuentes de energía más promisorias, puesto que es fácil de obtener, es una energía renovable, y además, es capaz de sustituir la energía proveniente de fuentes fósiles. Todos los posibles usos dependen de la calidad alcanzada, la cual deriva del tipo de refinado químico para eliminar contaminantes como N_2 , O_2 , H_2S , CO_2 y humedad.



Baena-Moreno *et al.*, (2019) afirman que el biogás es una mezcla gaseosa que, dependiendo de los materiales orgánicos, el tiempo de digestión y las condiciones del proceso, contiene varios componentes que son: CH₄ (50-70 %), CO₂ (30-50 %) y otros gases traza (0.1-3 %). Su alto contenido de CO₂ da como resultado un bajo valor calorífico, y se requiere una mayor purificación del gas resultante para eliminar el CO₂. Algunos métodos de purificación incluyen la adsorción con diferenciales de presión, la adsorción y la absorción química (Leonzio, 2016). Incluso, hace más de 40 años, el Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, ya tenía una caracterización promedio del biogás, la cual se observa en la **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1. Caracterización del biogás (Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, 1980).

Componentes	Fórmula Química	Porcentaje (% v/v)
Metano	CH ₄	60-70
Dióxido de Carbono	CO ₂	30-40
Hidrógeno	H ₂	1.0
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0.1

2.1.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es una tecnología ampliamente utilizada para el tratamiento eficiente de aguas residuales de origen agrícola y urbano. Este proceso se basa en la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, mediante la acción de consorcios microbianos.

En la **Figura 2.1** se presenta un diagrama que ilustra las principales fases de este proceso, que incluyen hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.



- 1. Hidrólisis:** Los microorganismos hidrolíticos a través de enzimas transforman las macromoléculas de los nutrientes (carbohidratos, lípidos, proteínas) en sus monómeros, monosacáridos, ácidos grasos, aminoácidos y polipéptidos.
- 2. Acidogénesis:** Las bacterias acidogénicas degradan los monómeros obtenidos previamente en combustibles solubles como los ácidos grasos volátiles, los cuáles son ácidos de cadena corta que tienen un solo grupo carboxílico y entre uno y seis carbonos saturados.
- 3. Acetogénesis:** Las bacterias acetogénicas transforman los ácidos grasos volátiles en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno.
- 4. Metanogénesis:** Las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético en metano y dióxido de carbono, además de convertir el dióxido de carbono y el hidrógeno en metano y agua.

(FAO, 2011)

De Acuerdo con la FAO, (2011) para obtener energía más productiva y rentable a partir del biogás, es necesario enriquecerlo manteniendo el metano y eliminando todos los contaminantes como: el agua, debido al potencial de acumulación del condensado en las tuberías; el H_2S , debido a que es corrosivo este puede afectar los equipos para la producción; el CO_2 porque reduce en hasta en un 30% su poder calorífico del biogás como se demuestra en la **tabla 2.2**.

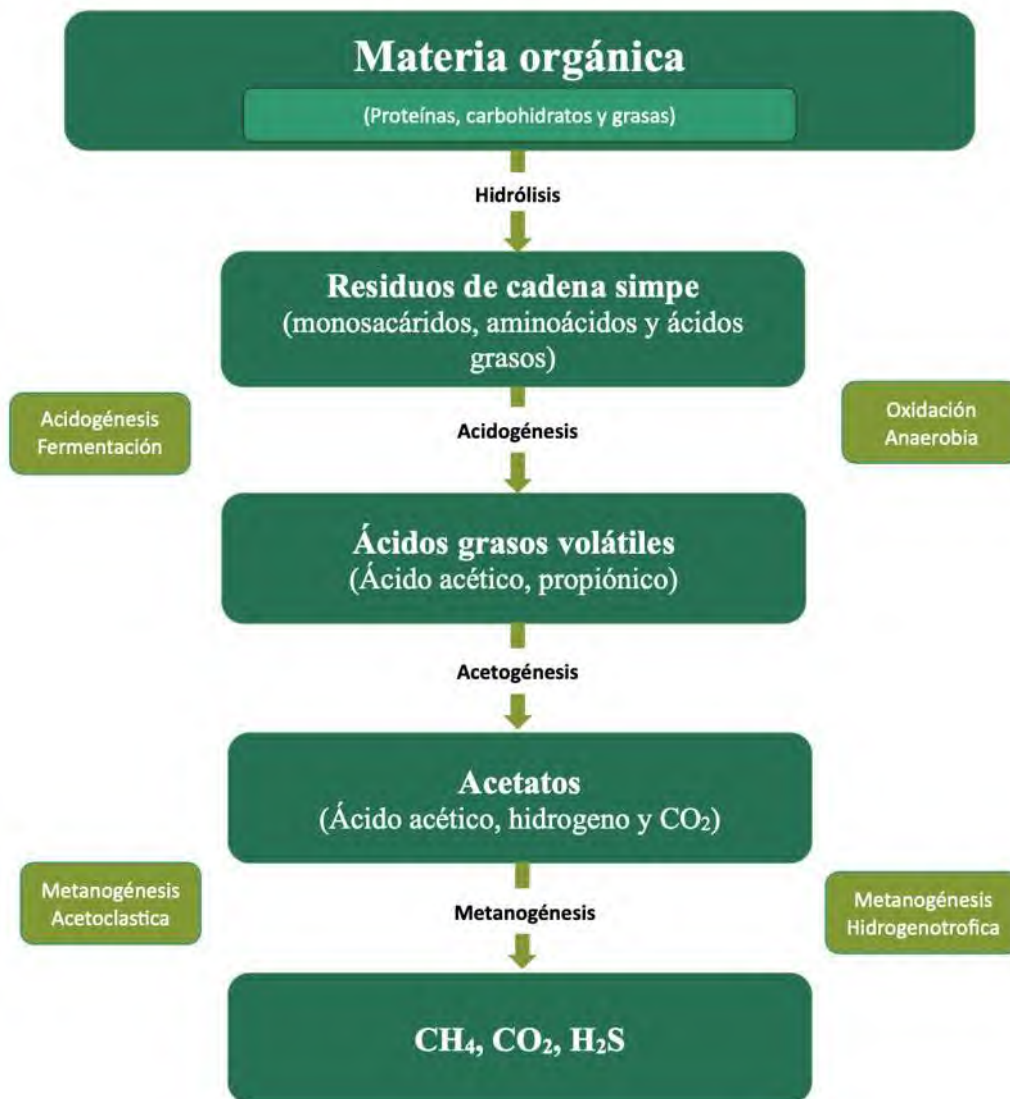


Figura 2.1 Diagrama de las fases de la digestión anaerobia (fuente propia).



Tabla 2.2 Valor Energético Biogás Vs. otras fuentes (FAO, 2011)

Valores	Biogás	Gas Natural	Gas Propano	Gas Metano
Valor Calorífico (Kwh/m ³)	7.0	10	26	10

Además, el control de las emisiones de H₂S es esencial para proteger la salud humana así como para mitigar su impacto ambiental; dado que este gas inflamable e incoloro y tóxico, De hecho, los riesgos a la salud dependiendo de la concentración van desde la detección de olor a huevo en mal estado, a concentraciones de 0.008 a 0.2 ppm; hasta la pérdida inmediata de la conciencia y alta probabilidad de muerte, para concentraciones de 2000 o más ppm (Amoore & Hautlala, 1983).

2.2 Remoción de contaminantes del biogás

Existen investigaciones sobre la remoción de los gases indeseables del biogás, como los resultados de Campuzano (2017), al utilizar una gas modelo con una solución de Ca(OH)₂ preparada con 1.3 g/L, alimentando biogás a una presión de 13 kPa, dando como resultado una remoción de CO₂ del 95.89% mol y con respecto al H₂S, se removió aproximadamente el 100% mol.

2.3 Sulfuro de hidrógeno

El sulfuro de hidrógeno es soluble en agua a razón de 4.1 g/L a 20 °C para disociarse en los iones hidronio y sulfuro; en solución acuosa es propenso a reaccionar con compuestos básicos para neutralizar el aumento del pH o con agentes oxidantes para transformarse en otras especies del azufre (Campuzano, 2017).

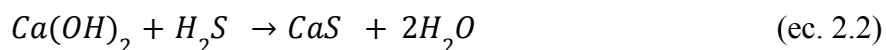


2.3.1 Reacción del H₂S con Hidróxido de Calcio [Ca(OH)₂]

El hidróxido de calcio se forma a partir de la cal viva (CaO) al mezclarla con agua (H₂O) **ec. 2.1**, siendo una forma económica y sencilla de elaboración.



Al reaccionar el Ca(OH)₂ con el H₂S se obtiene sulfuro de Calcio. **ec 2.2.**



2.4 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono se disuelve en el agua a una tasa de 1.45 g/L. Se forma a partir de la respiración y la degradación microbiana de la materia orgánica. Por esta razón, incluso en una atmósfera no contaminada, la lluvia es ligeramente ácida debido a la presencia de CO₂ disuelto.

El equilibrio del ión CO₃²⁻ entre la solución acuosa y los minerales carbonatados sólidos tienen un fuerte efecto amortiguador (buffer) sobre el pH del agua. La **Figura 2.2** muestra el comportamiento del CO₂, el ión bicarbonato (HCO₃⁻) y el ion carbonato (CO₃²⁻) presentes en solución con función del pH.

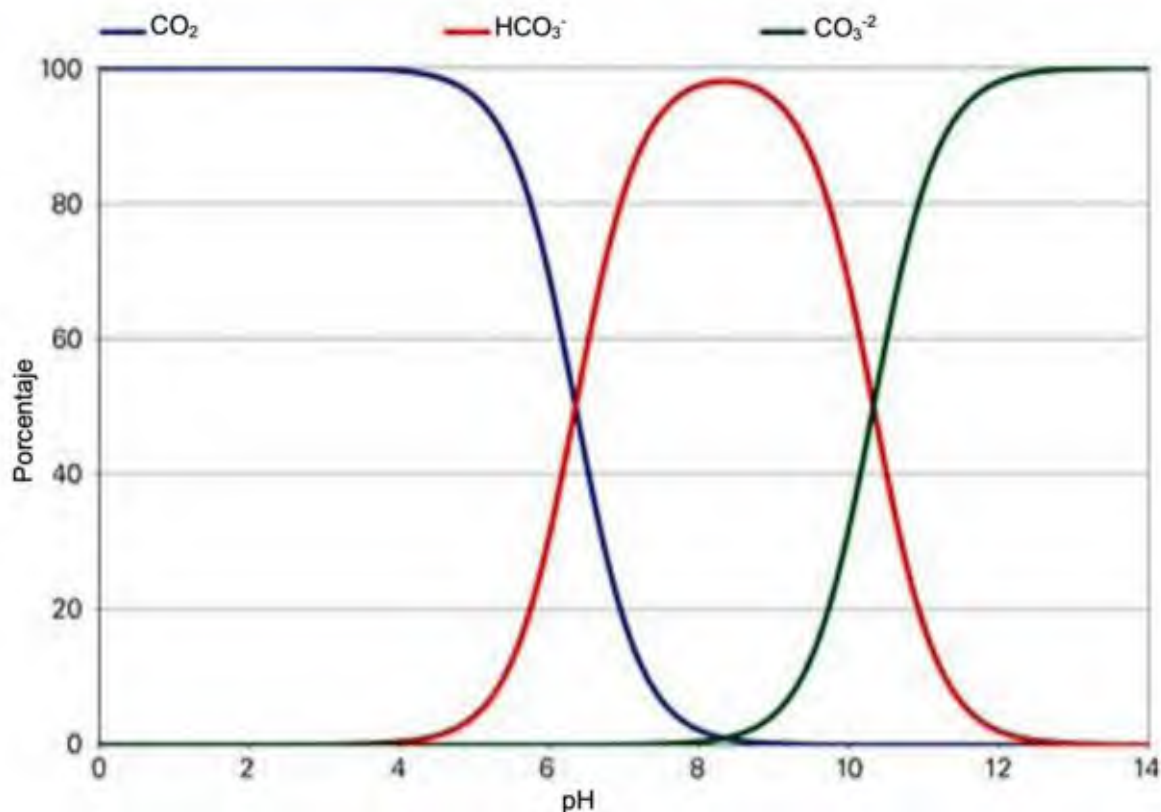
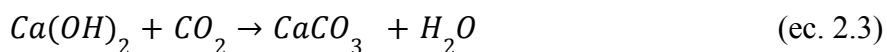


Figura 2.2 Diagrama de disociación de CO_2 en agua (Campuzano, 2017; Ribeiro & Ahlgren, 2021).

2.4.1 Reacción del CO_2 con Hidróxido de Calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]

La interacción del dióxido de carbono (CO_2) con una solución acuosa de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ induce la formación de carbonato de calcio, un proceso de precipitación regido por el equilibrio químico detallado en la **ec 2.3**.

Al reaccionar el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con el CO_2 para formar el carbonato de calcio y agua **ec 2.3**.



2.3 Torres de absorción

Para realizar la operación de eliminación del H_2S y CO_2 , es posible utilizar equipos de absorción, llamadas torres de absorción de flujo contracorriente líquido-gas en, misma que puede contener empaque, es decir, material sólido que proporciona una mayor área superficial y de contacto de esta forma el líquido desciende sobre la superficie de los sólidos, y en contraflujo con el gas ascendente a través de los intersticios del empaque.

En este tipo de torres el líquido y el gas están continuamente en contacto y llevando a cabo un permanente intercambio de materia (King, C. Judson, 2021). El proceso de separación es una alternativa eficiente para la eliminación de H_2S y CO_2 , por lo que es una solución que se pretende desarrollar, para aprovechar al máximo el metano contenido en el biogás en la **Figura 2.3** la cual ilustra este funcionamiento.

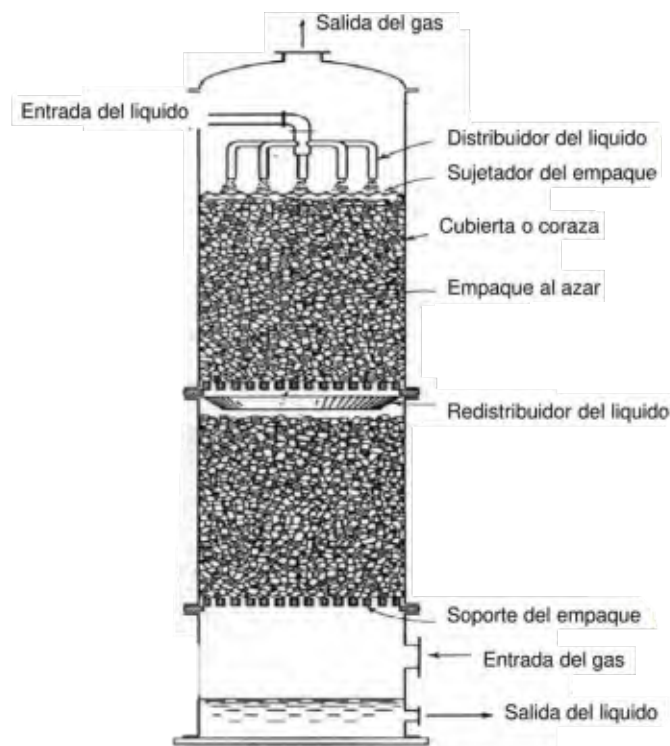


Figura 2.3 Representación esquemática de una columna en contracorriente obtenida de Treybal *et al.* (2001)



Entre la variedad de aplicaciones de importancia industrial que tienen los procesos de absorción, Chattopadhyay (2007) citó principalmente la deshidratación de gas (como el secado de cloro, y la deshidratación del gas natural), la absorción selectiva de H_2S del gas crudo, usando soluciones acuosas de carbonato y soluciones acuosas de amonio, el lavado de gases de combustión con recuperación de azufre, y el tratamiento del gas natural y gas sintético para la eliminación de gases ácidos (H_2S , CO_2) y otras impurezas como sulfuro de carbonilo (COS) y mercaptanos. Pero no se limita únicamente a procesos de absorción física, sino que también, su uso se extiende a la transferencia de masa por absorción asociado con reacción química, por ejemplo, la absorción de H_2S o CO_2 en soluciones acuosas de etanolaminas o la absorción de amoníaco (NH_3) en ácidos diluidos y de CO_2 en soluciones alcalinas.

La implementación de una columna de lecho empacado permite aumentar el área de contacto del biogás con la fase acuosa, en este caso utilizando $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y así evitar dos procesos, lo anterior, sin comprometer la pureza de este gas tratado. Es de resaltar que existe una propuesta muy interesante del uso de un reactor de columna de burbujeo **Figura 2.4** descrita por Campuzano (2017), el cual es un equipo utilizado para poner en contacto una fase líquida y una fase gaseosa que permita la transferencia de masa, generalmente hacia la fase líquida, para producir una reacción química.

Este tipo de reactor consiste en un tanque cilíndrico dentro del cual se alimenta la fase líquida por la parte superior y la fase gaseosa por la parte inferior por medio de un difusor, permitiendo que el gas se distribuya en forma de burbujas, mejorando así el contacto entre ambas fases (Kantarci, N. y col., 2005). Este sistema es muy atractivo en la industria, puesto que es un equipo sencillo que no requiere de empaque o de algún sistema de mezclado (Kennedy, N. y col., 2015). De tal forma que existen evidencias suficientes para plantear el problema de la separación del H_2S y del CO_2 del biogás, con el fin de que se pueda aprovechar éste para la sustitución del gas natural, por lo que surge la necesidad de esta investigación.

La Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2023) estima que una planta de biogás puede reemplazar hasta el 20% del consumo de gas natural de una región, dependiendo de la disponibilidad de residuos orgánicos y la eficiencia del proceso. Al usar biogás en lugar de gas natural, se puede evitar la emisión de una cantidad considerable de CO_2 equivalente.

Para la purificación del biogás, la columna de absorción es una tecnología eficaz y conveniente. Este método utiliza soluciones líquidas para absorber selectivamente el CO_2 y otros contaminantes del biogás. La columna de absorción se destaca por su eficiencia en la eliminación de impurezas, su capacidad para manejar grandes volúmenes de gas, y su costo relativamente bajo en comparación con otros métodos como la adsorción en carbón activado o la purificación

criogénica. Al utilizar esta tecnología, se puede obtener un biogás más limpio y adecuado para su uso como combustible, maximizando así los beneficios ambientales y económicos de su producción.

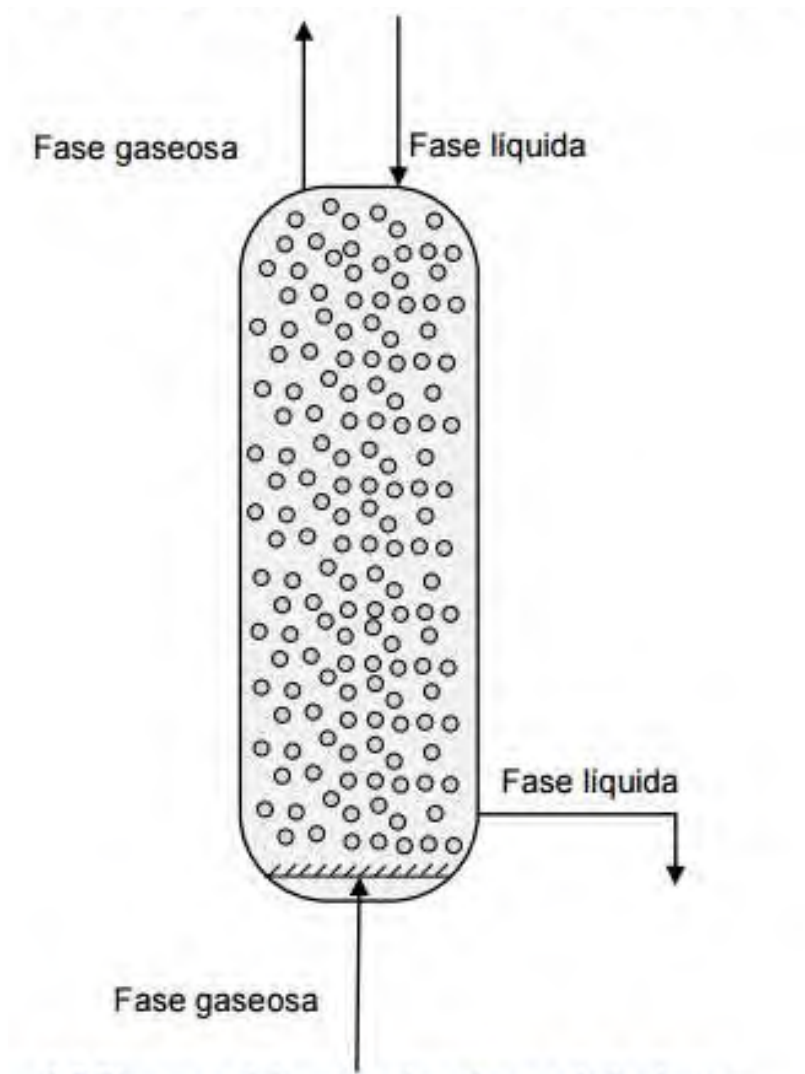


Figura 2.4 Diagrama de reactor de columna de burbujeo (Campuzano, 2017)

2.3.1 Empaque

Porosidad (ε): La porosidad del empaque indica la proporción de espacio vacío en el lecho en comparación con el volumen total. Una porosidad adecuada facilita el flujo del fluido y la transferencia de masa.

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} (100\%) \quad (\text{ec. 2.4})$$

Donde ε es la porosidad, V_p es el volumen de poros, V_t el volumen total del material y finalmente se multiplica por 100 para obtener un porcentaje (%) de porosidad.

Área superficial específica (A_s): La relación entre el área superficial del empaque y su volumen es un parámetro importante. Un empaque con una alta área superficial específica permite una mayor interacción entre los reactantes y puede mejorar la eficiencia de las reacciones.

$$A_s = \frac{A}{V} \quad (\text{ec. 2.5})$$

Donde A_s es el área superficial específica, A es el área superficial del empaque y V es el volumen del empaque.

Forma: Se seleccionó el anillo Raschig como tipo de empaque por su practicidad y disponibilidad, su forma se observa en la **Figura 2.5**.

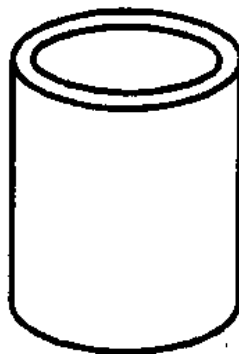


Figura 2.5 Anillo Rasching



3 ANTECEDENTES

El contenido de energía del biogás es cercano a de 7 kWh/m³ (FAO, 2011), esta energía puede ser aprovechada de diferentes formas debido a que se puede convertir en energía térmica (68 %), eléctrica (25.8 %) y mecánica (28.4 %), dependiendo del tipo de aprovechamiento (Hilbert, 2017) Así, los desechos sólidos y líquidos se degradan en digestores anaerobios para la generación de CH₄ junto con otros gases. Sin embargo, la utilización de biogás en la red pública como fuente de energía, requiere un contenido de CH₄ de al menos el 90 %, con una composición reducida de CO₂, H₂ y H₂S (Angelidaki *et al.* 2018).

Debido a que el biogás producido mediante la descomposición de desechos orgánicos contiene impurezas tales como H₂S y CO₂, es necesario buscar técnicas de purificación que puedan remover grandes cantidades de estos compuestos, debido a que sustancias como el H₂S, poseen efectos adversos para la salud y generan corrosión de los equipos utilizados para el aprovechamiento del biogás (Amoore, J.E., 1983).

3.1 Métodos para la purificación del biogás

3.1.1 purificación de biogás con NaOH:

Para el proceso de absorción por el método de sulfuración con NaOH para la purificación del biogás (**Figura 3.1**), se aprovecha el pH natural de los contaminantes para promover su transferencia de masa a la fase líquida, donde se neutralizan los componentes y se lleva cabo la purificación del combustible (Pacheco, 2016).

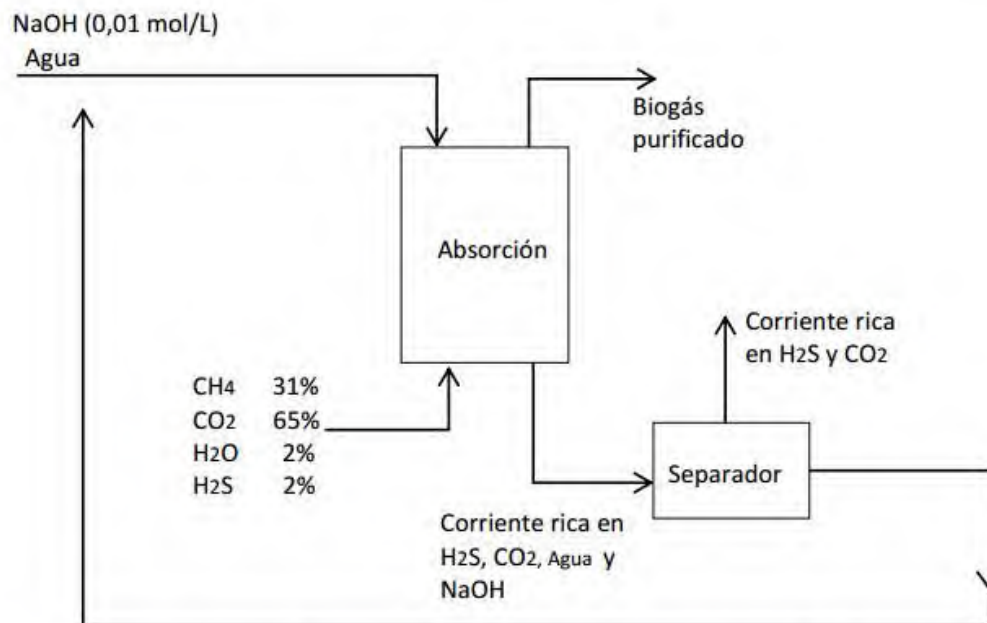


Figura 3.1. Purificación de biogás por medio de absorción química utilizando NaOH como solvente (Pacheco, 2016).

Las ventajas de utilizar el NaOH para la purificación del biogás

- **Eficiencia en la alta eficiencia:** El NaOH cuenta con una alta eficiencia en la remoción del CO₂.
- **Regeneración del absorbente:** el NaOH puede ser regenerado y con esto reducir cost



Las desventajas de utilizar el NaOH para la purificación del biogás

- **Costo:** la Solución de NaOH suele ser caro.
- **Corrosividad:** El NaOH puede ser corrosivo y con esto provocar daños en equipos.
- **Manejo y almacenamiento:** El NaOH requiere medidas específicas para su manejo y almacenamiento debido a su alcalinidad y reactividad.
- **Residuos generados:** El NaOH genera carbonato de sodio (Na_2CO_3) como residuo el cual es corrosivo.

(Pacheco, 2016)

3.1.2 purificación del biogás con dietanolamina:

El principio de la purificación del biogás es usar un reactivo que químicamente se une a la molécula de CO_2 para eliminar este gas, en este caso se implementa una solución de agua con aminas (moléculas con carbono y nitrógeno). La dietanolamina es una de las más comunes (Bauer *et al.*, 2013). En la purificación del biogás con aminas tiene una alta eficiencia para la remoción del H_2S y el CO_2 y pocas pérdidas de metano en la absorción (Lurgi, 2010).

En la **Figura 3.2** se observa el proceso, las aminas se suministran en la parte superior de la columna de absorción y se pone en contacto en flujo en contracorriente con el biogás, el biogás tratado sale por la parte superior de la columna y las aminas por el fondo de la torre.

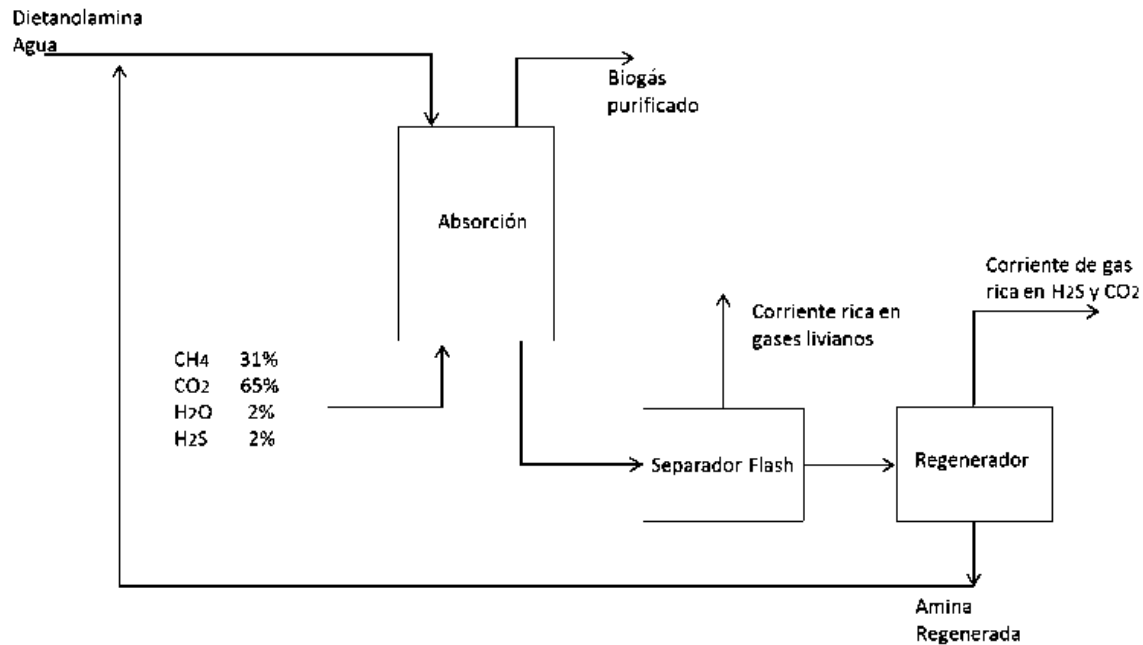


Figura 3.2. Diagrama de bloques del proceso de purificación de biogás por medio de absorción química dietanolamina como solvente (Pacheco, 2016).

Las ventajas de la utilización de las aminas son:

- **Alta pureza:** Las aminas son muy efectivas para absorber dióxido de carbono y H₂S (>99% CH₄) (Lurgi, 2010).
- **Recuperación y regeneración:** Las aminas pueden ser regeneradas permitiendo su reutilización.
- **Costo operacional bajo.** al poderse regenerar las aminas, ayuda a disminuir los costos operativos a largo plazo



Las desventajas de la utilización de las aminas son:

- **Costo inicial:** La inversión inicial en para aminas y los sistemas de regeneración pueden ser bastante costosos.
- **Degradación:** Las aminas llegan a degradarse con el tiempo debido al tratamiento para la regeneración que implementa altas temperaturas, lo cual puede requerir reemplazo o mantenimiento frecuente.
- **Manejo de residuos:** Este método puede generar residuos que necesiten tratamiento y disposición especial incrementando aún más los costos.

(Bauer *et al.*, 2013; Pacheco, 2016)

En resumen las aminas son altamente efectivas para la purificación del biogás, su principal inconveniente son los costos iniciales y la gestión de residuos.

3.1.3 purificación del biogás con metanol.

El proceso de purificación con metanol constituye una tecnología de absorción física que utiliza metanol refrigerado como solvente, entrando por la parte superior de una torre de absorción y entra en contacto con el biogás en contra corriente (**Figura 3.3**). por otro lado una características del Rectisol es su capacidad para la ayuda en la remoción del dióxido de carbono, siendo superior a la de otros tipos de solventes (Lurgi, 2010).

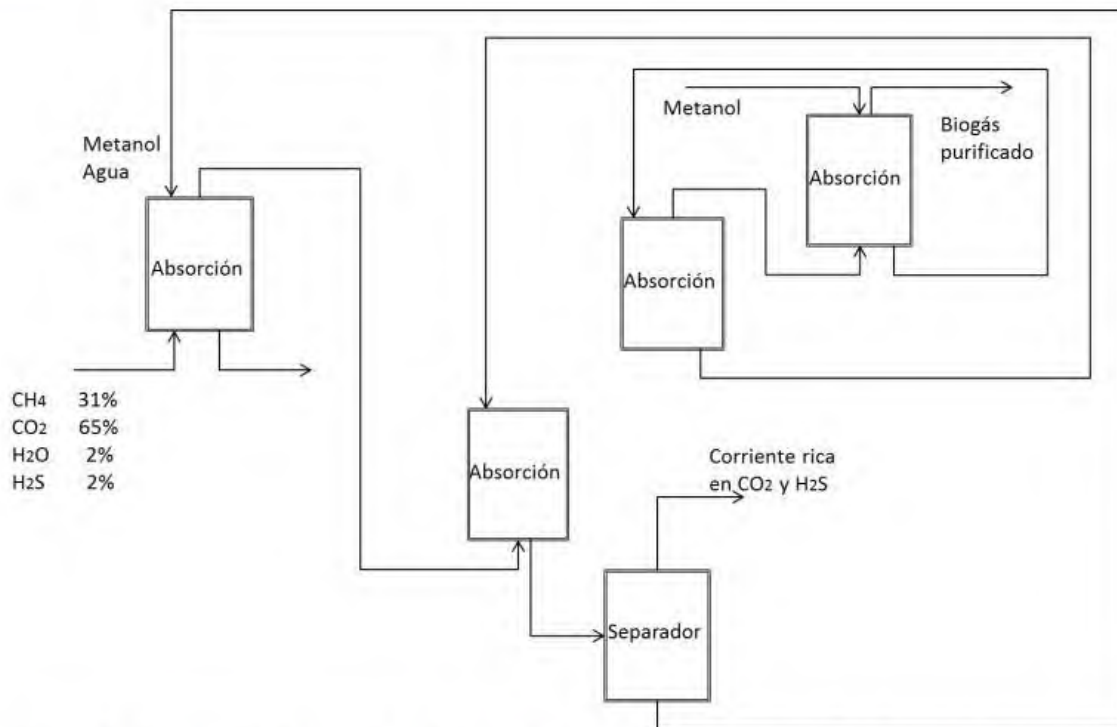


Figura 3.3. Diagrama de bloques del proceso de purificación de biogás por medio de absorción utilizando metanol como solvente (Pacheco, 2016).

Las ventajas de la utilización de las metanol son:

- **Alta capacidad de absorción:** El metanol tiene una alta capacidad para absorber dióxido de carbono (CO₂) y compuestos sulfurados, lo que puede resultar en una purificación efectiva del biogás.
- **Rápida eliminación de contaminantes:** El metanol puede eliminar contaminantes del biogás de manera rápida y eficiente, contribuyendo a una mayor calidad del biogás.

Las desventajas de la utilización de las metanol son:

- **Costo:** El metanol puede ser caro en comparación con otras soluciones de purificación, como hidróxidos o aminas.
- **Toxicidad y seguridad:** El metanol es tóxico y presenta riesgos para la salud

(Lurgi, 2010).

3.1.4 purificación del biogás con polietilenglicol (PEG)

De acuerdo con Pacheco (2016), el proceso de purificación con polietilenglicol (PEG) aprovecha la afinidad del dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico. Utilizando la corriente (**Figura 3.4**).

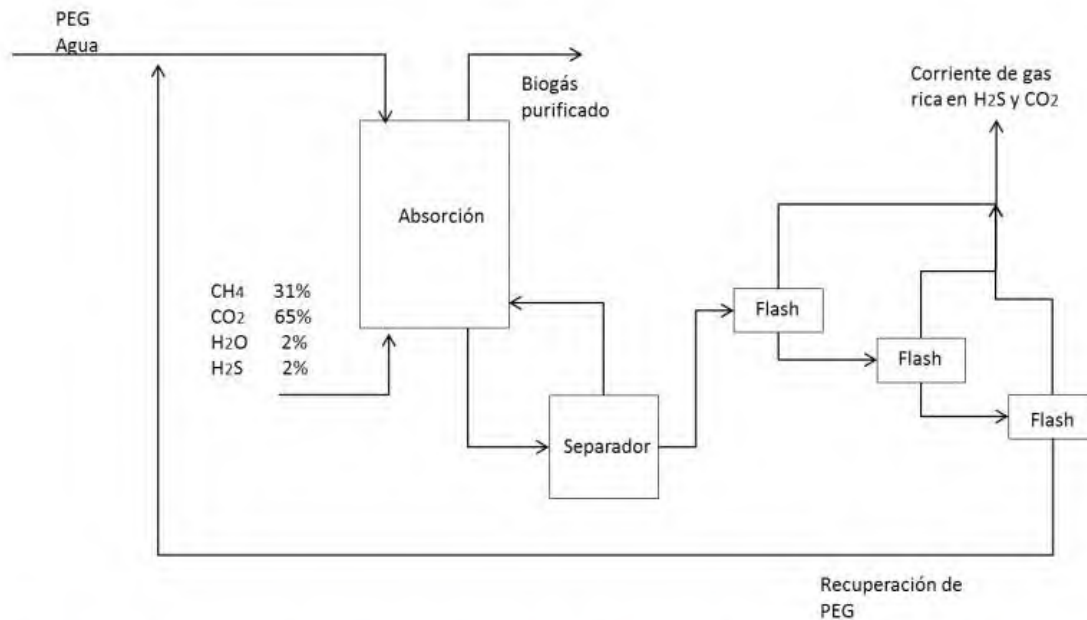


Figura 3.4. Diagrama de bloques del proceso de purificación de biogás por medio de absorción utilizando polietilenglicol como solvente (Pacheco, 2016).

El empleo de solventes orgánicos constituye una alternativa superior al lavado con agua debido a su mayor afinidad química con los contaminantes. Este proceso se lleva a cabo generalmente en contracorriente, requiriendo una etapa previa de compresión para estabilizar los gases de alimentación (Bauer *et al.*, 2013)



Las ventajas de la utilización de las metanol son:

- No requiere una elevada presión para realizar la operación,
- Es viable la regeneración del vapor para generar recirculados.
- No es un proceso muy complejo a nivel de equipos utilizados.

Las desventajas de la utilización de las metanol son:

- El gasto es mayor comparado con usar agua como solvente.
- La adquisición o síntesis del PEG.
- Es necesaria la recirculación del mismo para evitar el desperdicio.

(Bauer *et al.*, 2013; Pacheco, 2016)

3.1.5 purificación del biogás con N-metilpirrolidona (purisol) :

En el proceso de purificación con Purisol (N-metilpirrolidona) para la remoción del H_2S y el CO_2 , se utiliza una torre de absorción (**Figura 3.5**). El proceso se basa en la afinidad que presentan el CO_2 y otros gases ácidos con el solvente alimentado a la torre de absorción (Fischer, 2002).

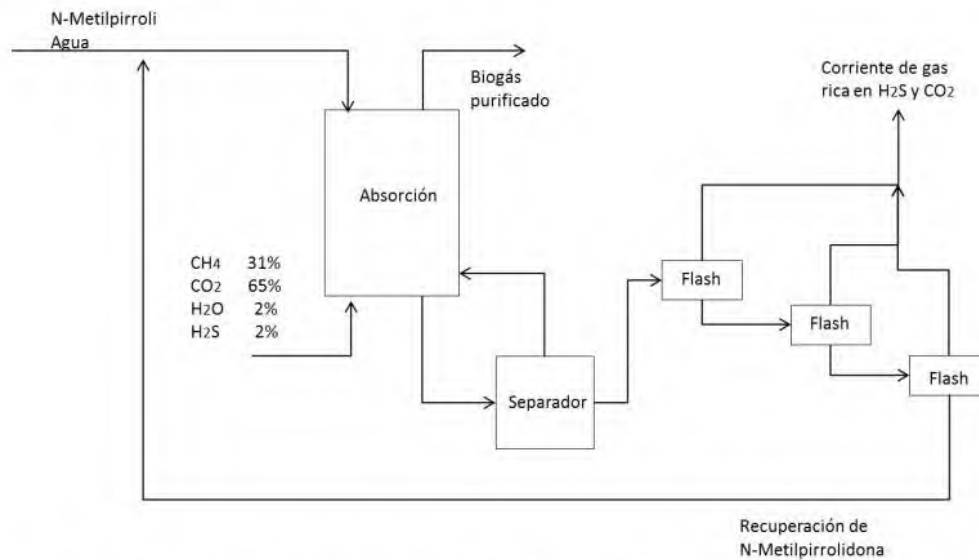


Figura 3.5. Diagrama de bloques del proceso de purificación de biogás por medio de absorción utilizando N-metilpirrolidona como solvente. (Pacheco, 2016)

La ventaja de la utilización de las metanol es:

- Alta selectividad para absorber CO_2 y H_2S ,
- Estabilidad química,
- Bajo punto de ebullición
- Baja toxicidad.

La desventaja de la utilización de las metanol es:



- Viscosidad elevada
- Pérdida de metano por solubilidad
- Posible impacto ambiental si no se maneja adecuadamente
- Mayor costo de operación debido al solvente (N- metilpirrolidona)

(Fischer, 2002)

3.1.6 Absorción con Hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$

Los resultados obtenidos en la tesis de Campuzano (2017) revelan que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es un compuesto eficaz y económico para la purificación de biogás, La **figura 3.6** muestra el diagrama de la columna de burbujeo utilizada en el estudio. El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presenta capacidad de absorción de CO_2 , un costo menor, una mayor estabilidad química, facilidad de recuperación y un menor impacto ambiental. Además, es químicamente estable, no reacciona con los componentes del biogás y aunque su recuperación completa es limitada, el residuo puede manejarse fácilmente como subproducto sólido (CaCO_3), lo que reduce el costo y el impacto ambiental.

En contraste, los otros solventes presentan desventajas significativas, como una viscosidad más alta, toxicidad, corrosividad y un mayor impacto ambiental. Por lo tanto, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se destaca como la mejor opción para la purificación de biogás debido a sus ventajas. Además, su costo es relativamente accesible, con un precio aproximado de \$3,700 pesos mexicanos por tonelada de óxido de calcio o cal viva según la investigación de campo en la ciudad de Morelia.

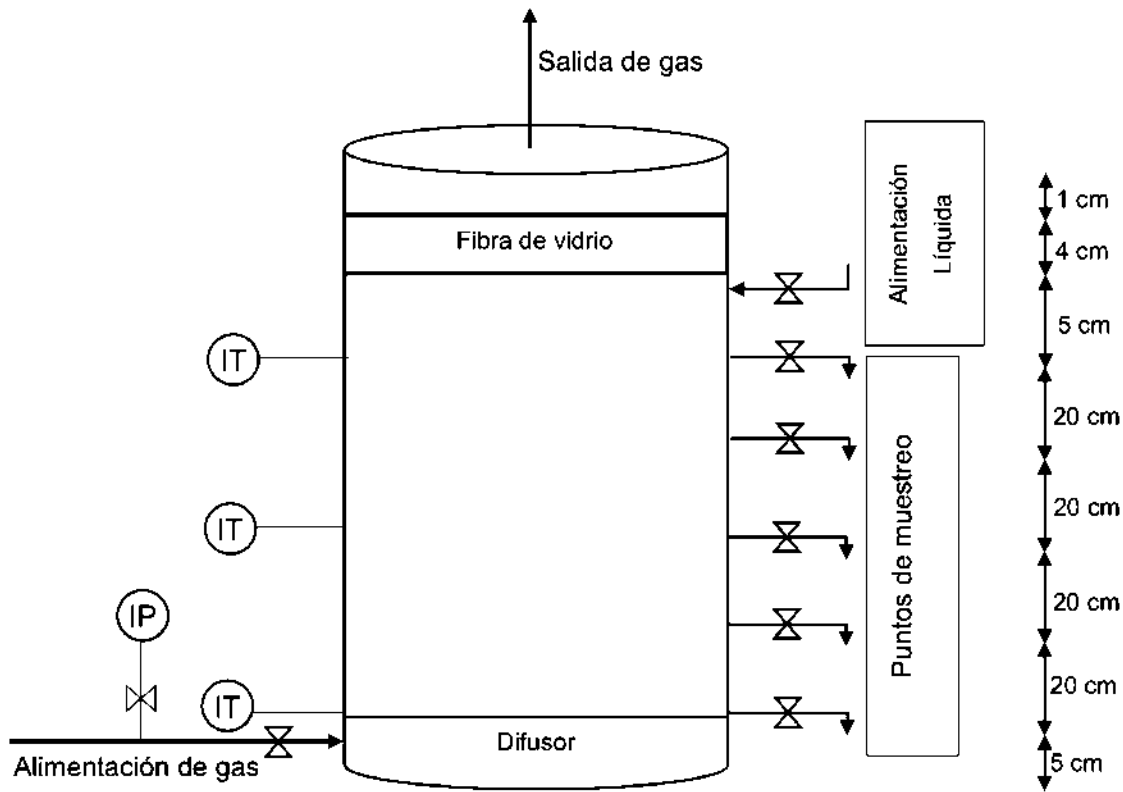


Figura 3.6. Diagrama del reactor de columna de burbujeo (Campuzano, 2017)

En la **Figura 3.6** observamos claramente que es conveniente diseñar un método de fácil operación y mantenimiento, para aprovechar el biogás generado, por tanto, se propondrá el diseño de una torre empacada a contracorriente, con el fin de remover las concentraciones de H_2S y CO_2 , presentes en el biogás.



4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.1 Problemática general

En el contexto actual de transición energética y lucha contra el cambio climático, las industrias enfrentan una creciente presión para adoptar prácticas sostenibles en la gestión de residuos y producción energética. Una de las estrategias más prometedoras es la valorización de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia, que genera biogás como fuente renovable de energía (FAO, 2013). Este recurso permite sustituir parcialmente el uso de combustibles fósiles, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y favoreciendo la economía circular (International Energy Agency, 2023).

En diversos países como Alemania, Suecia, China, India y Brasil, se ha consolidado el uso de biogás mediante políticas públicas e incentivos económicos que han permitido el desarrollo de infraestructura, tecnologías de purificación y sistemas de aprovechamiento energético integrados (Baredar *et al.* 2020). En dichos contextos, el biogás ya se emplea en la generación eléctrica, térmica e incluso como biocombustible para transporte.

4.2 Problemática específica

En México, existe un gran potencial para generar biogás a partir de residuos orgánicos, el cual aún se encuentra subutilizado, esto se debe, en parte, al bajo conocimiento sobre tecnologías de purificación accesibles y efectivas que permitan mejorar la calidad del biogás para su uso directo. Los compuestos como el dióxido de carbono (CO_2) y el ácido sulfhídrico (H_2S) deben ser eliminados antes del uso del biogás, debido a que disminuyen su poder calorífico, producen efectos adversos para la salud y generan corrosión en los equipos utilizados para su aprovechamiento (Kusrini *et al.*, 2019; Dehaini *et al.*, 2020).

La purificación del biogás se ha enfocado en tecnologías como la absorción con aminas o el uso de solventes como dietanolamina, metanol y polietilenglicol, pero estas opciones presentan limitaciones económicas y operativas. En cambio, la absorción con soluciones alcalinas como el hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] ha mostrado resultados prometedores al generar subproductos inertes como el carbonato de calcio (CaCO_3), además de ser más accesible para aplicaciones de pequeña escala (Campuzano, 2017). Cabe mencionar que al purificar el biogás con la remoción del CO_2 y H_2S del biogás es más valioso. Sin embargo, aún existe poca información sobre su implementación práctica, lo que limita su aprovechamiento.



5 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el conocimiento sobre la producción de biogás a partir de la descomposición anaeróbica de residuos sólidos agrícolas y ganaderos está ampliamente desarrollado. Este biogás representa una fuente energética importante, debido a que contiene metano (CH_4), un combustible con múltiples beneficios tanto económicos como ambientales, porque permite la generación de energía limpia y renovable.

No obstante, el biogás producido contiene contaminantes indeseables, principalmente sulfuro de hidrógeno (H_2S) y dióxido de carbono (CO_2), que afectan negativamente la eficiencia de la combustión y la durabilidad de los equipos. La presencia de H_2S es particularmente problemática, ya que genera corrosión en los componentes metálicos, incrementando costos de mantenimiento y reduciendo la vida útil de los sistemas de aprovechamiento energético.

Por lo tanto, la problemática que aborda esta investigación es la separación eficiente de H_2S y CO_2 del biogás, proceso conocido como “endulzamiento”. Para ello, se propone el diseño de una columna de lecho empacado que permita purificar el biogás con un enfoque en minimizar los costos de fabricación, operación y mantenimiento. De esta manera, se busca contribuir a la generación de energía limpia que pueda ser utilizada en la misma planta productora de biogás, disminuyendo los costos operativos y favoreciendo la autosuficiencia energética.

En México, apenas se ha aprovechado una fracción del potencial energético del biogás. Según datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2017), el país genera importantes volúmenes de biogás en rellenos sanitarios y granjas, pero solo se utiliza alrededor del 5 % para generación eléctrica. Esto evidencia una brecha significativa entre el potencial disponible y su explotación real, lo cual justifica la investigación de tecnologías accesibles como la purificación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para impulsar el aprovechamiento energético en contextos rurales o de pequeña escala.

Este estudio también tiene un enfoque práctico, buscando desarrollar una alternativa tecnológica que pueda ser replicada en zonas con acceso limitado a tecnologías sofisticadas, contribuyendo así a la autosuficiencia energética, el manejo sustentable de residuos y el cumplimiento de metas ambientales nacionales.



6 HIPÓTESIS

La implementación de una solución acuosa de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ en una columna de absorción de lecho empacado permite la remoción eficiente del ácido sulfhídrico (H_2S) y del dióxido de carbono (CO_2) presentes en el biogás.

7 OBJETIVOS

7.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de una solución de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ en una columna de absorción de lecho empacado para la remoción del ácido sulfhídrico (H_2S) y dióxido de carbono (CO_2) del biogás.

7.2 Objetivos específicos

- A. Diseñar, construir e instalar una columna de absorción en régimen continuo, para el tratamiento del biogás.
- B. Determinar el porcentaje de remoción de H_2S y CO_2 en el biogás utilizando la columna de absorción en contracorriente y régimen continuo.
- C. Identificar los parámetros operativos óptimos que favorezcan la máxima eficiencia en la remoción de H_2S y CO_2 .
- D. Evaluar el desempeño de la columna de absorción de flujo a contracorriente y régimen continuo, empleando una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



8 METODOLOGÍA

El objetivo central de esta investigación es diseñar una columna de absorción capaz de remover el ácido sulfhídrico (H_2S) y el dióxido de carbono (CO_2) presentes en el biogás. La eliminación de estos compuestos es fundamental para evitar la corrosión de los equipos metálicos utilizados durante su manejo y aprovechamiento.

Para lograrlo, se empleó como líquido absorbente una solución acuosa de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, debido a sus propiedades alcalinas y a la formación de subproductos inertes. En este contexto, resulta necesario desarrollar el diseño de la columna de absorción que permitirá evaluar la eficiencia del proceso.

8.1 Diseño y construcción

En la **Figura 8.1** se presenta el diagrama general del sistema utilizado para el funcionamiento del proceso en la columna de absorción. El biogás modelado se inyectó por la parte inferior de la columna, de modo que ascendiera y entrara en contacto con la solución absorbente en flujo a contracorriente.

La solución de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, contenida en un depósito con un volumen de 20 L, fue impulsada mediante una bomba hacia la parte superior de la columna. Desde ahí, se distribuyó a través de un difusor, lo que permitió generar una adecuada dispersión y favorecer la transferencia de masa durante el proceso de absorción.

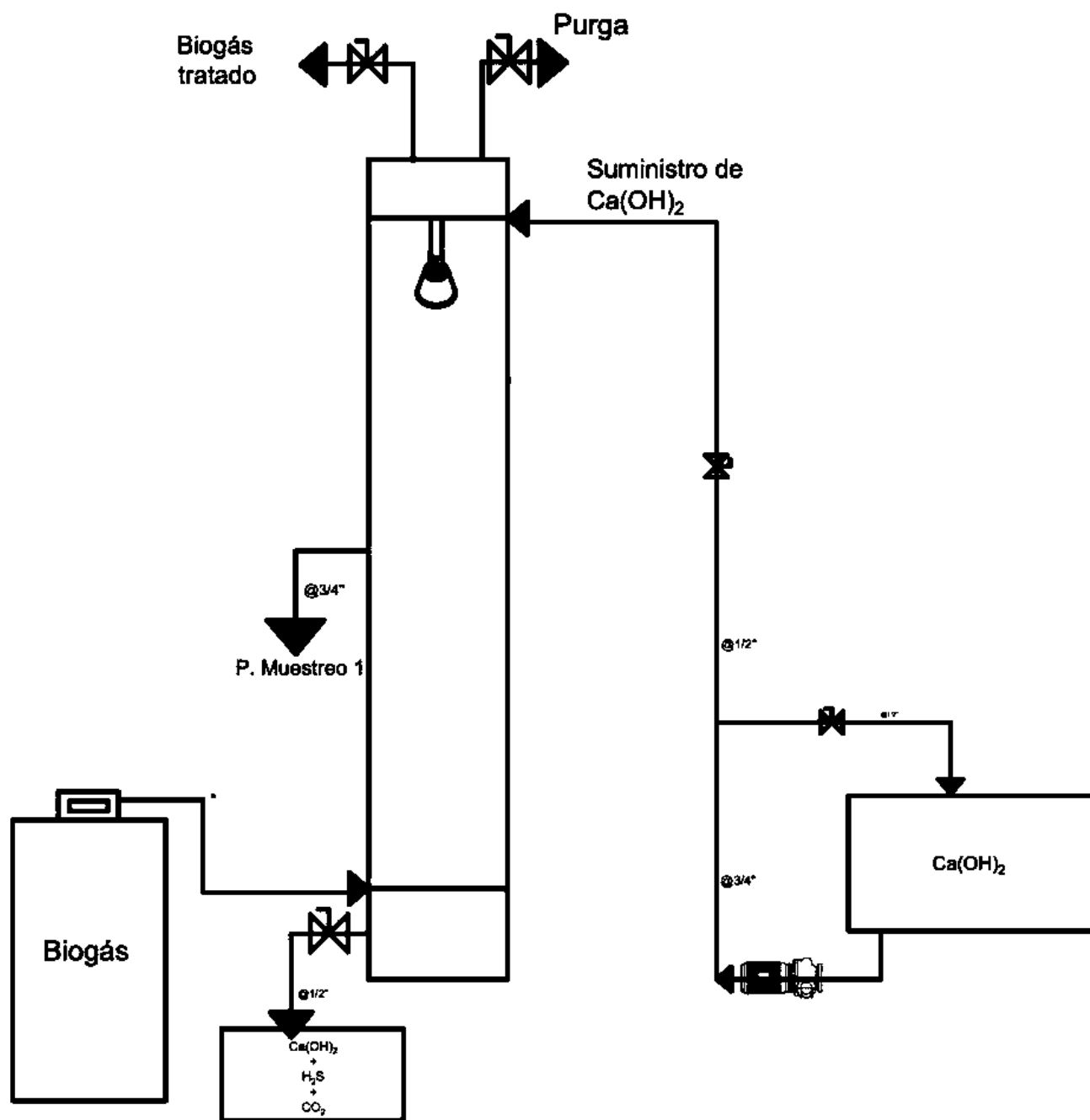


Figura 8.1 Diagrama de proceso de la columna de absorción



8.1.1 Columna de absorción

Debido a que H_2S tiene naturaleza corrosiva, se seleccionó, en la medida de lo posible, materiales que fueran resistentes a este ataque, de tal forma que se optó por los materiales que se muestran en la **Tabla 8.1**.

Tabla 8.1 Equipo y accesorios para construcción del reactor.

Equipo o accesorio	Material	Dimensiones (diámetros)
Cuerpo de la columna de absorción	Tubo de PVC sanitario	6 in
Tapas inferior y superior	PVC hidraulico	6 in
Tubería de alimentación y descarga de $Ca(OH)_2$	CPVC (cloruro de policloruro de vinilo) de $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ pulgada	$\frac{1}{2}$ in
Válvulas de control alimentación y descarga de $Ca(OH)_2$	CPVC (cloruro de policloruro de vinilo) de $\frac{1}{2}$ pulgada	$\frac{1}{2}$ in
Tubería de alimentación y salida del biogás	Polipropileno	$\frac{1}{4}$ in
Válvulas de alimentación y salida del biogás	Polipropileno	$\frac{1}{4}$ in
Bomba de alimentación de $Ca(OH)_2$	Polipropileno	$\frac{3}{4}$ in
Distribuidor de solución de $Ca(OH)_2$	Polietileno	10.7 cm
Malla soporte de empaque	Acero inoxidable	6 in
Empaque de la columna (relleno)	Manguera de PVC (policloruro de vinilo) de $\frac{1}{4}$ de pulgada	$\frac{1}{4}$ in
Rotámetro para biogás	Acrílico (polimetaacrilato de metilo)	$\frac{1}{4}$ in



Para determinar las dimensiones de la columna de absorción mostrada en la **figura 8.2**, se fijaron las siguientes variables: tipo de empaque anillos Raschig de PVC de $\frac{1}{4}$ de pulgada, temperatura 25 °C, Presión atmosférica (Morelia) 0.993 atmósferas y viscosidad de la solución de Ca(OH)_2 1.05×10^{-3} Kg/ m seg. Por tanto, con los datos anteriores se realizó el cálculo de las dimensiones preliminares utilizando el método de caída de presión hidráulica de la columna, es decir, diagrama de Ekert, (los cálculos realizados se encuentran en el **Anexo 1**) con esto se obtuvo, la altura de la columna (90 cm), una altura de empaque 40 cm. con, lo cual, teóricamente tendríamos una columna sobrada, esperando una eficiencia superior a la calculada.

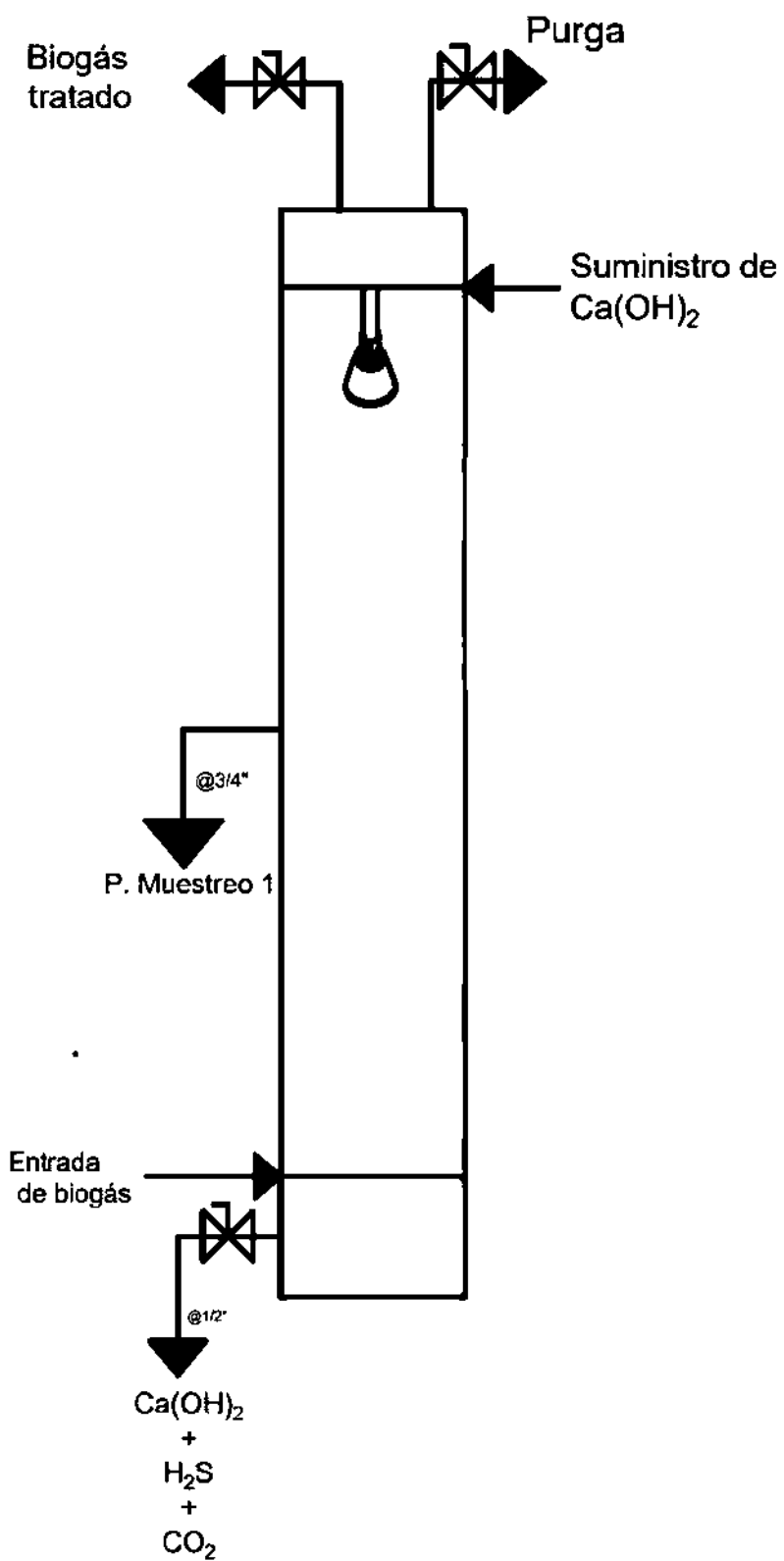


Figura 8.2 Diagrama del reactor.

8.1.2 Tanque de almacenamiento de biogás tratado

Es necesario la construcción de un tanque donde se capten los gases a su salida de la columna para almacenarlo como el de la **Figura 8.3**, para posteriormente medir las concentraciones de CH_4 , CO_2 y H_2S ; en consecuencia, este tanque debe contar con una entrada de biogás, una salida de agua y un punto de muestreo del biogás tratado, para aprovechar el material del laboratorio se utilizarán bidones vacíos de 20 litros, éste de polietileno de alta densidad (PEAD).

Tal contenedor se llena de agua antes de iniciar con las pruebas y, una vez que el biogás empieza a ingresar al tanque, el agua es desplazada hacia un recipiente graduado. De esta manera se almacena el biogás sin que entre en contacto con el aire exterior y gracias al agua desplazada nos permite llevar a cabo la medición de la cantidad de biogás tratado obtenido.

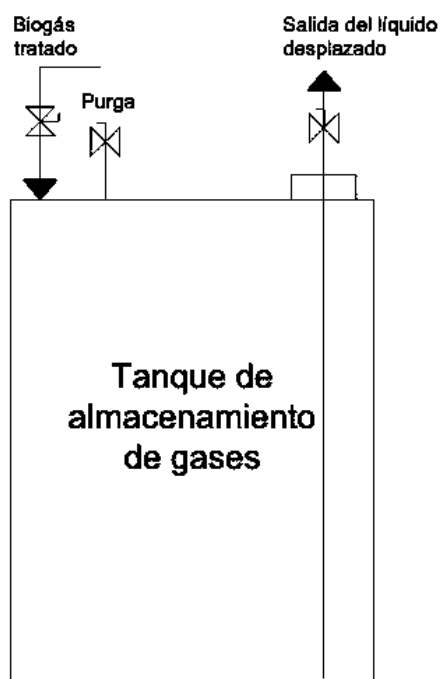


Figura 8.3 Diagrama del tanque de almacenamiento de gases



8.1.3 Tanque de medición de líquido desplazado

Además del tanque previamente descrito, se requiere un tanque graduado para recibir el líquido desplazado por la salida del biogás tratado en la columna de absorción. Este tanque permite medir el volumen de biogás alimentado a la columna y compararlo con la lectura del medidor de flujo (rotámetro).

Para ello, se utilizó otro bidón de 20 L de polietileno de alta densidad (PEAD), aprovechando el material disponible en el laboratorio.

8.1.4 Tanque de almacenamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

En cuanto al almacenamiento de la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, se utilizará un tanque cilíndrico con un diámetro de 54 cm. y altura de 46 cm., construido de polietileno de alta densidad (PEAD), con capacidad de 105 litros, **Figura 8.4**, al cual se le adaptó una bomba con potencia de 35 W, 110 V y frecuencia de 60 Hz.

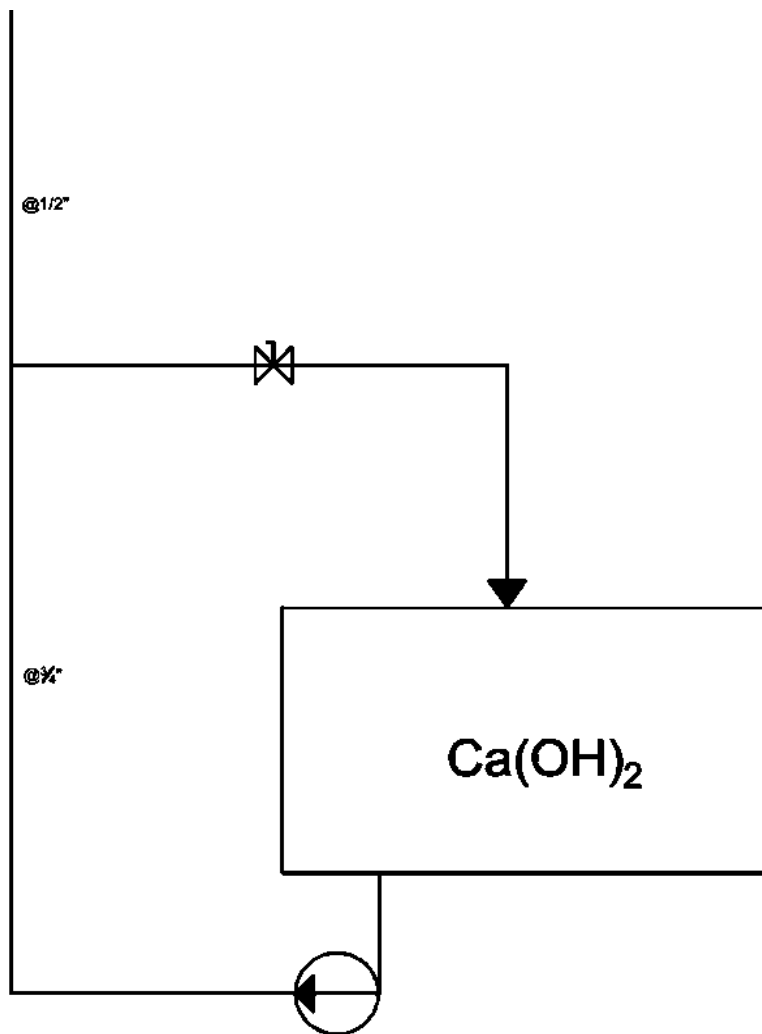


Figura 8.4 diagrama del tanque de almacenamiento $\text{Ca}(\text{OH})_2$



8.1.5 Elaboración de las Soluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

El hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tiene una baja solubilidad en agua, aproximadamente 1.8 g/L a 20 °C (Hedges & Johnson, 2002). Para el caso de nuestro estudio, se prepararon soluciones con concentraciones de 1.13 g/L y 2 g/L, basadas en la investigación de Campuzano (2017), quien utilizó una concentración aproximada al 1.3 g/L en sus pruebas. Se busca experimentar con concentraciones menores y mayores para llevar a cabo un análisis exhaustivo en el diseño de experimentos.

Para la preparación de las soluciones, se agitaron para asegurar una mezcla homogénea. Posteriormente, se dejarán reposar durante 24 horas para permitir una disolución óptima del óxido de calcio. El agua utilizada para la solución fue obtenida del agua de la llave del laboratorio del ambiental y el CaO es cal uniblock.

8.1.6 Tanque de biogás

El biogás que se utilizó en este proyecto es una mezcla modelo compuesta por 70% v/v de CH_4 , 28% v/v de CO_2 y 2% v/v de H_2S ; esta cantidad de H_2S se encuentra en concentraciones más altas de lo común, según lo afirman distintos autores como Baena-Moreno *et al.*, (2019) y Leonzio, (2016).

Esta mezcla modelo es elaborada por Grupo INFRA, **Figura 8.6**, es almacenada dentro de un tanque pasivado de 10 L de capacidad a una presión de 2000 psi (13.79 MPa), con una válvula reguladora de presión marca CONCOA que se puede observar en la **Figura 8.5**, además cuenta con una regulación de salida de 0 a 200 psi (0 - 1.38 MPa).



Figura 8.5 Válvula reguladora de presión



Figura 8.6 Tanque de biogás modelo



8.2 Experimentación

8.2.1 Operación de la columna de absorción

Se operó la columna en flujo a contracorriente, alimentando el biogás por la parte del fondo, usando un distribuidor de burbujeo, haciendo pasar el biogás entre los espacios del lecho empacado húmedo, lo cual permitirá tener una mayor área de contacto entre las fases, hasta que el biogás salga por la parte superior, hacia la tubería de salida.

A su vez, la solución de Ca(OH)_2 , se alimentó utilizando una bomba que la transporta desde el tanque de almacenamiento de Ca(OH)_2 , hasta la parte superior de la columna, en donde cae en cascada humedeciendo el empaque, en este momento la columna esta operando en estado estable y con ello procederemos a medir las variables de proceso, posteriormente, se utilizaron con las corridas utilizando ya el Ca(OH)_2 , a concentraciones de 1.13g/L y 2g/L.

Para el funcionamiento general de la columna de lecho empacado será necesario seguir los siguientes pasos:

Paso 1. Asegurarse que todas las válvulas estén cerradas (Tanque de biogás, reactor y tanque de almacenamiento de biogás).

Paso 2. Llenar el tanque de almacenamiento de biogás completamente con agua.

Paso 3. Llenar el fondo de la columna con solución de Ca(OH)_2 , únicamente lo que nos servirá como sello para evitar que el gas salga, encendiendo la bomba para que inicie a humedecer uniformemente el empaque de la columna de absorción.

Paso 4. Registrar la temperatura y pH inicial del líquido dentro de la columna.

Paso 5. Abrir la válvula del tanque de biogás y regular el flujo de salida de acuerdo con la prueba

Paso 6. Abrir las válvulas de entrada de biogás a la columna y del tanque de almacenamiento de biogás, así como la salida de agua del mismo. Iniciar cronómetro.

Paso 7. Realizar las mediciones de temperatura, pH, concentraciones de la solución, concentración de gases y tiempo.

Paso 8. Vaciar completamente la columna y el tanque de almacenamiento de biogás tratado.

Paso 9. Utilizar primero solución al 10% de H_2SO_4 para eliminar completamente el Ca(OH) utilizado y enjuagar de 2 a 3 veces el reactor con agua.

8.2.3 Variables de proceso

Los parámetros de operación de la columna en cada una de las pruebas son la temperatura, pH, volumen del biogás suministrado y finalmente la medición del biogás tratado en el tanque de almacenamiento, en la **Tabla 8.2** se describen los equipos utilizados, los cuales fueron calibrados como lo indica en sus respectivos manuales.

Tabla 8.2 Equipo utilizado en la medición de los parámetros.

Parámetros	Equipo utilizado
Conductividad eléctrica	Starter 300C (Figura 8.7)
Temperatura	horiba NAVI F-51(Figura 8.8).
pH	horiba NAVI F-51 (Figura 8.8).
Concentración de los gases	Cromatógrafo de gases, Buck Scientific model 910 (Figura 8.9)



Figura 8.7 Sensor de conductividad eléctrica.



Figura 8.8 Sensor de pH y temperatura.



Figura 8.9 Cromatógrafo de gases

8.2.4 Altura del empaque

Para la columna empacada se seleccionó por cuestiones de practicidad el tipo de forma anillo rasching, que se observa en la **Figura 8.10**; fue elaborado a partir de manguera de PVC (policloruro de vinilo) de $\frac{1}{4}$ de pulgada de altura y diámetro. El anillo rasching es de forma simple y suele ser cilíndrico corto con una altura aproximadamente igual a su diámetro. Su diseño permite aumentar la superficie de contacto entre el líquido y el gas en una columna de proceso, lo que facilita la transferencia de masa y mejora la eficiencia del proceso.

Para obtener la altura del lecho empacado del sistema determinamos la línea de operación usando la ley de Henry ecuación 8.1.

$$y = Hx/p \quad (\text{ec. 8.1})$$

dónde

y = fracción molar del soluto en la fase gaseosa (adimensional).

H = constante de Henry del gas en el solvente a la temperatura de operación ($\text{atm} \cdot \text{fracción molar}^{-1}$ o atm, dependiendo de la forma en que se exprese).

x = fracción molar del soluto en la fase líquida (adimensional).

p = presión total del sistema (atm).

Sabemos que el coeficiente de Henry para el CO_2 a 25°C es aproximadamente $30.3 \text{ atm}/(\text{fracción molar})$, mientras que para el H_2S a 25°C es de $357 \text{ atm}/\text{fracción molar}$ (Perry & Green, 2008). Esto indica la diferencia en la solubilidad de estos compuestos en soluciones acuosas (cálculos anexo 2).

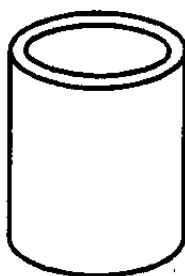


Figura 8.10 Anillo Rasching

8.3 Parámetros de operación

8.3.1 Flujo de biogás inyectado

El flujo del biogás inyectado será medido con la ayuda de de un rotámetro como el mostrado en la **Figura 8.11**.



Figura 8.11. Rotámetro para medición de gás.

8.3.2 Holdup

En un reactor, el término *holdup* se refiere al cambio de volumen del líquido que se encuentra en el reactor en un momento de la operación de este. El *holdup* se mide como la fracción de volumen del reactor que está ocupada por el líquido. Para calcularlo se miden los niveles del líquido antes y durante la prueba y para calcularlo se puede usar la siguiente ecuación.

$$E = \frac{Hg - H}{H} \quad (ec. 8.2)$$

Donde E es el *holdup*, H es la altura del líquido antes de la operación y Hg es la altura del nivel del líquido durante la prueba.

8.3.3 Consumo energético

El consumo energético se determinó mediante un medidor digital de energía eléctrica tipo (120 V AC, 60 Hz, rango de potencia 0–1800 W y corriente máxima de 15 A) **Figura 8.12.** el cual permite registrar potencia para el caso de esta tesis la bomba(W), energía (kWh), corriente (A) y tiempo de operación.

El cálculo del consumo energético se realizó a partir de la potencia registrada y el tiempo de operación, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$E = P \times t \quad \text{ec.(8.3)}$$

donde:

E = energía consumida (W)

P = potencia promedio registrada (W)

t = tiempo de operación (h)

Este procedimiento permitió evaluar el requerimiento energético del sistema bajo las diferentes condiciones de operación estudiadas.



Figura 8.12. Medidor digital de consumo eléctrico



8.3.4 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia se refiere al tiempo promedio que una sustancia o fluido permanece dentro antes de salir. Para calcular el tiempo de residencia, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$Tr = \frac{Vr}{Q} \quad (\text{ec. 8.4})$$

Donde Tr es el tiempo de residencia, Vr es el volumen del líquido en el reactor durante la operación. y Q es el flujo volumétrico del biogás que se inyecta al reactor.

8.4 Operación general

8.4.1 Presión de operación

Para el cálculo de la presión necesaria del biogás inyectado que pueda vencer la presión del líquido se utiliza la ecuación de la presión hidrostática.

$$P = gh\rho \quad (\text{ec. 8.5})$$

Donde P es la presión del biogás, g es la aceleración de la gravedad, h la altura total de líquido y ρ es la densidad del líquido.



8.4.2 Diseño de experimento

Para el diseño de experimento se utilizó un Ttaguchi L8 con 2 niveles y 4 factores, donde las variables son; el gasto del líquido (Ql), el gasto del gas (Qg), la concentración de CaO (CaO) y el empaque. Se proponen los niveles A y B mostrados en la **Tabla 8.3**

Tabla 8.3. Diseño de experimentos niveles y variables.

Variables	Nivel A	Nivel B
Gasto del líquido	1 L/min	2 L/min
Gasto del gas	1 L/min	2 L/min
Concentración de Ca(OH)_2	1.13 g/L	2 g/L
Empaque	si	no

Se utilizó el programa Minitab para el diseño de experimento con las variables de la **Tabla 8.3** obteniendo así 8 corridas con los diferentes niveles, las condiciones de los experimentos se muestran en la **Figura 8.13** y **Tabla 8.4**.

Diseño de Taguchi

HOJA DE TRABAJO 2

Diseño de Taguchi

Resumen del diseño

Arreglo de Taguchi: L8(2⁴)

Factores: 4

Corridas: 8

Columnas del arreglo de L8(2⁴): 1 2 4 7

	C1	C2	C3	C4-T
	Ql	Qg	CaO	Empaque
1	1	1	1.13	si
2	1	1	2.00	no
3	1	2	1.13	no
4	1	2	2.00	si
5	2	1	1.13	no
6	2	1	2.00	si
7	2	2	1.13	si
8	2	2	2.00	no
9				

Figura 8.13. Minitab diseño de experimentos.



Tabla 8.4. Resultados minitab, experimentación.

Ql	Qg	CaO	empaque
1	1	1.13	si
1	1	2	no
1	2	1.13	no
1	2	2	si
2	1	1.13	no
2	1	2	si
2	2	1.13	si
2	2	2	no



8.5 Técnicas para determinaciones

8.5.1 Sulfatos

Almacenaje

Tomar la muestra de la solución en frascos de plástico o de vidrio, todas las muestras deben refrigerarse a una temperatura de $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta su análisis, conservando la muestra en refrigeración puede mantenerse hasta 28 días.

Material

- Agitador de vidrio.
- Espectrofotómetro, para utilizarse a 420 nm.
- Cronómetro
- 1 matraz Erlenmeyer de 125 ml
- 1 espátula

Reactivos

- Agua destilada, con las siguientes características: Conductividad máxima $5\text{ }\mu\text{S/cm}$ a 25°C y pH de 5 a pH 8.
- Cloruro de bario
- Disolución de referencia de concentración de masa de ion sulfato de $\gamma(\text{SO}_4^{-2}) = 100\text{ mg/L}$ de SO_4^{-2}
- Disolver en agua 14.79 mg de sulfato de sodio anhidro y llevar al aforo a 100 mL, o hacer una solución de Ácido Sulfúrico de 100 mg/L.
- HCl 0.02N.

Procedimiento

Transferir a un matraz Erlenmeyer de 125 mL una muestra de 50 mL y medir su conductividad:

Si ésta es menor a 10 dS/m, se hace una dilución 1/2: 10 ml de muestra, 1 ml HCl, 9 ml de agua destilada.

Si la conductividad es mayor a 10 dS/m la dilución 1/4: 5 ml de muestra, 1 ml HCl, 14 ml de agua destilada.



Agitar la solución y añadir el contenido de una cucharilla llena de cristales de cloruro de bario (0.2 a 0.3 g), agitar y dejar reposar durante 30 minutos.

Hacer lo mismo con las soluciones para la curva de calibración, añadir cloruro de bario, agitar y dejar reposar durante 30 minutos.

Encender el espectrofotómetro, ponerlo a una transmitancia de 420 nm y calibrar con un blanco (agua destilada en este caso). Poner las soluciones para realizar la curva de calibración, de la de menor concentración a la de mayor concentración y anotar las absorbancias leídas. Luego poner la muestra de agua.

Realizar la curva de calibración Concentración vs Absorbancia y obtener la ecuación.

Cálculos

$$\gamma(SO_4^{-2}) = \frac{\alpha(\lambda) - a}{b} \quad (\text{ec. 8.6})$$

Dónde:

b es la pendiente de la curva de calibración.

a es la ordenada al origen de la curva de calibración.

$\alpha(\lambda)$ es la absorbancia del ion sulfato a la longitud de onda λ (420 nm).

$\gamma(SO_4^{-2})$ es la concentración de masa del ion sulfato expresada en mg/L de SO_4^{-2} .

Multiplicar por el factor de dilución cuando aplique (si la dilución fue $\frac{1}{2}$ multiplicar por 2, y si fue $\frac{1}{4}$ multiplicar por 4).



8.4.2 Carbonatos y bicarbonatos

Almacenaje

La muestra se deberá analizar de inmediato. Los resultados de muestras almacenadas no son representativos.

Material

- 3 matraces Erlenmeyer 125 ml
- 1 soporte universal
- 1 pinzas para bureta
- 1 bureta 25 ml
- 1 pipeta graduada 5 ml
- 1 perilla
- 2 pipetas Pasteur o goteros
- 1 embudo

Reactivos

- Fenolftaleína (0.25%).
- Anaranjado de metilo.
- Solución de HCl 0.1 N.

Procedimiento

Colocar 5 ml de muestra de agua en 3 matraces Erlenmeyer de 125 ml, agregar 3 gotas de indicador fenolftaleína al 0.25% a cada uno.

Si aparece un color rosa, titular con HCl 0.01N hasta un vire incoloro, si no aparece el color rosa, reportar carbonatos igual a cero.

A los mismos matraces agregar 3 gotas de anaranjado de metilo, tomarán un color amarillo. Continuar titulando con HCl 0.01 N hasta la aparición de un color naranja.

Cálculos



$$CO_3^{-2} = \frac{(2)(V)(N)(1000)}{ml \text{ de muestra}} \quad (\text{mg/L}) \quad (\text{ec. 8.7})$$

Dónde:

V= ml de HCl usado

N= Normalidad del HCl

$$HCO_3^{-} = \frac{(T-2V)(N)(1000)}{ml \text{ de muestra}} \quad (\text{mg/L}) \quad (\text{ec. 8.8})$$

Dónde:

T = ml de HCl gastado en las 2 titulaciones

V = ml gastados en la primera titulación

N = Normalidad del HCl



8.4.3 Sulfuros

Almacenaje

Para determinar sulfuros totales, la muestra debe preservarse con 4 gotas de solución de acetato de zinc 2 N por cada 100 ml de muestra, las que se adicionan antes de llenar totalmente el frasco. El almacenamiento debe ser a 4°C.

Material

- 1 bureta
- 1 soporte universal
- 1 pinzas para bureta
- 1 matraz Erlenmeyer 125 ml
- 1 embudo
- 1 espátula
- 1 pipeta Pasteur o gotero
- 1 pipeta graduada 10 ml
- 1 pipeta graduada 5 ml
- 1 perilla
- 1 vaso de precipitados 100 ml
- Papel filtro

Reactivos

- Solución de ácido clorhídrico, HCl, 6 N.
- Solución estándar de yodo, 0.0250 N.
- Solución estándar de tiosulfato de sodio, 0.0250 N.
- Solución estándar de yodato de potasio, 0.0250 N.
- Almidón soluble

Procedimiento

Trabajar directamente una muestra de 5 ml, añadir 1 ml de la solución de yodo y 0.5 ml de HCl 6 N, tiene que permanecer la coloración del yodo, si no es así adicionar más solución de yodo hasta que se coloree.



Añadir una pizca de almidón, la muestra tomará un color azul/turbio, y titular con tiosulfato hasta desaparición del color azul y tomar la lectura.

Cálculos

$$S^{-2} = \frac{[(AxB)-(Cx D)](16000)}{ml \text{ de muestra}} \quad (\text{mg/L}) \quad (\text{ec. 8.9})$$

A = Solución de yodo, en ml.

B = Normalidad de la solución de iodo.

C = Tiosulfato de sodio, en ml.

D = Normalidad del tiosulfato de sodio.

8.4.4 Dureza cálcica

Almacenaje

Recolectar un volumen de muestra, homogéneo y representativo, de aproximadamente en un frasco de polietileno o vidrio. Pueden utilizarse muestras simples y/o compuestas.

Mantener la muestra en refrigeración a 4°C hasta el momento del análisis. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis recomendado es de seis meses.

Material

- 1 bureta de 25 ml.
- 3 matraces Erlenmeyer 250 ml
- 1 soporte universal
- 1 pinzas para bureta
- 1 pipeta graduada de 5 ml
- 1 perilla
- 1 probeta de 100 ml
- 1 espátula



Reactivos

- Disolución de EDTA (aproximadamente 0.01 M). Disolver aprox. 1g de sal disódica en agua destilada en un matraz volumétrico 250 ml. Mezclar perfectamente la solución, es preferible guardar la solución en un frasco de polietileno.
- Indicador Murexida. Pesar 0.25 g de murexida en 25 g de cloruro de sodio.
- Solución reguladora de pH mayor a 12. Disolver 40 g de NaOH en 100 ml de agua destilada.

Procedimiento

Tomar 3 muestras de 5 ml cada una en matraces Erlenmeyer. Agregar 1 ml de solución reguladora de NaOH con pH mayor a 12. Añadir 0.1 g de indicador murexida y titular con solución de EDTA hasta el vire del indicador de rosa a violeta.

Cálculos

$$CaCO_3 = \frac{(ml\ de\ EDTA)(M\ EDTA)(mmol\ CaCO_3) \times 1000}{ml\ de\ muestra} \quad (mg/L) \quad (ec. 8.10)$$

Donde

ml de EDTA= son los ml de titulante utilizados

M EDTA= es la Molaridad del titulante

mmol $CaCO_3$ = es la masa molar del cal carbonato de calcio.



8.4.5 Hidróxidos

Material

- 1 bureta de 25 ml.
- 3 matraces Erlenmeyer 250 ml
- 1 soporte universal
- 1 pinzas para bureta
- 1 pipeta graduada de 5 ml
- 1 perilla

Reactivos

- Solución de HCl 0.1 N
- Fenolftaleína 1% en etanol
- Naranja de metilo 0.1%

Procedimiento

Tomar una muestra de 10 ml, se colocan en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, añadir 3 o 4 gotas de fenolftaleína, titular con HCl 0.1N hasta que la solución sea incolora (V1). A la misma muestra añadir 4 o 5 gotas de anaranjado de metilo (tomará un color amarillo), titular con HCl 0.1 N hasta que la solución cambie a naranja (V2).

Cálculos

$$OH^- = \frac{(V1-V2)(N\ HCl)(50)(1000)}{ml\ de\ muestra} \quad (mg/L) \quad (ec.\ 8.11)$$

V1 = Volumen de HCl consumido en la primera titulación

V2 = Volumen de HCl consumido en la segunda titulación

N HCl = Normalidad del ácido clorhídrico



9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 Construcción e instalación

9.1.1 Columna de absorción

En la **Figura 9.1** se muestra la columna de absorción empleada en el sistema. La alimentación de biogás se introduce por el punto **a)**. Debido a que el material seleccionado para la construcción del reactor no permite la visualización directa del nivel de líquido, se implementó una manguera externa como indicador de nivel, basada en el principio de vasos comunicantes, ubicada en el punto **b)**.

Asimismo, el sistema cuenta con un punto de muestreo intermedio en **c)**, que permite evaluar el comportamiento del proceso a lo largo de la columna. En **d)** se localiza la salida del biogás tratado, mientras que en **e)** se encuentra el rotámetro utilizado para medir el caudal de la solución absorbente.



Figura 9.1 Columna de absorción.

a) alimentación de biogás, b) indicador de nivel, c) punto de muestreo intermedio d) salida del biogás tratado y e) rotámetro arduino.

9.1.2 Tanque de almacenamiento de biogás tratado

A continuación en la **Figura 9.2** el tanque de almacenamiento de biogás tratado con capacidad de 25 L, el tanque se mantiene lleno de agua y presurizado para el desplazamiento correcto del agua contenida en este; **a)** es la entrada de biogás tratado, **b)** es la salida del líquido desplazado por el gas y **c)** es la salida del biogás tratado para su muestreo.



Figura 9.2 Tanque de almacenamiento de biogás tratado.

a) entrada de biogás tratado, b) salida del líquido desplazado y c) salida del biogás tratado para su muestreo.

9.1.3 Tanque de medición de líquido desplazado

En la **Figura 9.3** se presenta el tanque de medición de líquido desplazado, el cual tiene una capacidad total de 25 L. Este equipo forma parte del sistema de cuantificación indirecta del volumen de biogás tratado, operando bajo el principio de desplazamiento de fluidos.

Durante el proceso, el biogás tratado ingresa al sistema y provoca el desplazamiento de un volumen equivalente de líquido contenido en el tanque. De esta manera, el volumen de líquido desplazado se asume igual al volumen de gas medido, lo que permite determinar el caudal o volumen acumulado de biogás tratado de forma indirecta.



Figura 9.3 Tanque del desplazamiento del líquido.

9.1.4 Tanque de almacenamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

La **Figura 9.4** nos muestra el tanque de almacenamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (87 cm de diámetro y 100 cm de alto); el punto **a)** muestra la bomba que es utilizada para suministrar la solución a la columna de absorción y **b)** es la recirculación del líquido.



Figura 9.4 Tanque de almacenamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
a) bomba y b) recirculación del líquido.



9.2 Experimentación

9.2.1 Determinaciones de valores del solvente y de la solución

Para las determinaciones de los valores iniciales de la solución, antes de entrar en contacto con el biogás, se tomaron tres muestras de agua potable de diferentes zonas de la ciudad de Morelia, Michoacán; la *muestra A* es del suministro de agua del laboratorio de ambiental, ubicado en el posgrado de Ingeniería Química, la *muestra B* es de la colonia Ampliación Las Margaritas. La *muestra C* se tomó de la colonia Bosque Camelinas. Las soluciones de hidróxido de calcio fueron realizadas con agua destilada. Los resultados de estos análisis se observan en la **tabla 9.1**.

Tabla. 9.1 Determinaciones iniciales.

Determinación	Muestra A	Muestra B	Muestra C	Solución Ca(OH) ₂ (1.13 g/L)	Solución Ca(OH) ₂ (2 g/L)
Carbonatos (mg/L)	0	0	0	6400	8600
Bicarbonatos (mg/L)	1200	780	903	0	0
Hidróxidos (mg/L)	0	0	0	150	3800
Calcio (mg/L)	72.7	38.0	44.0	1370	1860
Sulfatos (mg/L)	13.6	17.1	18.4	70.12	52.53
Sulfuros (mg/L)	10.2	13.4	13.4	80.24	83.1
pH	6.56	6.30	6.99	12.2	12.77
Conductividad (μS/cm)	500.0	530.5	208.3	6.76	14.74



Como se observa en la **Tabla 9.1** las muestras a, b y c se aprecia la ausencia de carbonatos e hidróxidos, lo que no es así para los bicarbonatos, característica en aguas naturales con pH cercano al neutro, corroborando con los valores de pH que van desde los 6.3 a los 6.99.

Estas pruebas se realizaron debido a que el agua potable del laboratorio de ambiental en el posgrado de química será el suministro para la preparación de la solución y es importante tener un punto de inicio de referencia, para determinar posteriormente la remoción del ácido sulfúrico y del CO_2 .

Para la preparación de las soluciones en ambas concentraciones se utilizó agua destilada, con el fin de evitar interferencias asociadas a la presencia de iones y otras impurezas. El uso de agua destilada se limitó únicamente a estas dos muestras de referencia y no a las pruebas posteriores, debido a consideraciones económicas, debido a su costo puede ser hasta 50 veces mayor que el del agua potable. Asimismo, las soluciones preparadas se dejaron reposar durante 24 horas antes de realizar los análisis correspondientes.



9.3 Operación de la columna de absorción

9.3.1 Diseño de experimentos (Taguchi)

Para las corridas se seleccionó un análisis estadístico Taguchi es una metodología que optimiza la cantidad de experimentos con arreglos ortogonales los cuales permiten estudiar múltiples variables y realizar una cantidad menor de experimentos. Además, identifica interacciones significativas. En la **tabla 9.2** se observan los experimentos que se llevaron a cabo durante esta investigación.

Tabla 9.2 Experimentación en el reactor.

Corrida	Gasto del líquido	Gasto del gas	Concentración de CaO	Empaque
1	2	1	1.13	no
2	1	1	2	no
3	1	2	1.13	no
4	2	2	2	no
5	1	1	1.13	si
6	2	1	2	si
7	2	2	1.13	si
8	1	2	2	si



El análisis del diseño de experimentos se realizó utilizando el software Minitab. Se implementó un diseño Taguchi L8, el cual nos permitió revisar los efectos de los diferentes factores en el proceso. Estos factores mencionados son el flujo de líquido (Ql), el flujo de gas (Qg), la concentración de CaO (CaO), y la presencia o no de empaque.

El uso de de Taguchi L8 en minitab ayudó a la identificación de la influencia de los factores teniendo diferentes niveles, alto y bajo, para cada uno, se determinó el impacto en la eficiencia de la remoción.

Los resultados apoyaron a la determinación de las condiciones óptimas para la máxima purificación, y con esto poder hacer ajustes en la experimentación. El resumen del modelo estadístico resultante se presenta en la **Figura 9.5**.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
1.2551	95.61%	89.76%

Figura 9.5 Resumen del modelo.

En la **Figura 9.6** se observa que los valores de p-valor de todos los factores son menores a 0.05, excepto el factor de la concentración de CaO. Lo cual indica que la mayoría de los factores tienen un efecto estadísticamente significativo en el experimento, sin embargo el único factor que no se encuentra dentro de este parámetro es la concentración de CaO con un p-valor de 0.81 lo cual no es muy lejano. De acuerdo con un criterio estadístico un factor se considera significativo si su p-valor es menor a 0.05.

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Ql	1	20.672	20.672	20.672	13.12	0.036
Qg	1	23.393	23.393	23.393	14.85	0.031
CaO	1	10.580	10.580	10.580	6.72	0.081
Empaque	1	48.314	48.314	48.314	30.67	0.012
Error residual	3	4.726	4.726	1.575		
Total	7	107.686				

Figura 9.6 Análisis de varianza de medias.

Ahora analizando la respuesta de medias en la **Figura 9.7** se corroboró de acuerdo al valor delta que el empaque fue el factor más significativo con un calor de 4.91, seguido del gasto del gas, posterior el gasto del líquido y finalmente la concentración de CaO con valor delta de 2.30.

Nivel	Ql	Qg	CaO	Empaque
1	91.31	94.63	91.77	95.38
2	94.53	91.21	94.07	90.47
Delta	3.22	3.42	2.30	4.91
Clasificar	3	2	4	1

Figura 9.7 Respuesta de medias.

observando la gráfica de la **figura 9.8**, aquí se puede analizar que tanto influye cada factor gráficamente sobre nuestra variable de respuesta que es la concentración de metano. confirmando que el empaque es el factor más influyente, así mismo con esta gráfica se validan los resultados de las figuras 9.7 y 9.6.

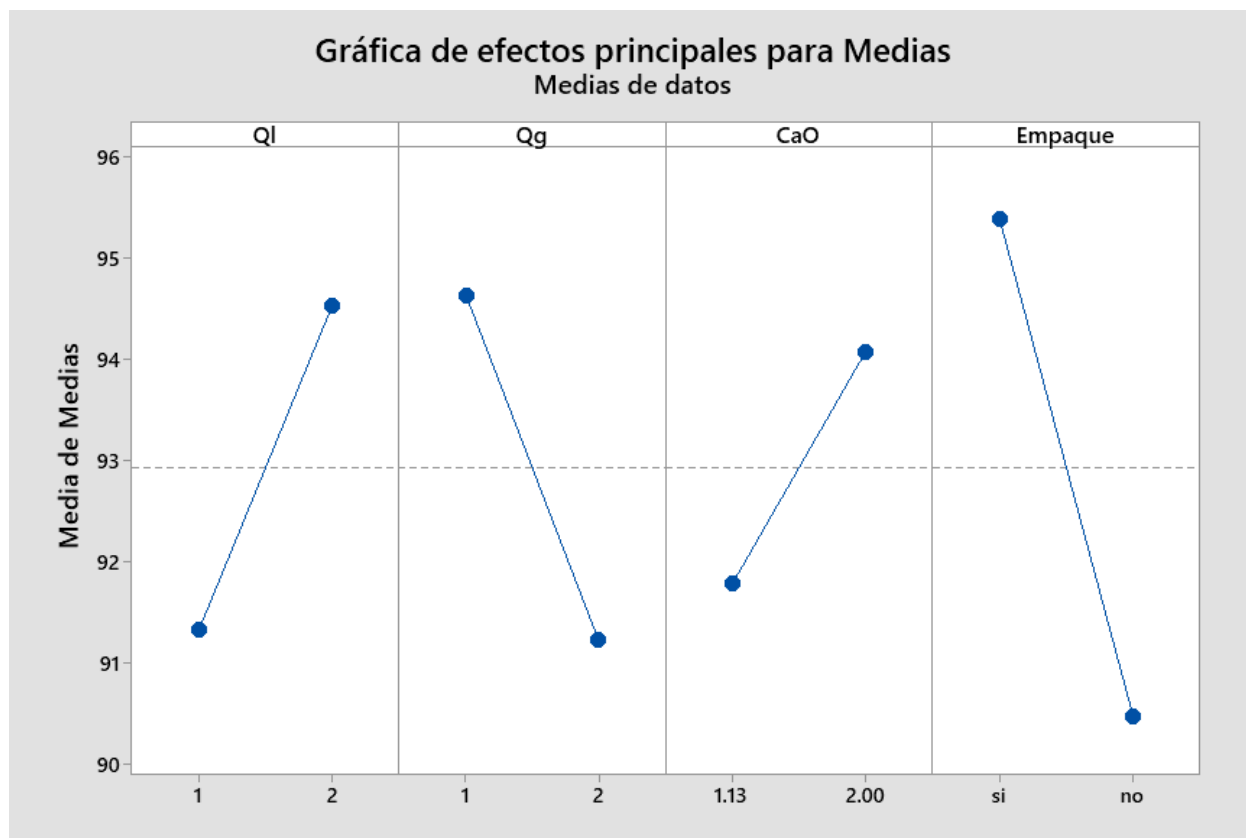


Figura 9.8 gráfica de efectos principales para medias



9.3.2 Corrida No. 1

En la **Tabla 9.3** se encuentran las condiciones iniciales y finales correspondientes a la corrida No. 1 realizada en la columna de absorción, donde se analiza el comportamiento de variables como la temperatura, la conductividad y el tiempo de operación. El reactor se suministro con 20 L de solución de Ca(OH)_2 en recirculación, con una concentración de 1.13 g/L, sin empaque, con un gasto de líquido de 2 L/min y un gasto de gas de 1 L/min.

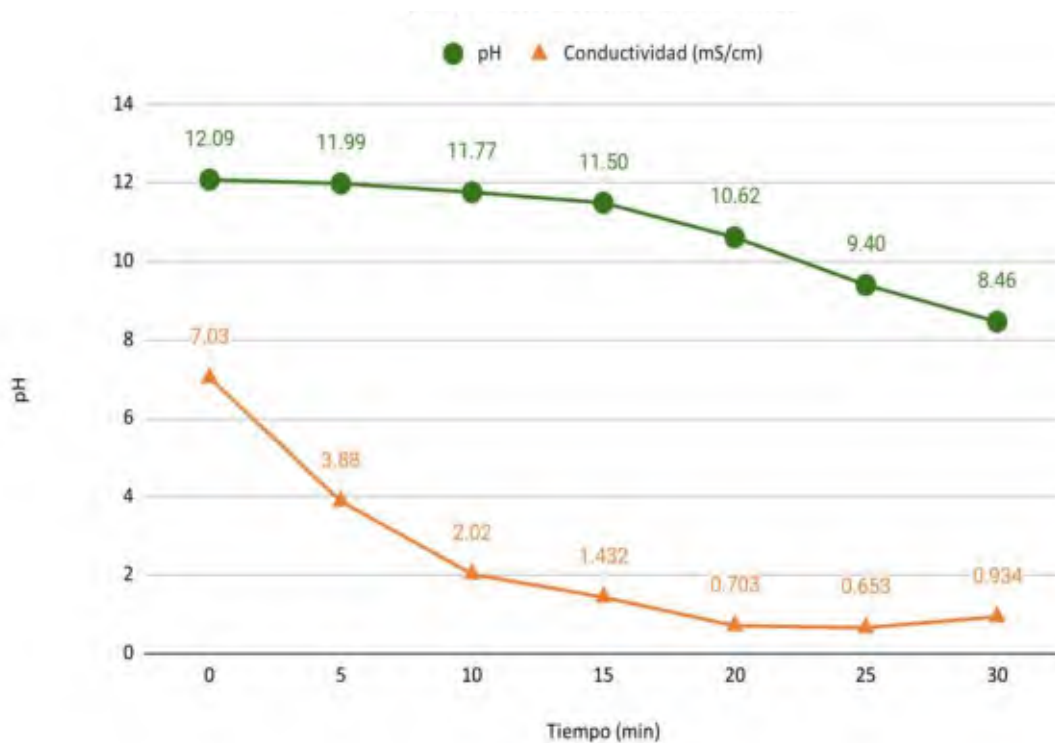
Tabla 9.3 Condiciones iniciales y finales (Corrida No.1)

Parámetro	Valores iniciales	Valores finales
Tiempo (min)	0	30
Consumo energético (W/h)	0	31.1
Volumen de solución (Litros)	20	19.3
Temperatura (°C)	26	26.4

Los resultados de la tabla 9.3, la variación de temperatura fue mínima de 0.4 °C. sin embargo nos confirma que es una reacción exógena. Para el volumen de la solución se observa una disminución, la cual se debe a la toma de muestras cada 5 minutos, para las determinaciones del análisis experimental. El consumo energético generado por la bomba que suministra la solución y realiza la recirculación permaneció constante en un valor de 31 W/h durante los 30 min.

Al observar la **figura 9.9**, vamos de un valor de pH inicial de 12.09 a un valor final de 8.47 al tiempo de 30 minutos de operación. Lo cual nos puede indicar el consumo de iones hidróxidos (OH^-) de la solución, sin embargo no se alcanzan valores ácidos, ni siquiera neutros indicando que aún existe la capacidad alcalina al finalizar el experimento.

Ahora bien desde la conductividad eléctrica hay una disminución de 7.03 a 0.703 mS/cm. Esto debido a la reacción de iones libres como Ca^{2+} y CO_3^{2-} los cuales forman precipitaciones sólidas como el CaCO_3 , para este caso el punto más bajo de CE es a los 25 minutos, y posteriormente hay un incremento el cual se debe a la redisolución de estos compuestos.



En la **Figura 9.10** se observa la evolución de los carbonatos y los hidróxidos durante la corrida 1. en esta figura se observan las reacciones químicas de la absorción de CO_2 .

Al inicio la concentración de hidróxidos es de 1550 mg/L, al llegar a los 10 minutos de operación se ha agotado, lo cual indica el consumo de los iones OH^- causado por la reacción con el CO_2 del biogás.

Ahora los carbonatos presentan una concentración de 4700 mg/L y se consumen por completo en el minuto 25 de la operación del reactor, esto debido de igual manera a la reacción de los carbonatos con el CO_2 , estos se forman en bicarbonatos al perder alcalinidad la solución, como en el diagrama de disociación de CO_2 en agua de la **figura 2.2**.

Los bicarbonatos muestran su incremento, comenzando con 1200 mg/L en el minuto 10 y 2850 mg/L al finalizar la prueba en el minuto 30, consistentes con la gráfica de pH.

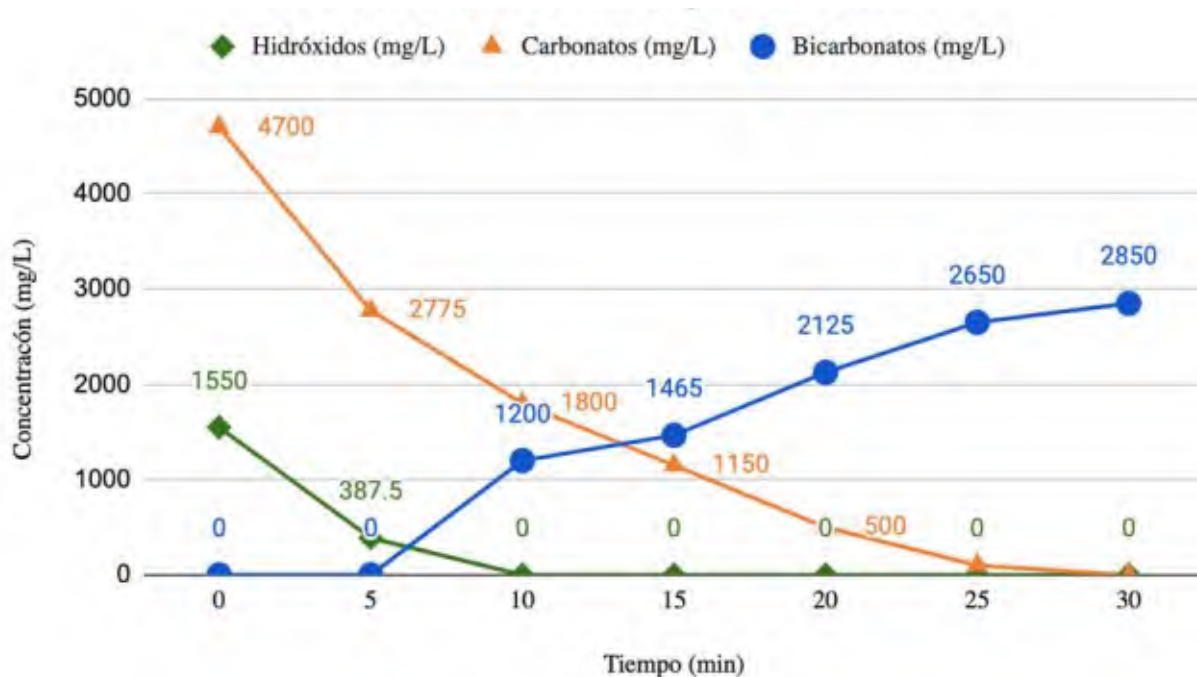


Figura 9.10 Gráfica de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos (corrida No.1).

La **figura 9.11** es la gráfica de dureza cálcica y tiene una disminución importante durante los primeros 20 min de operación, pasando de 1350 mg/L a valores de 30 mg/L, lo cual es un indicador de que los iones de Ca^{2+} se precipitan hacia carbonato de calcio (CaCO_3).

La primera caída crítica de la gráfica de dureza cálcica coincide con el consumo de los hidróxidos observados en la **Figura 9.10**, lo que indica que el calcio reaccionó rápidamente para formar el carbonato de calcio, con lo cual además de una neutralización química, también indica la presencia de precipitación física del CO_2 . Ahora bien por otro lado en el minuto 30 observamos un pequeño incremento, lo cual asociamos a la redisolución parcial.

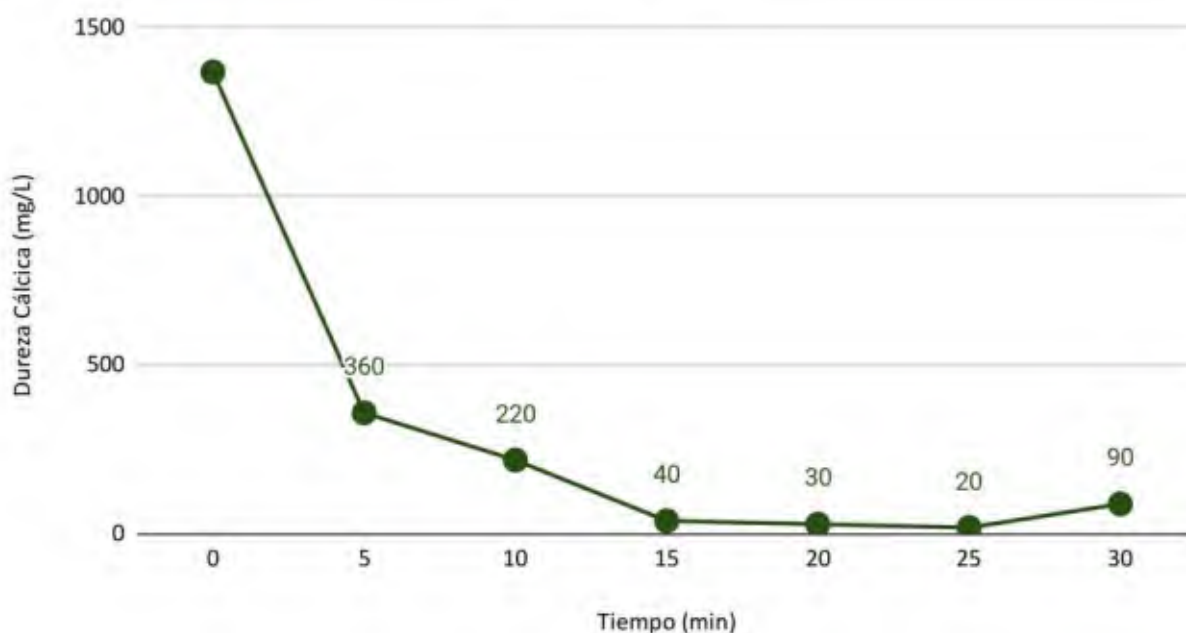


Figura 9.11 Gráfica de dureza cálcica (Corrida No.1)

En la **Figura 9.12** se observa el comportamiento de los sulfuros y sulfatos durante la Corrida 1. Los sulfuros muestran un incremento de hasta 15.2 mg/L, manteniéndose estable.

Los sulfatos no presentan un comportamiento claro de crecimiento o decremento, estos muestran variaciones a lo largo del tiempo. Sin embargo es importante considerar que la solución contiene altas cantidades de calcio por lo cual existe interferencia debido al ion de Ca^{2+} .

Finalmente, los resultados indican que la remoción del H_2S ocurre principalmente en la conversión de sulfuros, en un medio alcalino.

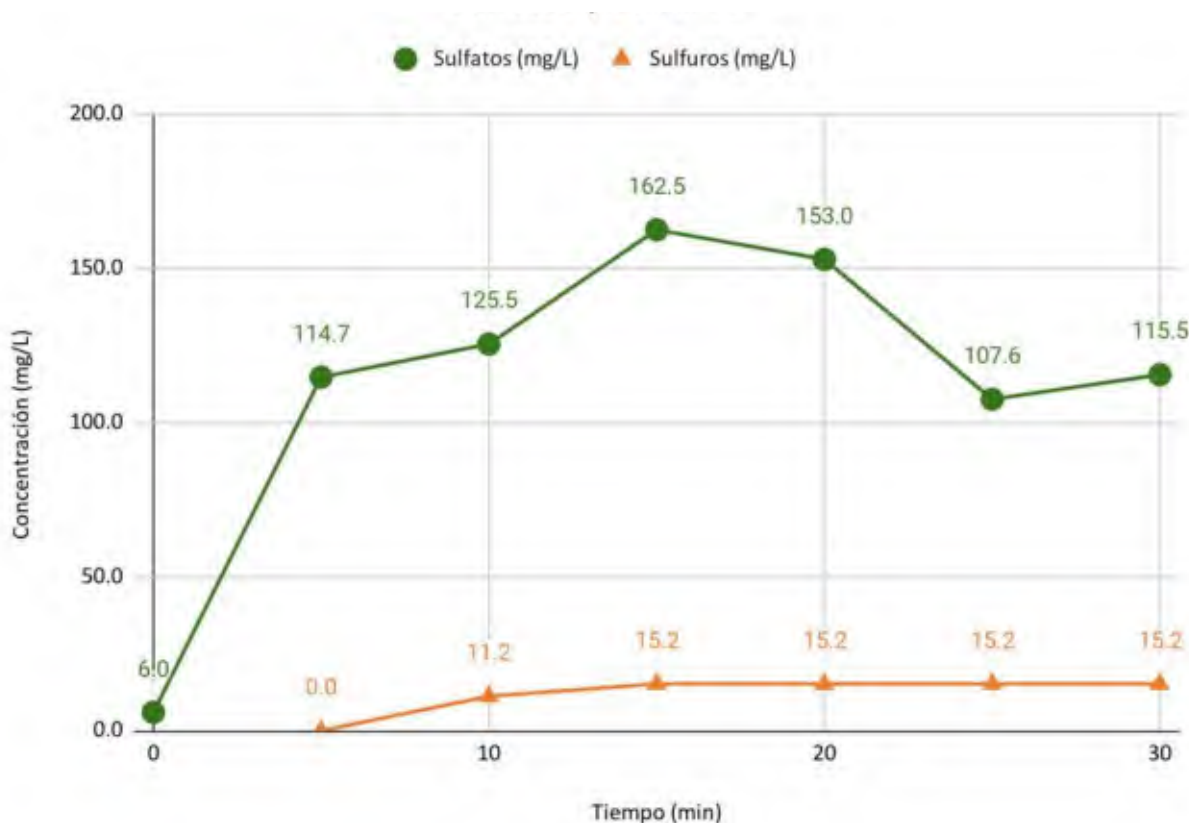


Figura 9.12 Gráfica de Sulfatos y Sulfuros (Corrida No.1).

En la **Figura 9.13** se observa la composición del biogás antes y después del tratamiento en la Corrida 1. Inicialmente, el biogás presentaba 70 % v/v de metano y 28 % v/v de dióxido de carbono, después 30 minutos de operación, el contenido de metano aumentó hasta 93.75 % v/v, mientras que el CO₂ se redujo a 6.25 % v/v.

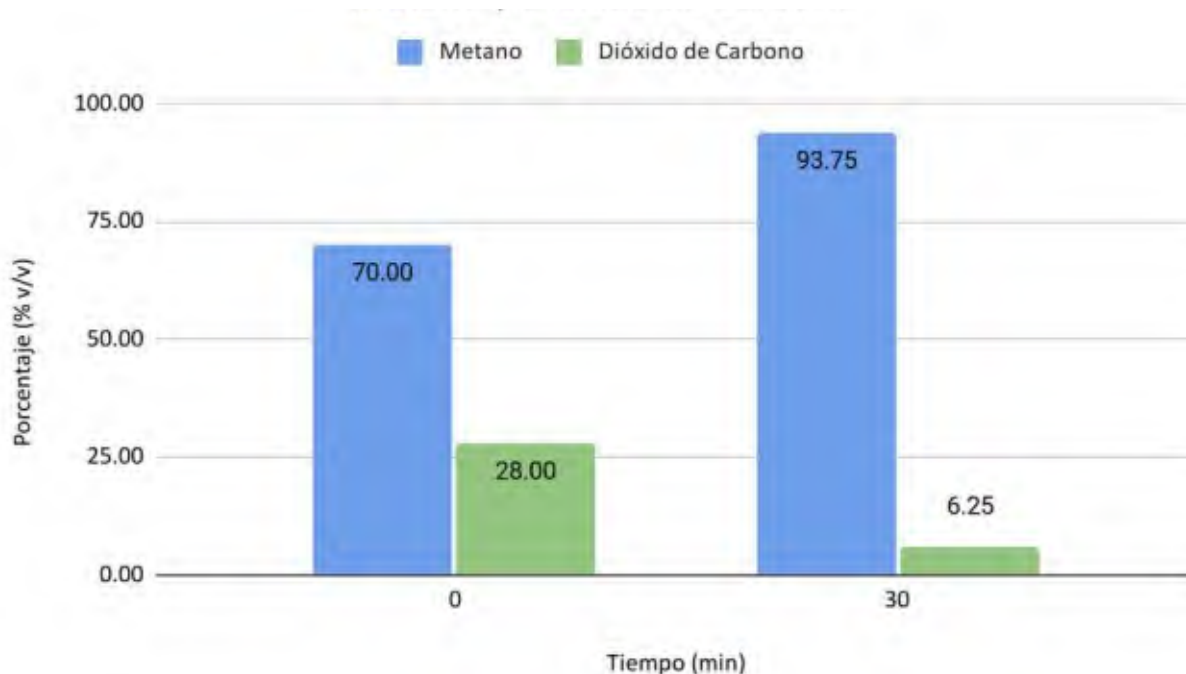


Figura 9.13 Gráfica de biogás (Corrida No.1).

El aumento en el metano confirma que la columna es eficiente para el endulzamiento del biogás, y se rectifica con el consumo de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de la **figura 9.10**. El valor de 93.75 % v/v indica que la correa No. 1 logró una purificación importante del biogás.



9.3.4 Corrida No. 3

En la **Tabla 9.4** se muestran las condiciones iniciales y finales de la corrida No. 3 del reactor al cual se le suministraron 20 L de solución de Ca(OH)_2 en recirculación, con concentración de CaO igual a 1.13 g/L, sin empaque. con un gasto de líquido de 1 L/min y un gasto de gas de 2 L/min.

Tabla 9.4 Condiciones iniciales y finales (Corrida No.3)

Parámetro	Valores iniciales	Valores finales
Tiempo (min)	0	30
Consumo energético (w/hr)	0	30.6
Volumen de solución (Litros)	20	19.3
Temperatura (°C)	28.1	28.5

En la **Figura 9.14**, se aprecia el comportamiento del pH, durante la operación de la columna en la corrida No.3, pasando de un pH inicial 11.97 a un pH de 6.85 al finalizar la prueba de 30 min, lo cual nos indica que la solución se neutralizó.

Ahora bien para el caso de la conductividad eléctrica, la cual comenzó en 7.44 mS/cm, llegando a su punto más bajo en el minuto 10 con 0.0749 mS/cm y finalizando con 1.748 mS/cm, indicando un leve incremento causado por generación de nuevas especies como bicarbonatos..

En la corrida No. 3 se duplicó el flujo de biogás y se disminuyó a la mitad el flujo del líquido, en comparativa con la corrida No.1, lo cual provoca un descenso del pH mayor, debido al mayor suministro de CO₂.

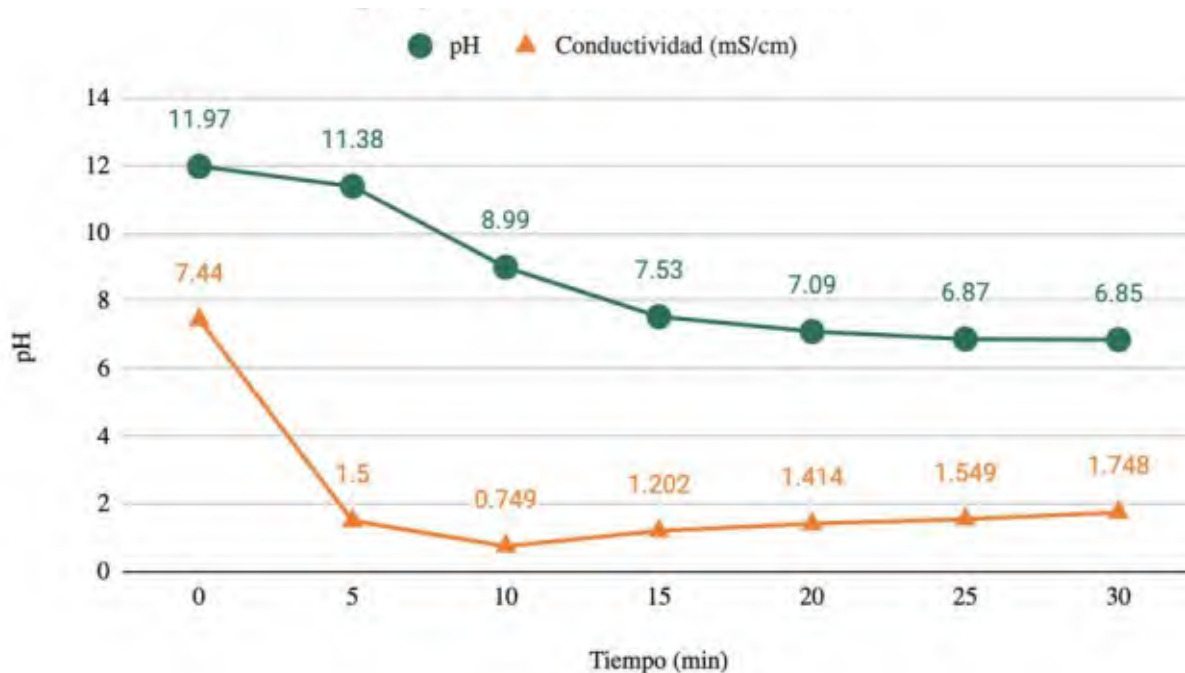


Figura 9.14 Gráfica de pH y CE (corrida No.3).

Las determinaciones de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos se observan en la **Figura 9.15**. Inicialmente, la concentración inicial de hidróxidos es de 2900 mg/L, Sin embargo, estos se consumen en los primeros 5 min de operación, este rápido consumo en comparación con la corrida No. confirma que a mayor flujo de biogás (2 L/min) se incrementa la absorción del CO_2 por lo cual el pH desciende rápidamente, demostrando la importancia de la variable del flujo de biogás.

Los Carbonatos de igual manera se consumen con mayor velocidad que en la corrida No.1, al minuto 15 de operación han desaparecido de igual manera concuerda con los valores de pH, que para este tiempo es cercano a un pH neutro.

Los bicarbonatos se muestran casi desde el inicio incrementando hasta los 20 minutos, alcanzando valores máximos de 2150 mg/L. esto es consistente con el pH se la **Figura 9.14**, debido a que los valores de pH cercanos al neutro favorecen la formación de los bicarbonatos.

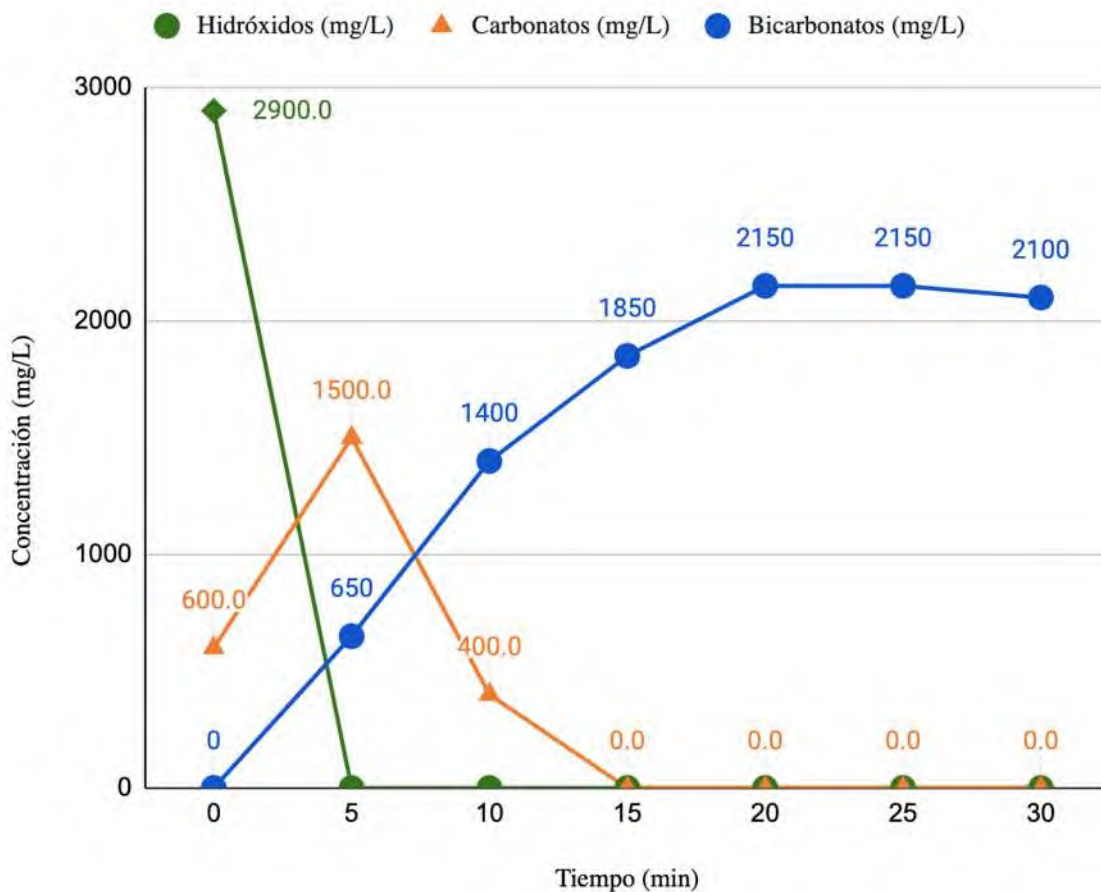


Figura 9.15 Gráfica de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos, (corrida No.3).

La dureza cálcica de la corrida No. 3 se observa en la figura 9.16, la cual presenta una disminución abrupta en los primeros 5 min de operación pasando de 1250 mg/L a valores mínimos de 60 mg/L, por lo cual tenemos una reacción de los iones de Ca^{2+} pasando a precipitarse en carbonato de calcio. Esto coincide con el consumo rápido de los hidróxidos de la **Figura 9.15**.

Posteriormente, a partir de los 20 minutos, se observa un incremento en la dureza cálcica alcanzando valores de 610 mg/L, este aumento se atribuye a la conversión de carbonatos en bicarbonatos y al pH debido a que bajo estas condiciones el parte carbonato de calcio puede disolver y formar especies más solubles, como podría ser el ácido carbónico, si es que el pH bajará más.

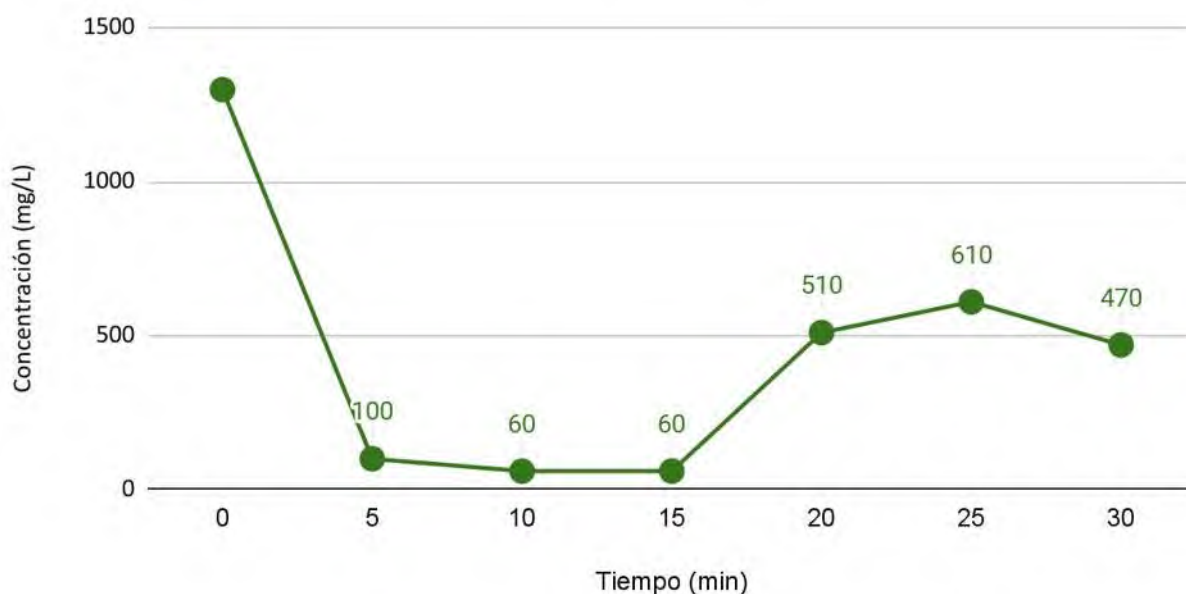


Figura 9.16 Gráfica de dureza cálcica (corrida No.3).

En la **Figura 9.17** se observa que los sulfuros crecen hasta llegar a 34.2 mg/L, en el minuto 25 y se mantiene hasta el final de la prueba, esto debido a la absorción del H_2S , que al disolver en el agua genera un equilibrio químico. También podemos atribuir que el mayor flujo de biogás de la corrida No. 3 (2 L/min) comparado con la corrida No. 1 (1 L/min) la cual favorece a la transferencia de H_2S a la solución absorbente, explicando el aumento progresivo de los sulfuros.

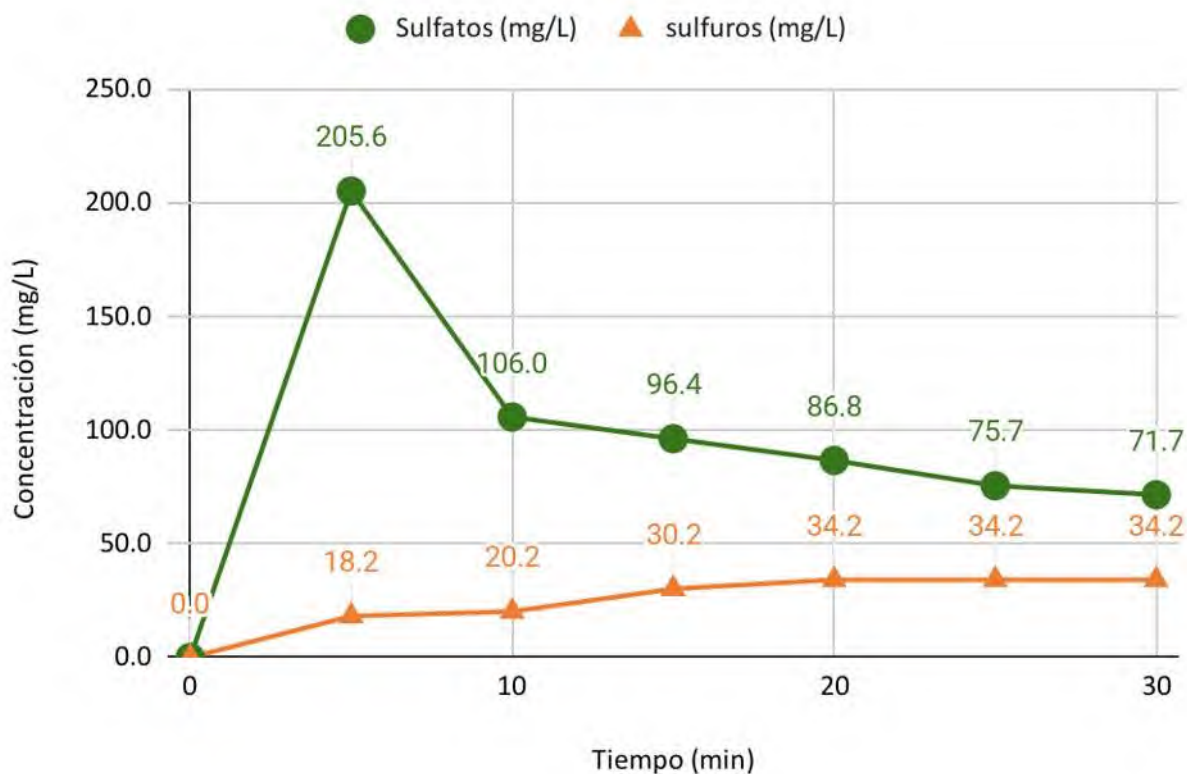


Figura 9.17 Gráfica de Sulfatos y Sulfuros (corrida No.3).

En la **Figura 9.18** se presenta la composición del biogás modelo al inicio y al final de la corrida No. 3, pasando de una concentración de metano de 70.00 % v/v de y 28.00 % v/v de dióxido de carbono. Al finalizar la prueba, el contenido de metano aumentó hasta 86.05 % v/v y el CO₂ disminuye hasta un 13.95% v/v, lo cual significa una remoción del 50.18% del dióxido de carbono, Confirmando con esto que a pesar del mayor flujo de biogás, se logró una buena purificación.

Sin embargo, dado que el pH bajó rápidamente, así como el agotamiento de los hidróxidos, podemos decir que la eficiencia de la remoción disminuyó por la pérdida de la alcalinidad en la solución absorbente.

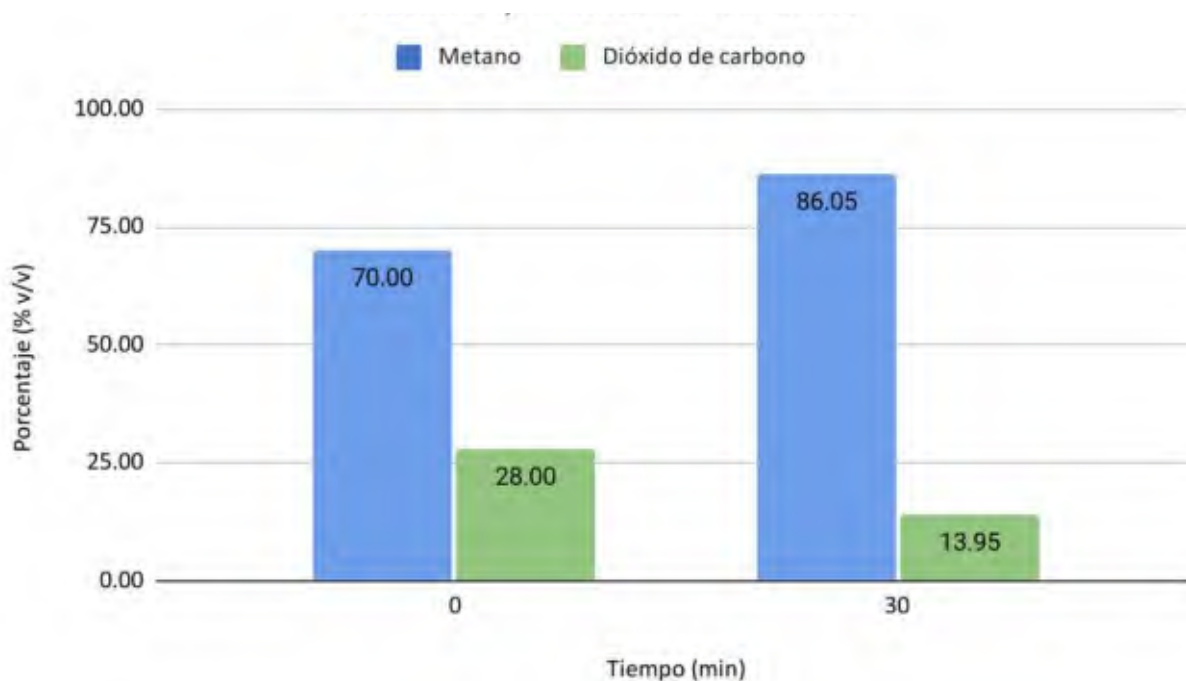


Figura 9.18 Gráfica de biogás (corrida No.3).



9.3.7 Corrida No. 6

En la **Tabla 9.5** se muestran los datos iniciales y finales de la corrida No. 6 columna de absorción con flujo continuo, se suministraron 20 litros de solución de Ca(OH)_2 , con una concentración de 2 g/L, usando empaque, flujo de biogás de 1 L/min y flujo del líquido de 2 L/min.

Tabla 9.5 Condiciones iniciales y finales (Corrida No.6).

Parámetro	Valores iniciales	Valores finales
Tiempo (min)	0	30
Consumo energético (w/hr)	0	31.2
Volumen de solución (Litros)	20	19.3
Temperatura (°C)	23.9	24.3

En la **Figura 9.19** se observa que el pH se mantiene estable durante los 30 minutos de operación, con un pH inicial de 12.18 y finalizando con un pH de 11.73, conservando la alcalinidad de la solución a lo largo de toda la prueba. La alcalinidad del líquido, puede atribuirse al empaque por la mejor distribución de la solución, al generar una mayor área de contacto del gas con el líquido y así mismo a la disminución del gasto del biogás de 1 L/min.

La conductividad eléctrica presenta una disminución de 14.09 a 3.43 mS/cm, sugiriendo la formación del carbonato de calcio a partir de las especies iónicas de calcio

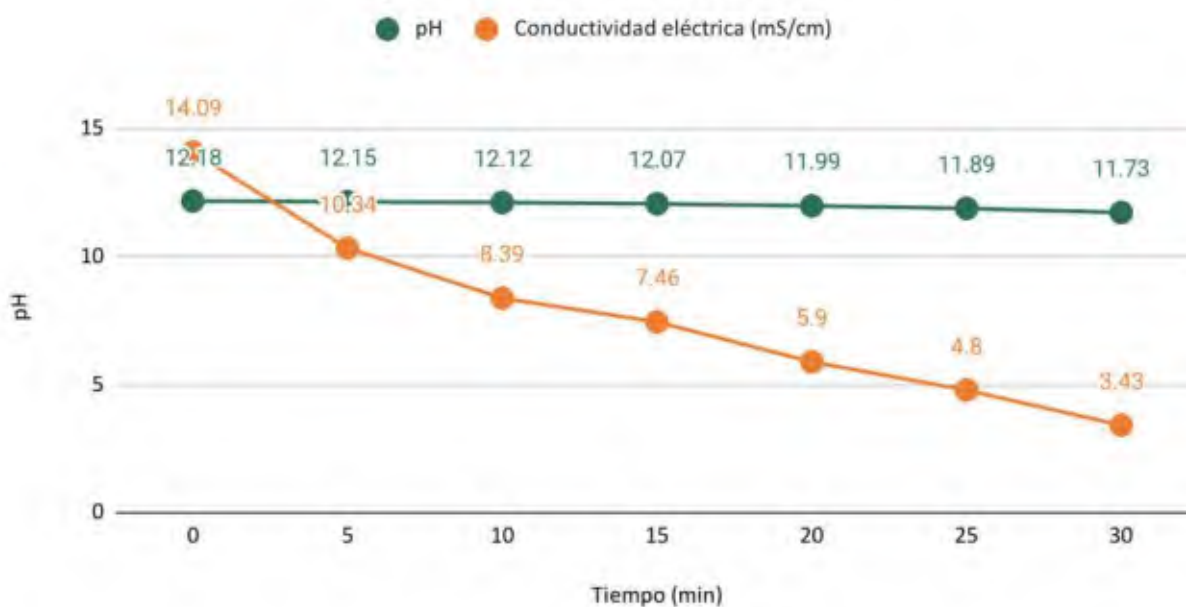


Figura 9.19 Gráfica de pH y CE corrida No.6).

En la gráfica de la **Figura 9.20** se observa las concentraciones de los hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos a lo largo de la corrida No. 6 del diseño de experimentos. La concentración de hidróxidos va disminuyendo con un valor inicial de 1900 mg/L a 100 mg/L a los 30 min de operación, sin embargo a diferencia de las corridas anteriores No 1 y No. 3, no se agotaron en los primeros minutos del experimento.

Los carbonatos mostraron un incremento de hasta 600 mg/L a partir de los 15 minutos, lo que indica la reacción del CO_2 con los iones OH^- disponibles. Por otro lado los bicarbonatos permanecen en cero a lo largo de todo el experimento, concordando con el pH de la **Figura 9.19**, con estos valores se favorece la presencia de bicarbonatos.

Finalmente con estos resultados podemos afirmar que la combinación de los factores de la corrida No. 6 permitió una absorción más estable del CO_2 , evitando la neutralidad del pH.

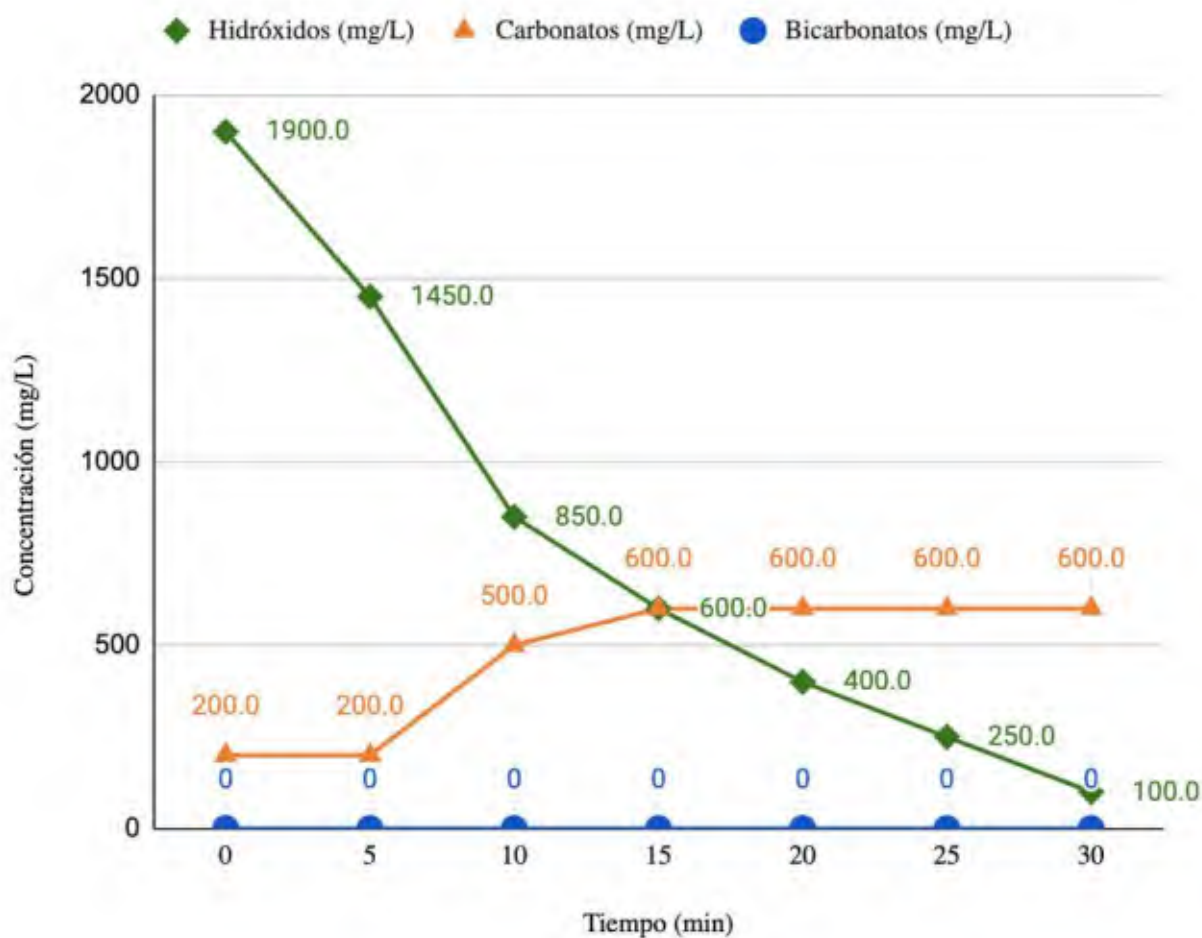


Figura 9.20 Gráfica de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos (corrida No.6).

En la gráfica de la **Figura 9.21** se observó la disminución de la dureza cálcica de 4670 mg/L a inicio de la prueba y llegó hasta 510 mg/L a los 30 min de operación del reactor, indicando una remoción del calcio presente en la solución formando precipitados de carbonato de calcio.

A diferencia de la Corrida 3, no se observa un incremento posterior en la dureza, confirmando que el sistema se mantuvo en condiciones óptimas alcalinas para la purificación del biogás.

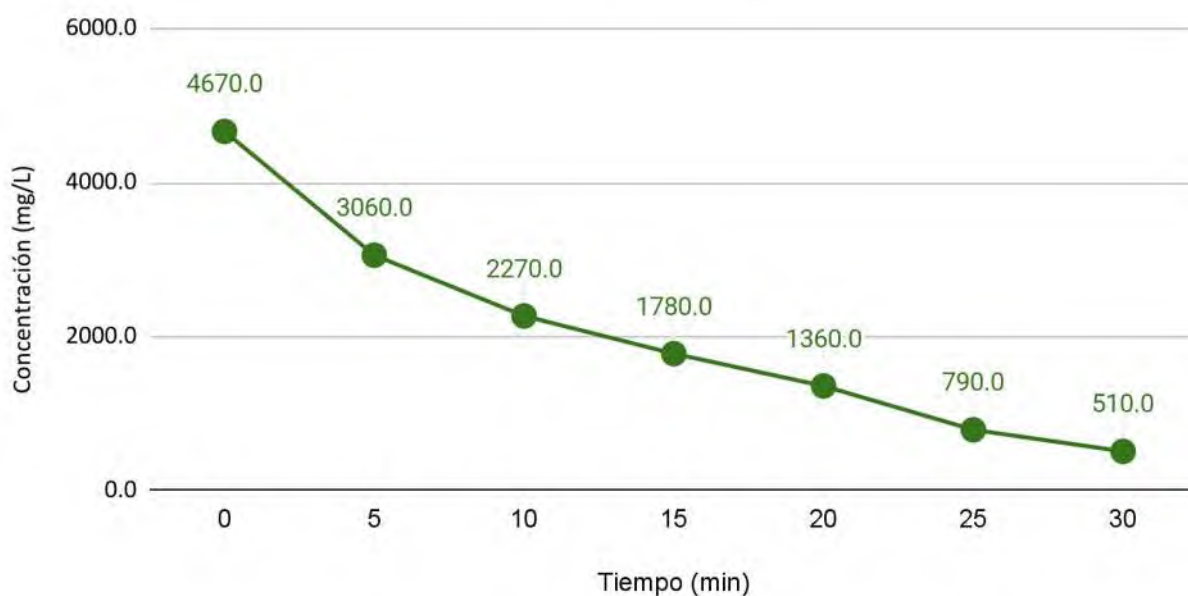


Figura 9.21 Dureza cálcica (corrida No.6).

En la **Figura 9.22** se muestra la concentración de sulfuros y sulfatos a lo largo de la prueba. Durante los primeros 5 minutos se presenta un incremento significativo, alcanzando un valor máximo de 48.5 mg/L y después se mantiene un poco estable, lo cual nos indica la absorción de H_2S atribuyendo esto al empaque y al mayor flujo del líquido con menor flujo del biogás.

En el caso de los sulfatos, existen variaciones a lo largo del tiempo, se atribuye principalmente a 2 factores, el primero la recirculación de la solución de hidróxido y también es importante considerar la interferencia del ion Ca^{2+} , el cual pudo afectar la precisión de las mediciones, por lo tanto los valores reportados de sulfatos deben de interpretarse cautelosamente.

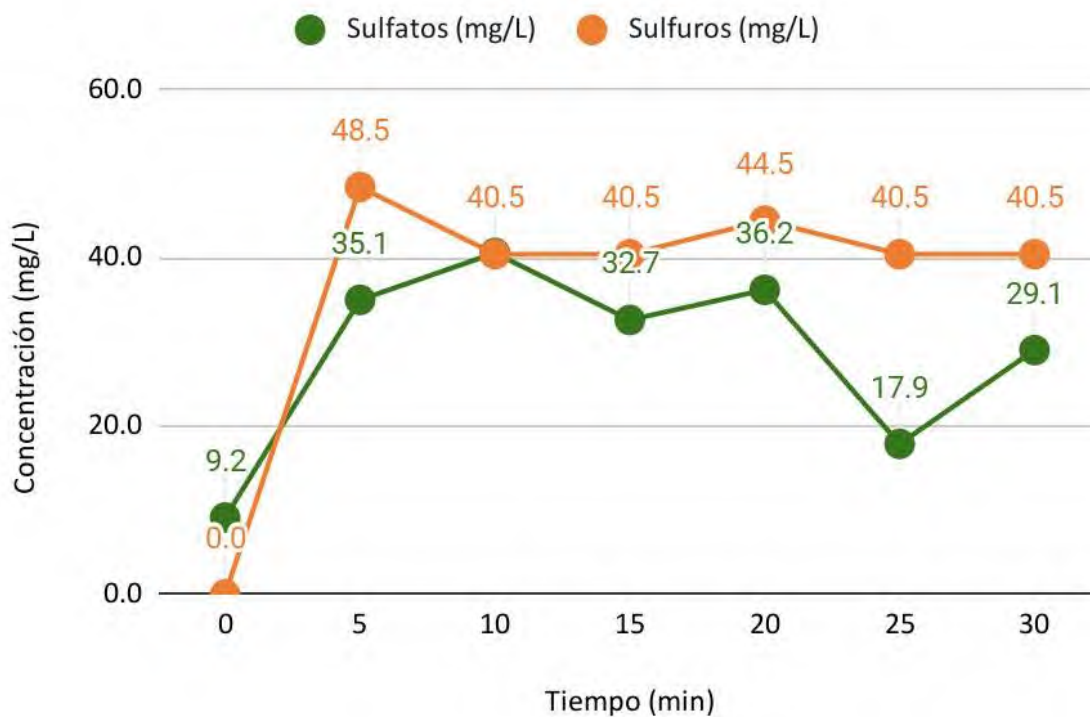


Figura 9.22 Gráfica de sulfatos y sulfuros (corrida No.6).

En la **Figura 9.23** se observa que la composición inicial del biogás era de 70 % v/v de metano y 28 % v/v de dióxido de carbono. Después de 30 minutos de operación, se logró una concentración de 99.95 % v/v de metano 0.05 % v/v de CO₂. Estos resultados demuestran la eficacia de la columna para la purificación del biogás, el pH alcalino favorece a la absorción del CO₂.

Además, se obtuvieron aproximadamente 18 litros de biogás con estas características, lo que confirma la estabilidad del proceso durante el tiempo de operación.

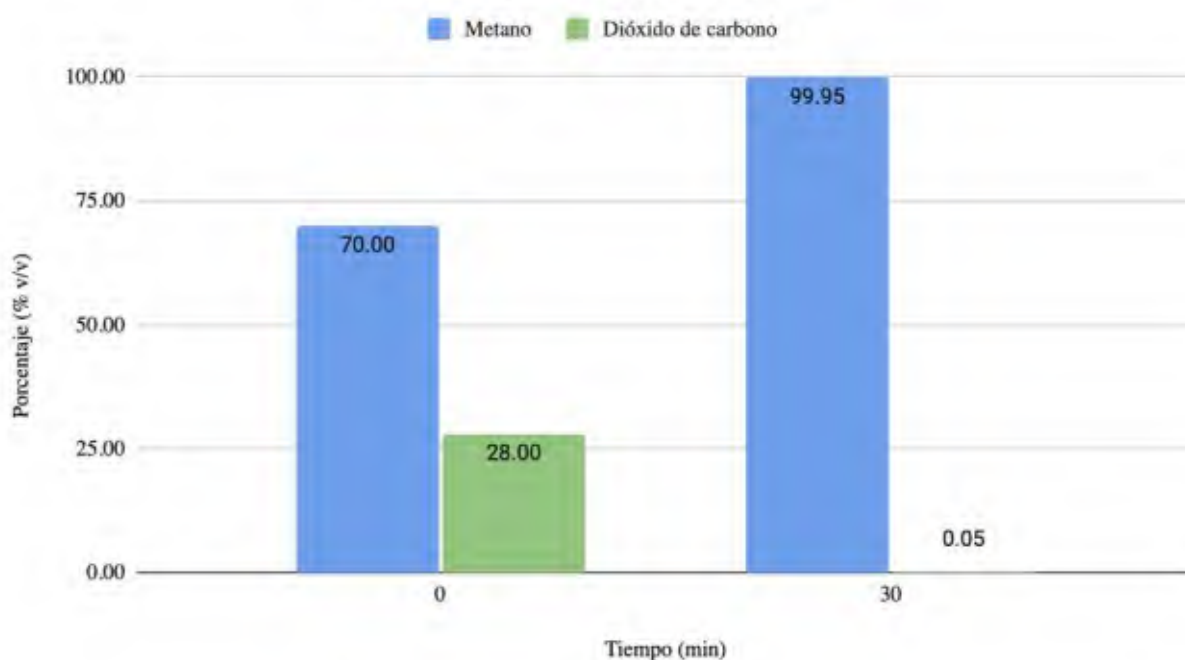


Figura 9.23 Gráfica de biogás (corrida No.6).



9.3.9 Corrida No. 8

En la **Tabla 9.6** se muestran las condiciones iniciales del reactor que se alimentó con 20 L de solución de Ca(OH)_2 en recirculación, con una concentración de CaO de 2 g/L, con empaque, gasto del líquido de 1 L/min y gasto del biogás de 2 L/min

Tabla 9.6 Condiciones iniciales y finales (Corrida No.8)

Parámetro	Valores iniciales	Valores finales
Tiempo (min)	0	30
Consumo energético (w/hr)	0	31.6
Volumen de solución (Litros)	20	19.3
Temperatura (°C)	23	23.5

En la **Figura 9.24** se observa que el pH disminuye significativamente desde un valor inicial de 12.08 hasta 6.77 al final de los 30 minutos de operación. Este comportamiento se debe a diferentes factores principalmente al flujo del gas y del líquido, favoreciendo la formación de bicarbonatos y consumiendo rápidamente la alcalinidad.

Por otro lado, la conductividad eléctrica tiene una disminución importante en los primeros 10 min pasando de 12.08 mS/cm en el minuto cero, y llegando hasta 1.039 mS/cm a los 15 minutos, posteriormente se ve un incremento pequeño, consistente con la gráfica de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos **Figura 9.25**.

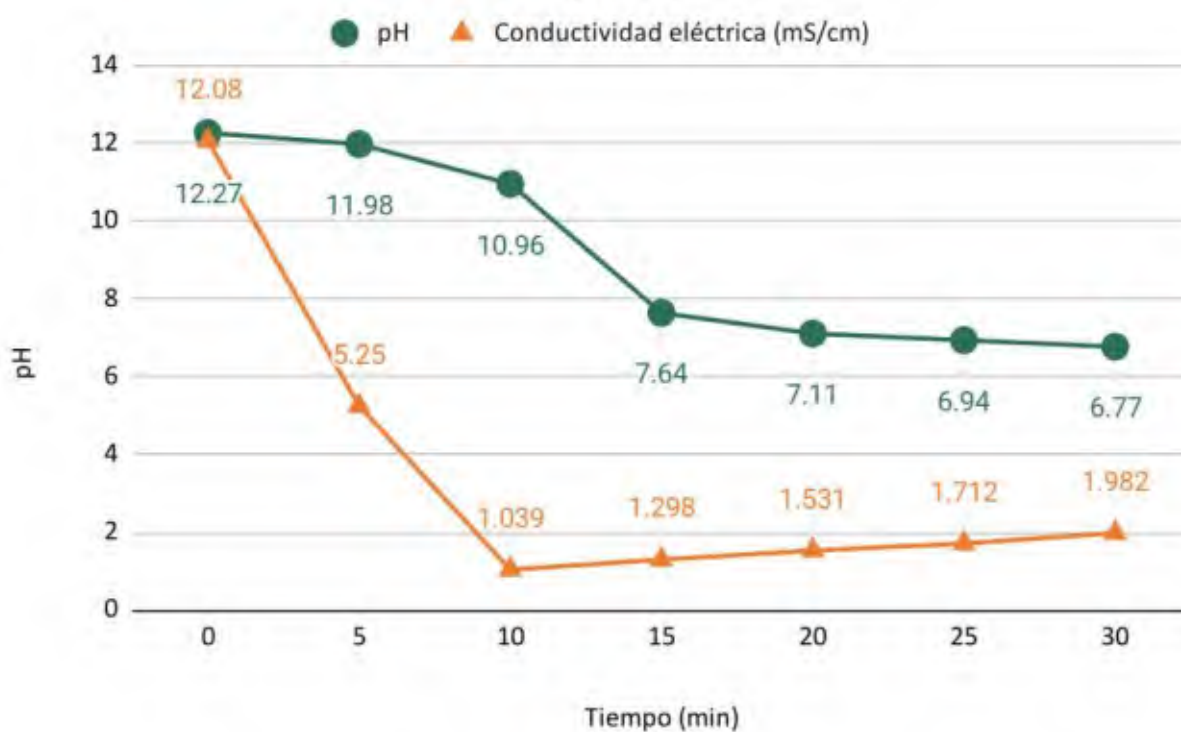


Figura 9.24 Gráfica de pH y CE (corrida No.8).

En la **Figura 9.25** se observa el consumo rápido de los hidróxidos, pasando de los 1400 mg/L inicialmente y llegando a cero en el minuto 10.

Los carbonatos de igual manera se consumen rápidamente pasando a bicarbonatos, concordando con los datos del pH de la **Figura 9.24**, perdiendo la solución su alcalinidad, debido al flujo del biogás.

Por otro lado los bicarbonatos muestran un incremento desde los 10 minutos de operación y llegando hasta 700 mg/L al final de la corrida No.8, consistente con la bajada del pH.

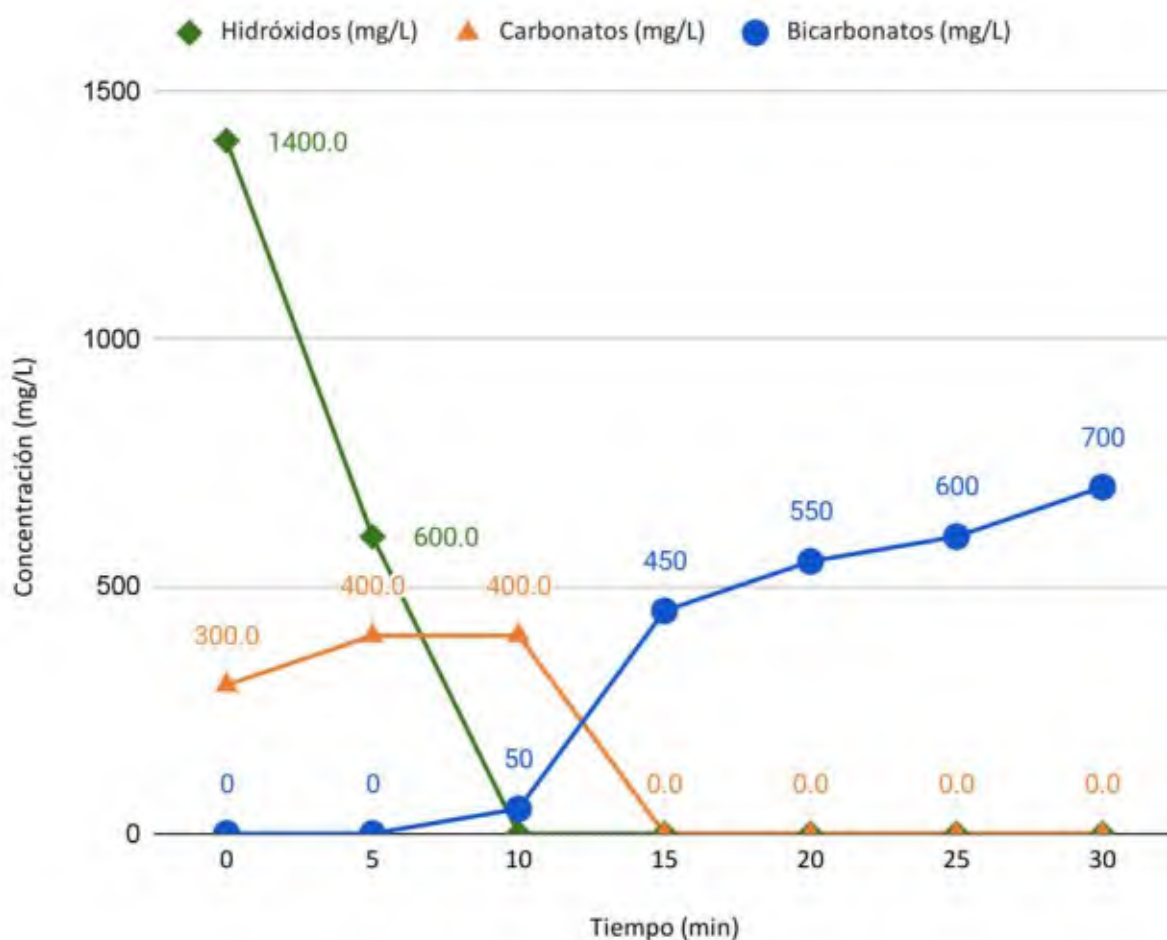


Figura 9.25 Gráfica de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos (corrida No.8).

En la **Figura 9.26** se encuentra la gráfica de dureza cálcica de la corrida No.8, donde se observa la disminución más significativa, en los primero 10 minutos de operación, pasando de 3830 mg/L a 80 mg/L, indicandonos la formación de nuevos compuestos como el carbonato de calcio al reaccionar con el CO_2 . Sin embargo al igual en en las gráficas de dureza cálcica de las Cortinas 1 y 3 donde se consumieron los carbonatos y el pH llegó a neutro o cercano, existe un incremento indicando nuevos compuestos de la posible disolución del CaCO_3 precipitado.

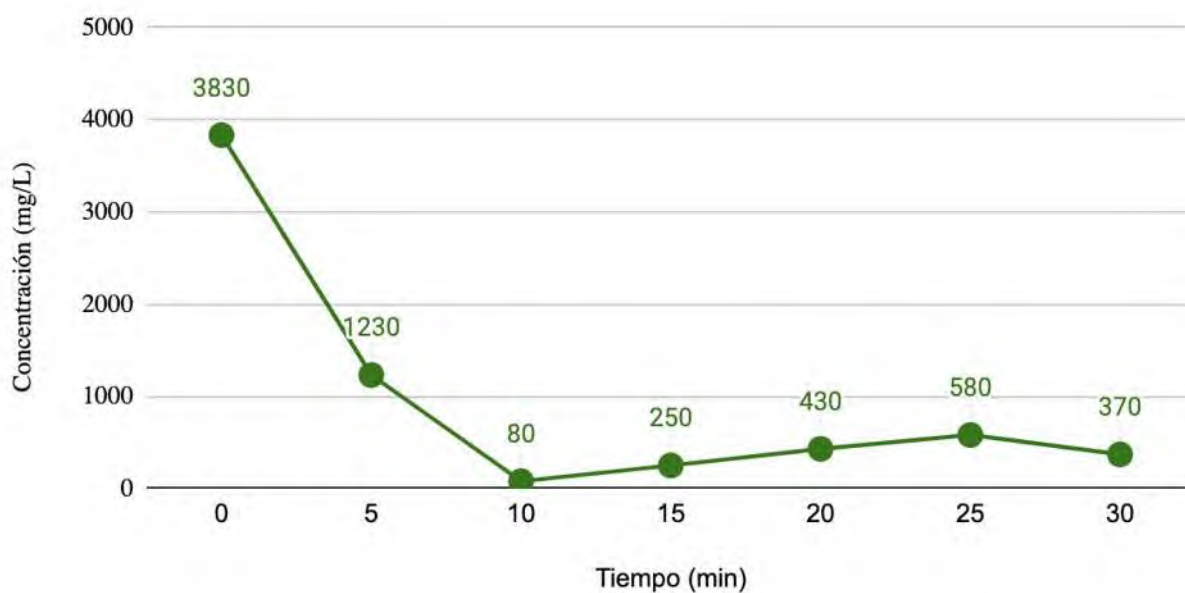


Figura 9.26 Gráfica de dureza cálcica (corrida No.8).

En la **Figura 9.27** se muestra la concentración de sulfuros y sulfatos durante la corrida No. 8. La concentración de sulfuros va en aumento alcanzando valores de entre 40 - 50 mg/L, incrementando lentamente hasta el final del experimento, por lo cual podemos decir que extinción una absorción continua del H_2S

Los sulfatos presentan un incremento inicial significativo hasta llegar a un máximo de 80.1 mg/L seguido de otra caída este comportamiento puede estar relacionado con con la recirculación interferencias de iones disueltos en la solución (Ca^{2+}), por ello, los valores obtenidos deben interpretarse con cautela.

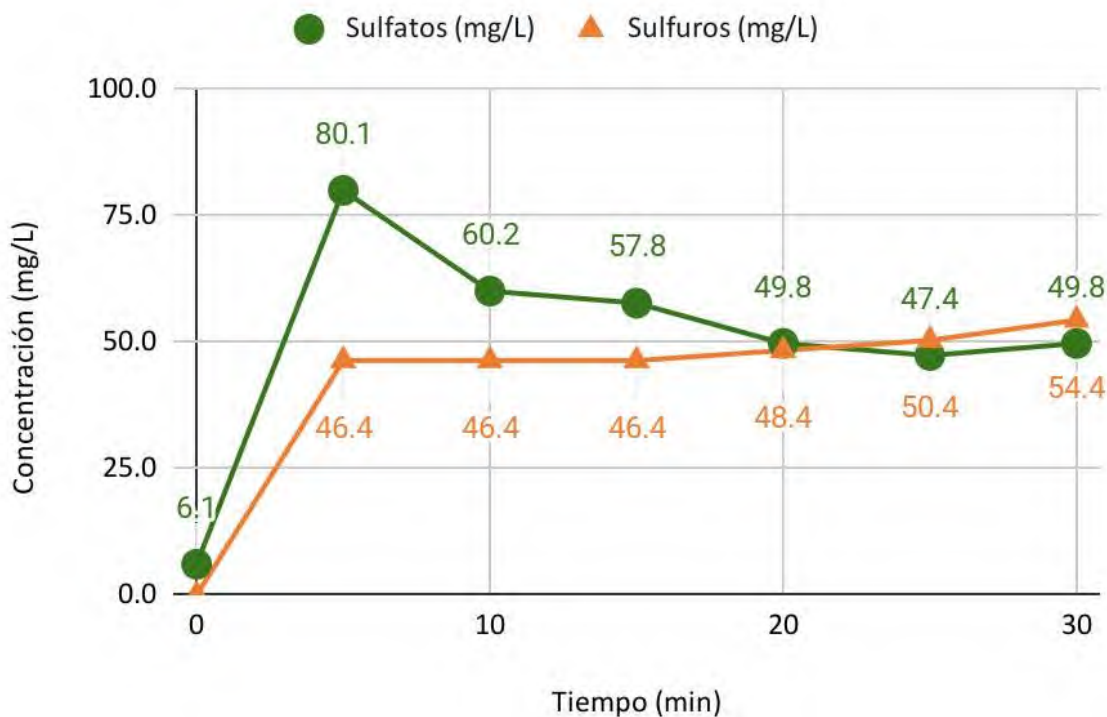


Figura 9.27 Gráfica de sulfatos (corrida No.8).

En la **Figura 9.28** se observa que la composición inicial del biogás es de 70 % v/v de metano y 28 % v/v de dióxido de carbono. Al transcurrir los 30 minutos de operación la concentración de metano aumentó hasta 94.38 % v/v, y el CO₂ disminuyó a 5.63% v/v. Estos resultados confirman que se logró una remoción significativa de dióxido de carbono, además de obtener 35 litros de biogás con estas características.

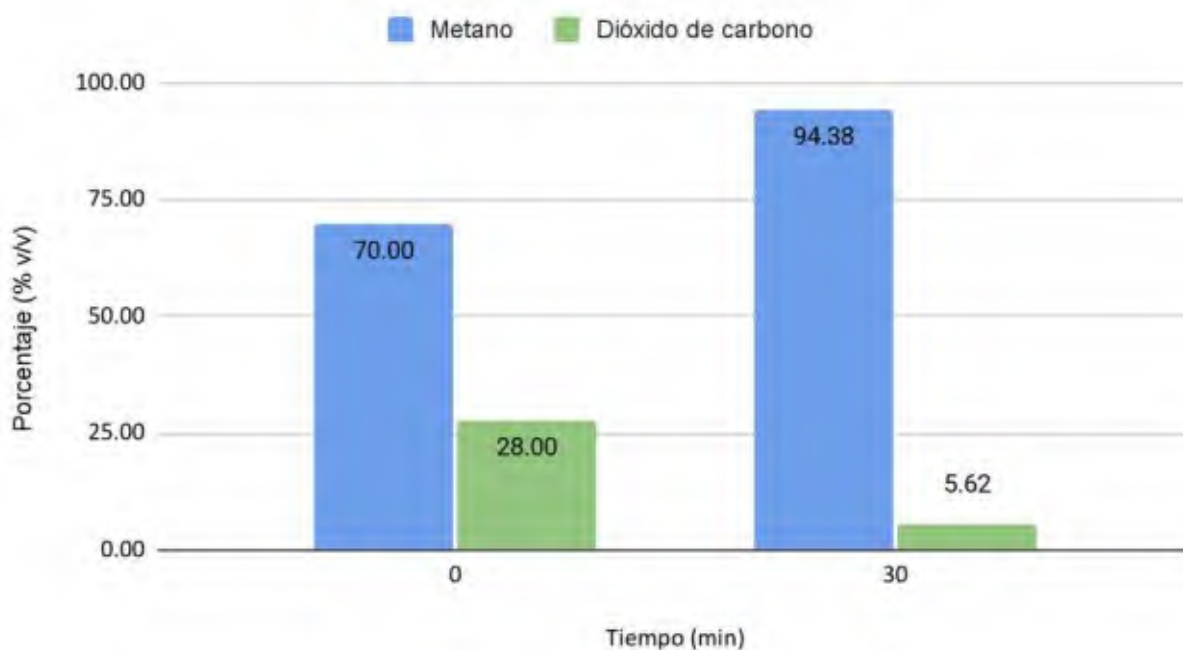


Figura 9.28 Gráfica de biogás (corrida No.8).

9.3.10 Composición del biogás purificado en función de las corridas del diseño experimental

En la **Figura 9.9** es el conjunto de resultados obtenidos de cada una de las pruebas del diseño de experimentos, con los porcentajes de CH_4 y de CO_2 y en todas las corrida los valores de metano fueron de entre 86.05 % v/v y el 99. indicando una buena eficiencia en el proceso de purificación.

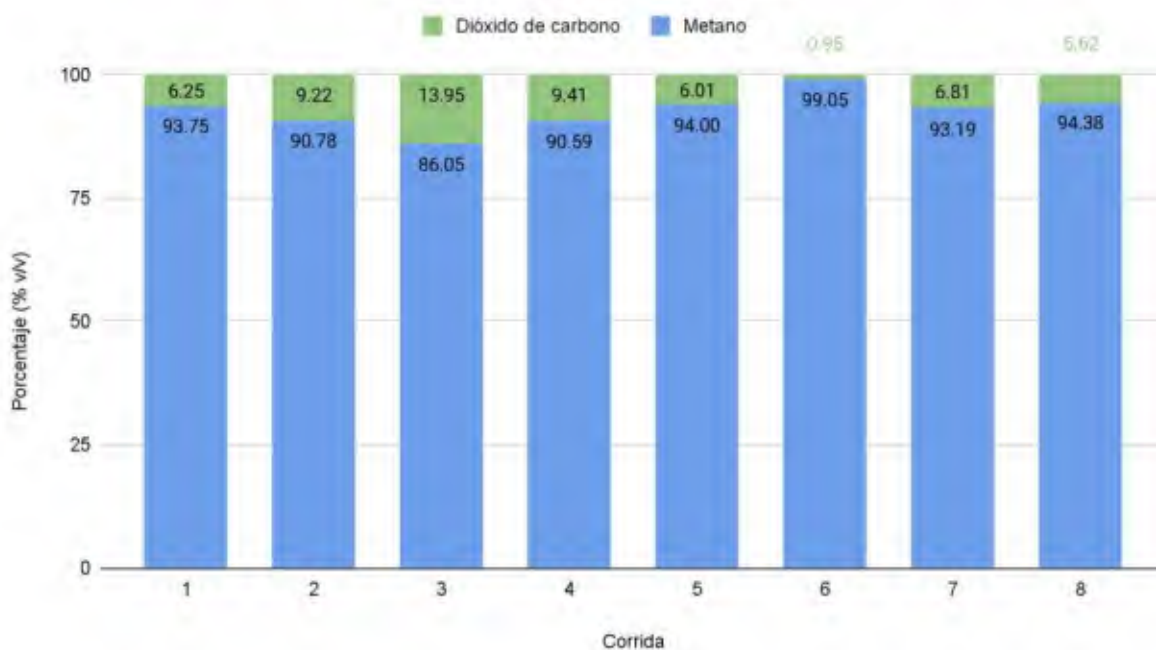


Figura 9.29 Gráfica de biogás purificado de cada corrida.



10 CONCLUSIONES

Se evaluó la eficiencia de una solución de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ aplicada en columna de absorción de lecho empacado para la remoción de ácido sulfhídrico (H_2S) y dióxido de carbono (CO_2) del biogás. Los resultados demostraron que es altamente viable, logrando concentraciones de metano del orden 99.95% v/v, en condiciones específicas, con esto logramos afirmar que la columna con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tiene la capacidad de purificar el biogás.

Así mismo se diseñó, construyó e instaló la columna de absorción, teniendo en cuenta las características de la solución y el biogás, por lo cual se utilizó como material PVC, con esto se evitó la corrosión causada por H_2S , y al finalizar las pruebas no se observó ningún deterioro en la columna, también se puede afirmar que la columna permitió un contacto adecuado entre la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el biogás, permitiendo así las remociones reportadas en este documento.

Mediante las corridas experimentales de la No.1 a la No.8, se identificó que los porcentajes de remoción de H_2S y CO_2 en todas las corridas fue existente, confirmándolo porque se obtuvo un aumento significativo del porcentaje de metano.

Los parámetros operativos en los cuales se identificó la mayor purificación fueron los correspondientes a la corrida No.6, con empaque, concentración de CaO de 2 g/L, caudal de gas de 1 L/min y gasto del líquido de 2 L/min.

Se evaluó el desempeño de la columna de absorción con flujo contracorriente, y régimen continuo, con los resultados obtenidos se confirma que el uso de soluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ representa opción eficaz, de fácil operación, y altas remociones. por lo cual tiene un gran potencial para la aplicación a pequeña escala, típica de comunidades rurales



11 RECOMENDACIONES

Aprovechar la ventaja de la recirculación: una de las características importantes del proyecto, fue la implementación de la recirculación de la solución $\text{Ca}(\text{OH})_2$, este diseño puede mantenerse y mejorar ya que se demostró que se sigue el proceso de purificación.

Considerar el escalado y automatización: Con este diseño podemos considerar la implementación de una planta piloto, para esto se recomienda automatizar el sistema de alimentación y monitoreo.

Analizar el residuo líquido y los sólidos generados: después de las reacciones químicas llevadas a cabo en el proceso, es importante caracterizar los sólidos generados, aprovecharlos o si es necesario evitar la contaminación y evitar riesgos ambientales

Repetir pruebas afectadas por interferencias químicas: en las pruebas de determinación de resultados se menciona que se afectaron por el ion calcio, por lo cual sería importante estudiar este acontecimiento y realizar nuevas pruebas implementado un sistema que permita corregir la interferencia.

Estudiar la regeneración del absorbente: de este proyecto proviene otra línea de investigación, el cual es sobre el absorbente existe la posibilidad de regenerarlo, reduciendo con esto los costos y los residuos.

Aplicar el sistema a biogás real: es recomendable realizar pruebas con una biogás real, generado por la digestión anaerobia, como las que ya se cuentan en el laboratorio de ambiental de la facultad de ingeniería química.



REFERENCIAS

Amoore, J. E., & Hautala, E. (1983). Odor as an aid to chemical safety: Odor thresholds compared with threshold limit values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution. *Journal of Applied Toxicology*, 3(6), 272-290.

Angelidaki, I., Treu, L., Campanaro, S., Kougias, P. G., & Tsapekos, P. (2018). Biogas upgrading technologies: State-of-the-art review. *Bioresource Technology*, 264, 177–188.

Aryal, N., Ottosen, L. D. M., Pant, D., & Kofoed, M. V. W. (Eds.). (2021). Emerging technologies and biological systems for biogas upgrading. Elsevier.

Baena-Moreno, F. M., Rodríguez-Galán, M., Vega, F., Vilches, L. F., Alonso-Fariñas, B., & Navarrete, B. (2019). Biogas upgrading by carbon dioxide separation: Past, present and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 173-184.

Bak, C., Lim, C.-J., Kim, Y.-D., & Kim, W.-S. (2019). Multi-stage adsorptive purification process for improving desulfurization performance of biogas. *Separation and Purification Technology*, 227, 115703.

Baredar, P., Kumar, A., & Sarviya, R. M. (2020). Status and global perspectives of biogas production: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40.

Bauer, Fredric & Hulteberg, Christian & Persson, Tobias & Tamm, Daniel. (2013). Biogas upgrading – Review of commercial technologies. Svenskt Gastekniskt Center AB, SGC

Bond, T., y Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 347-354.

Campuzano Calderón, O. (2017). Estudio de la remoción de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono presentes en el biogás, por medio de un reactor de columna de burbujeo operado a baja presión [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].

Chattopadhyay, D.K. and Raju, K.V.S.N. (2007) Chattopadhyay, P. (2007). Unit Operations of Chemical Engineering (2.^a ed., Vol. 1). Khanna Publishers.



Damara, D. Y., & Dermawan, M. D. (2020). Biogas as co-firing fuel in steam and gas power plant for a clean and sustainable energy. En 2020 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP) (pp. 38–43).

Dehaini, J., Santos, J. P., e Izidoro, J. C. (2022). Biogas production from anaerobic digestion: A review of the process and its potential in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 304, 114251.

Erdmann, E., Ale Ruiz, L., Martínez, J., Gutiérrez, J. P., & Tarifa, E. (2012). Endulzamiento de gas natural con aminas: simulación del proceso y análisis de sensibilidad paramétrico. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3(4), 89–101.

FAO. (1996). Biogas technology: A training manual for extension. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2011). Manual de biogás: Producción y aprovechamiento. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2013). Manual de biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Fischer, K., Chen, J., Petri, M., & Gmehling, J. (2002). Solubility of H₂S and CO₂ in N-Octyl-2- pyrrolidone and of H₂S in methanol and benzene. *AIChE Journal*, 887-893

Hedges, M. R., & Johnson, P. A. (2002). Solubility and physicochemical properties of calcium hydroxide in aqueous solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 47(4), 890-895.

Hilbert, J. A. (2011). Producción y aprovechamiento de biogás en establecimientos agropecuarios (Manual para la producción de biogás). Instituto de Ingeniería Rural – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

International Energy Agency [IEA]. (2023). World Energy Outlook 2023. IEA Publications.

Islas, J., y Martínez, H. (2010). Las energías renovables en México: Perspectivas de un futuro prospectivo. *Revista Mexicana de Física*, 56(2), 1-10.

King, J. C. (2021). Procesos de separación (edición digital). McGraw-Hill Education.

Khanal, S. K. (2008). Anaerobic biotechnology for bioenergy production: Principles and applications. John Wiley & Sons.



- Kusrini, E., Widiarto, A., Casson, A., y Kartohardjono, S. (2019).** Fixed-bed column adsorption of carbon dioxide and hydrogen sulfide from biogas. *International Journal of Technology*, 10(6), 1184-1193.
- Lurgi. (2010).** The Rectisol process: Technology for purification and conditioning of synthesis gas. Lurgi GmbH, Frankfurt.
- Leonzio, G. (2016).** Upgrading of biogas to bio-methane with chemical absorption process: Simulation and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 131, 364-375.
- López, P. J. (2011).** Tratamiento con solventes para el proceso de endulzamiento de gas natural. Veracruzana: Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas.
- Pacheco Quiroz, M. A. (2016).** Estudio de la viabilidad técnica y económica de tecnologías seleccionadas para la etapa de purificación en una planta de producción de biogás [Proyecto de grado, Universidad de los Andes]
- Perry, R. H., & Green, D. W. (Eds.). (2008).** *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Ribeiro, C. I., & Ahlgren, O. (2021).** Un océano en el laboratorio escolar: dióxido de carbono en el mar. *Science in School* (55).
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017).** Potencial energético de los residuos orgánicos en México. SAGARPA.
- Treybal, R. E. (2001).** Operaciones de transferencia de masa (2.^a ed.). McGraw-Hill.
- U.S. Energy Information Administration [EIA]. (2024).** Natural gas prices. U.S. Department of Energy
- Varnero, M. T., Espíndola, P., & Stehr, C. (2014).** Manejo y aprovechamiento de biogás a partir de residuos agropecuarios. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chile.
- Wellinger, A., Murphy, J., & Baxter, D. (2013).** The biogas handbook: Science, production and applications. Woodhead Publishing.



ANEXOS

Anexo A

$$P_{\text{morelia}} = 0.993 \text{ atm}$$

$$PM_{\text{biogás}} = 24.2 \text{ g/mol}$$

$$L_{(\text{CaOH})_2} = 3.3 \text{ L/min}$$

$$G_{\text{biogás}} = 1.7 \text{ L/s}$$

Calculando el flujo másico del Ca(OH)_2 absorbente

$$L_{(\text{CaOH})_2} = 3.3 \text{ l/min} \left(\frac{1.0015 \text{ kg/L}}{70 \text{ seg}} \right) = 0.0556 \text{ kg/s}$$

ahora calculamos el flujo molar usando la ley de gas ideal, teniendo:

$$n_{\text{gas}} = \frac{PV}{RT} = \frac{(0.993 \text{ atm})(1.67 \text{ L/seg})}{(0.08215)(298 \text{ K})} = 0.06774 \text{ mol/seg}$$

ahora la masa se obtiene con:

$$m_{\text{gas}} = n \cdot PM_{\text{biogás}} = 0.0016393$$

suponiendo que se absorbe todo el CO_2 y el H_2S en la solución de Ca(OH)_2

$$m_{\text{CO}_2} = n \cdot PM_{\text{CO}_2} = 0.28(0.06774 \text{ mol/seg})(44 \text{ gr/mol}) = 0.8346 \text{ gr/seg}$$

$$m_{\text{H}_2\text{S}} = n \cdot PM_{\text{H}_2\text{S}} (0.02)(0.06774 \text{ mol/seg})(34.06 \text{ gr/mol}) = 0.0461 \text{ gr/seg}$$

por tanto:

$$L_{\text{desecho}} = L_{\text{biogas}} + m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{S}} = 0.05648 \text{ kg/seg}$$

para utilizar la gráfica de Eckert

$$\rho_{\text{gas}} = \frac{m_{\text{gas}}}{V_{\text{gas}}} = \frac{0.0016393 \text{ kg/seg}}{1.67 \text{ L/seg}} = 0.0009816 \text{ kg/L} = 0.9816 \text{ kg/m}^3$$

se sabe que la densidad del $(\text{CaOH})_2$ a 25°C es de 1.0015 kg/L ; de tal forma según la abscisa de



la gráfica de Eckert:

$$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{liq} - \rho_{gas}} \right)^{1/2} = \frac{0.005648}{0.0016393} \left(\frac{0.9816}{1001.5 - 0.9816} \right)^{1/2} = 1.079$$

con la abscisa y usando la gráfica de Eckert la cual se encuentra en el Anexo 2 de este documento y suponiendo una caída de presión de 600 pa/m, obtenemos la ordenada de 0.02

C_f para anillos rashing de 1/4" de PVC es de 1600 J y gc para el sistema internacional es de 1 por lo tanto:

$$G' = \sqrt{\frac{0.02(\rho_{liq} - \rho_{gas})gc}{C_f M 0.1 J}} = 0.1561 \text{ kg/m}^2\text{seg}$$

Así que el área de la columna se calcula:

$$A = \frac{G}{G'} = \frac{0.0016393}{0.1561} = 0.0105 \text{ m}^2$$

diámetro = 11.56 cm

Por lo tanto se elige una columna de absorción con un diámetro de 30% más como factor de seguridad.

$$D = 11.56(1.3) = 15.028 \text{ cm}$$

así que se opta por un diámetro de columna de 15 cm de diámetro comercial.

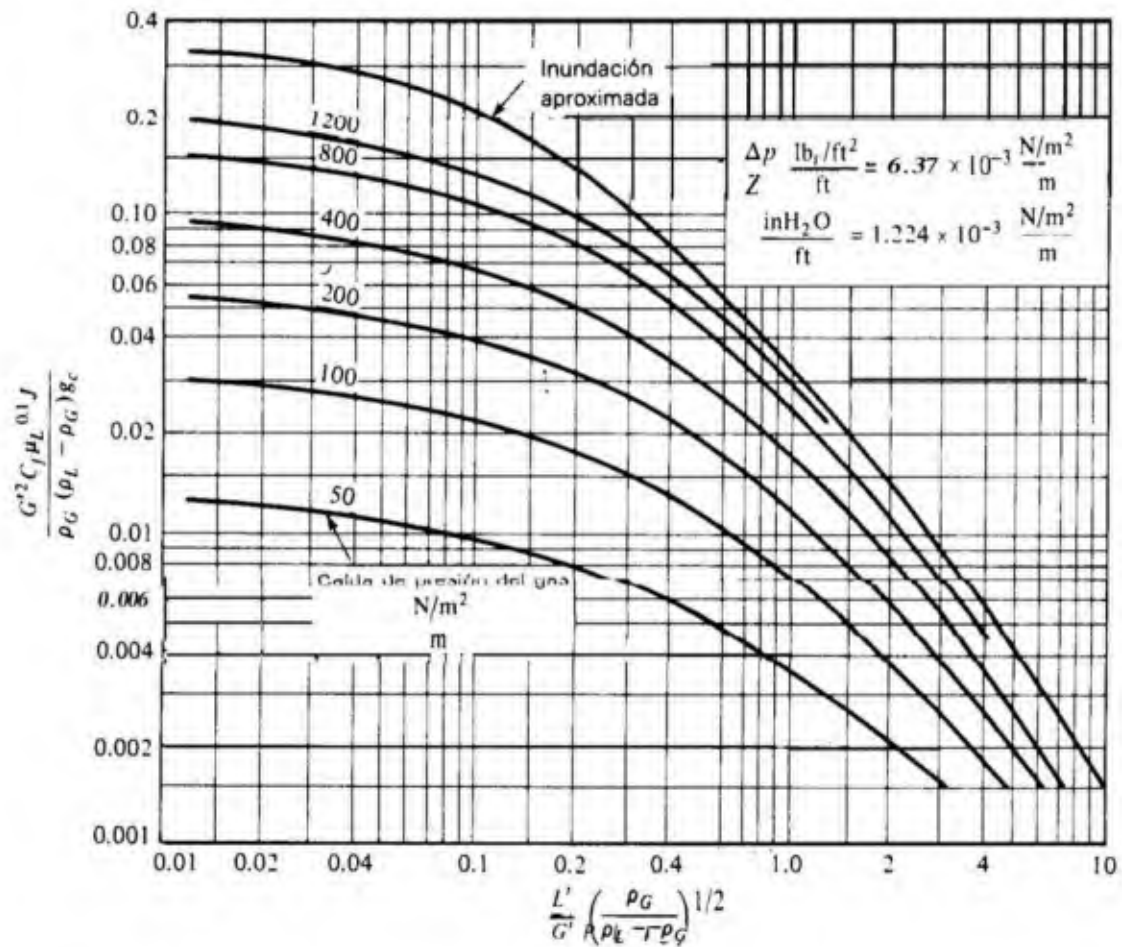


Figura A1 Tomada de Operaciones de Transferencia de Masa, Treybal, 2a edición. página 224.

Anexo B

CÁLCULO DE LA ALTURA DEL EMPAQUE (O DE LA COLUMNA)

con el diámetro propuesto se calcula la nueva área de la columna, $D = 0.15 \text{ m}$

$$S = A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.15)^2}{4} = 0.01767 \text{ m}^2$$

Por tanto se usará $Z = \int_0^Z dz = \int_{y_2}^{y_1} \frac{\frac{G}{S} (y_2)_m dy}{K_y a (y - y_i)(1 - y)}$

para obtener la altura del lecho empacado del sistema.

Para determinar la línea de operación usamos la Ley de Henry $y = \frac{HX}{P}$, así que del Perry obtenemos que H_{CO_2} a $25^\circ \text{C} = 1640 \text{ atm/fracc. molar}$ y para $H_{\text{H}_2\text{S}}$ a $25^\circ \text{C} = 54500 \text{ atm/fracc. molar}$, de forma tal que obtenemos una media ponderada y es

$$H = \frac{0.28}{0.3} (1640) + \frac{0.02}{0.3} (54500) = 1530.67 + 3633.33$$

$$H = 5164 \text{ atm/fracc. molar}$$

$$\therefore Y = \frac{yP}{H} = \frac{0.9934}{5164} = 0.0001923 Y$$

Determinemos con esta ley la línea de operación

y	x	$Y \left(\frac{y}{1-y} \right)$	$X \left(\frac{x}{1-x} \right)$
0.05	0.000009615	0.052632	0.000009615
0.10	0.00001923	0.1111111	0.00001923
0.15	0.00002885	0.176471	0.00002885
0.20	0.00003846	0.25	0.00003846
0.25	0.00004808	0.333333	0.00004808
0.30	0.00005769	0.428571	0.00005769

Figura B1 Cálculo de la altura del empaque

Ahora para calcular el flujo G , como ya tenemos los datos de la línea de operación.

$$G = \frac{G_B}{1-y} = \frac{0.0000974 \text{ kg-mol/seg}}{1-0.05} = 0.000102131$$

con $y=0.05$
que es la salida
del biogas tratado

$$G = \frac{0.0000974}{1-0.3} = 0.000139111$$

Entrada de biogas
con 28% CO_2 y 2% H_2S

Con estos valores calculados para las diferentes concentraciones de y y el área calculamos G/s en $\text{kg-mol/m}^2\text{seg}$ y multiplicando por el (peso) o masa molecular promedio obtenemos el flujo másico. Téngase en cuenta que el peso molecular cambia durante su trayecto por la columna.

Así que los valores de G/s en $\text{kg/m}^2\text{seg}$ se representan en la tabla de excel anexa.

Consideramos, ahora la densidad del gas (biogas) a la entrada es de 0.9816 kg/m^3 y como la variación es despreciable durante su trayecto por la columna se considera constante.

Ahora, para calcular la altura en función de la fase gas usamos el modelo propuesto por Geankoplis (4ª edición, pag. 701) que es:

$$H_g = \left(\frac{0.226}{f_p} \right) \left(\frac{G_c}{0.660} \right)^{0.5} \left(\frac{G_x}{0.6782} \right)^{-0.5} \left(\frac{G_y}{0.678} \right)^{0.35}$$

Donde G_x y G_y representan L y G en flux másicos, y f_p se obtiene de la tabla 10.6-3 de Geankoplis, el cual nos da un valor de 1.27.

Continuamos calculando el número de Schmidt con la ecuación: $Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$ y para ello calculamos el coeficiente de difusividad $D_{A,B}$ con la ecuación de Wilke-Chang:

Figura B2 Cálculo de la altura del flujo del gas

$$D_{CO_2, H_2S-CH_4} = \frac{1 \times 10^{-7} T^{1.75} \sqrt{\frac{1}{MM_{CO_2}} + \frac{1}{MM_{H_2S}} + \frac{1}{MM_{CH_4}}}}{P(\sqrt[3]{41.1} + \sqrt[3]{20.1})^2}$$

$$D_{CO_2, H_2S-CH_4} = \frac{1 \times 10^{-7} (298)^{1.75} \sqrt{\frac{1}{44} + \frac{1}{34} + \frac{1}{16}}}{0.993} = \frac{0.0007237}{37.8018}$$

$$D_{CO_2, H_2S-CH_4} = 1.9144 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$$

$$Sc = \frac{0.000197}{1001.5(1.9144 \times 10^{-5})} = 1.0275 \times 10^{-3}$$

Ahora, consideramos Sc constante a través de toda la ~~zona~~ columna de absorción, y con este podemos calcular H_g . Véase tabla Excel.

Entonces podemos calcular $Ky'a$ con

$$Ky'a = \frac{G/s}{H_g} = \frac{0.004035386}{0.003118} = 1.2942$$

Ahora con la línea de operación calculamos y_i y_B $(y_B)_{ml}$ a Trapecios
Véase tabla de Excel anexa

En el caso de a , lo calculamos con

$$a = \frac{G/s (y_B)_{ml}}{Ky'a (1-y)(y-y_i)}$$

Y mediante el método de los Trapecios calculamos el total de la altura del empaque mojado, por tanto

Altura de empaque = 0.3029 m = 30.29 cm.,
así que si tomamos un 30 % de factor de protección:

Altura del empaque = 1.3 (30.29 cm) = 39.38 cm.

Figura B3 Resultados de la altura del empaque

Diana Laura Moreno Morales

LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS MEDIANTE UNA COLUMNA DE ABSORCIÓN EN RÉGIMEN CONTINUO CON HIDRÓXIDO D...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:570375983

Fecha de entrega

23 mar 2026, 11:43 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

23 mar 2026, 12:01 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS MEDIANTE UNA COLUMNA DE ABSORCIÓN EN RÉGIMEN CONTINU....pdf

Tamaño del archivo

30.0 MB

109 páginas

16.395 palabras

80.039 caracteres

23% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 23%  Fuentes de Internet
- 7%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión



Texto oculto

64 caracteres sospechosos en N.º de páginas

El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en ciencias en ingeniería ambiental.	
Título del trabajo	LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS MEDIANTE UNA COLUMNA DE ABSORCIÓN EN RÉGIMEN CONTINUO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Diana Laura Moreno Morales	1436679e@umich.mx
Director	José Apolinar Cortes	jose.apolinar@umich.mx
Codirector	Omar Campuzano Calderón	omarc@tec.mx
Coordinador del programa	Salomón Ramiro Vázquez García	mae.cs.ingenieria.ambiental@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	si	apoyo en estructura de ideas
Traducción al español	si	textos para mejor interpretación
Traducción a otra lengua	no	N/A
Revisión y corrección de estilo	si	corrección de sintaxis, y formalizar lenguaje

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Análisis de datos	no	N/A
Búsqueda y organización de información	no	N/A
Formateo de las referencias bibliográficas	si	Ajuste de citas, de acuerdo con apa
Generación de contenido multimedia	no	N/A
Otro	no	N/A

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Diana Laura Moreno Morales
Lugar y fecha	Morelia Michoacán, 20 de marzo del 2026