

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE BIOGÁS POR
ABSORCIÓN CON AGUA Y *PRESSURE SWING ADSORPTION* (PSA)**

**LAURA CAROLINA ARDILA PÉREZ
ANGGIE MARCELA REVUELTA SANJUAN**

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

2019

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE BIOGÁS POR
ABSORCIÓN CON AGUA Y *PRESSURE SWING ADSORPTION* (PSA)**

**LAURA CAROLINA ARDILA PÉREZ
ANGGIE MARCELA REVUELTA SANJUAN**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
INGENIERA QUÍMICA**

**DIRECTOR
Prof. CARLOS EDUARDO GARCÍA SÁNCHEZ
Ingeniero Químico, Ph.D.**

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

2019

A Dios por darme la fortaleza y paciencia para llevar a cabo este proyecto y afrontar todas las dificultades que se presentaron en el camino y a lo largo de mi carrera.

A mi mamá Idanis Pérez, a mis dos tías Belky Pérez y Martha Pérez por ser ese apoyo incondicional durante toda mi formación profesional

A mi novio Jeferson Torrado por apoyarme y aconsejarme durante el proceso de este proyecto y de la carrera.

A mi compañera de tesis y amiga Angie Revuelta por su dedicación y entrega en este proyecto.

A mi mascota Nico José por darme todo su amor.

A mis amigos y colegas Daniela Trejos, María José Capdevilla, Jonny Ching y Luis Restrepo.

Laura Carolina Ardila Pérez

A Dios, por ser mi guía y darme a diario los motivos suficientes para seguir adelante.

A mis padres y familia, por estar conmigo en todo momento, brindándome el apoyo y la oportunidad de estar cumpliendo uno de mis mayores logros, ser profesional.

A mi novio y compañero fiel, por estar siempre a mi lado, dándome los mejores consejos, guiándome en cada etapa de este proceso y brindándome todo su amor.

A mi peludo y mejor amigo Buddy, porque aún sin poder hablar, me regaló la felicidad y compañía en los mejores y no tan buenos momentos.

A mi compañera y amiga Laura Ardila por ser una pieza fundamental en este proceso.

Y a todos mis compañeros de estudio y de batalla que siempre estuvieron a mi lado para guiarme e impulsarme a terminar con éxito esta etapa de mi vida.

Anggie Marcela Revuelta Sanjuan

AGRADECIMIENTO

A la **Universidad Industrial de Santander**, nuestra alma máter, por contribuir con nuestra formación integral.

Al profesor **Carlos Eduardo García Sánchez**, por su apoyo y compromiso en el desarrollo de este proyecto.

Al **Grupo de Investigación en Fluidos y Energía (GIFE)** del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas por el apoyo brindado en el transcurso del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS.....	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2. METODOLOGÍA	23
2.1 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.....	23
2.1.1 Diseño del proceso absorción con agua.....	24
2.1.2 Diseño de <i>Pressure Swing Adsorption</i> (PSA).....	24
2.2 SIMULACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE SEPARACIÓN POR ASPEN HYSYS® Y ASPEN ADSORPTION®	24
2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	24
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	26
3.1 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.....	26
3.1.1 Diseño del proceso absorción con agua.....	27
3.1.2 Diseño de <i>Pressure Swing Adsorption</i> (PSA).....	33
3.2 SIMULACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE SEPARACIÓN POR ASPEN HYSYS® Y ASPEN ADSORPTION®	39
3.2.1 Simulación en Aspen Hysys®	39
3.2.2 Simulación en Aspen Adsorption®	41
3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO	46
4. CONCLUSIONES	48
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXOS	55

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composiciones del biogás según el tipo de biomasa.	26
Tabla 2. Origen de la biomasa y producción de biogás en Santander.....	27
Tabla 3. Diseño altura y diámetro de las columnas de absorción según el tipo de biomasa.	32
Tabla 4. Condiciones de operación PSA.	33
Tabla 5. Parámetros para la isoterma Langmuir-Freunlich.	37
Tabla 6. Porcentaje de purificación de metano con el proceso absorción con agua.	41
Tabla 7. Tiempo de duración de cada etapa en la simulación.	43
Tabla 8. Porcentaje de purificación de metano con el PSA.	44
Tabla 9. Costo de los equipos.....	46
Tabla 10. Costo operacional del proceso.....	46
Tabla 11. Especificaciones de calidad del biogás para redes aisladas.....	55
Tabla 12. Especificaciones de calidad del biogás para redes interconectadas.	55
Tabla 13. Especificaciones especiales para biogás proveniente de fuentes residuales, industriales y urbanas.....	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del proceso purificación de lavado con agua.	19
Figura 2. Esquema del proceso de purificación PSA.	21
Figura 3. Diagrama metodológico.	23
Figura 4. Diagrama de flujo de la columna.	27
Figura 5. Gráfica de la correlación de Sherwood generalizada para inundación y caída de presión en torres con empaques al azar.	29
Figura 6. Isoterma de adsorción de CO ₂ y CH ₄ a 298,15K	37
Figura 7. Esquema simulación absorción con agua en Aspen Hysys®	40
Figura 8. Esquema simulación PSA en Aspen Adsorption®.....	43
Figura 9. Esquema Presión [bar] vs Tiempo [s].	45
Figura 10. Esquema de la Presión [bar] vs Tiempo [s] a) Desechos agrícolas, b) Desechos industriales, c) Relleno sanitario, d) Lodos cloacales.....	45

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A . Condiciones reglamentarias según la comisión de regulación de energía y gas de Colombia (CREG)	55
Anexo B. Estimación de los costos de los equipos para el proceso de absorción con agua.	56

NOMENCLATURA

índices

A	Área transversal [cm^2]
B	Parámetro isoterma de Langmuir – Freundlich [atm^{-1}]
C_p	Capacidad calorífica [$\frac{cal}{g.K}$]
D_L	Coeficiente de dispersión axial [$\frac{cm^2}{s}$]
D	Difusividad del soluto [$\frac{m^2}{s}$]
G	Flujo molar del gas [$kmol/h$].
G'	Flujo másico de gas [$\frac{kg \text{ gas}}{m^2 s}$]
h	Coeficiente de transferencia de calor [$\frac{cal}{cm^2.K.s}$]
H_{OG}	Altura de la unidad de transferencia [m].
K_L	Coeficiente de dispersión axial térmica [$\frac{cal}{K.cm.s}$]
k_1	Coeficiente de transferencia de masa para el modelo LDF [s^{-1}]
L	Flujo molar del líquido [$kmol/h$].
L'	Flujo másico de líquido [$\frac{kg \text{ líquido}}{m^2 s}$]
m	Pendiente de la línea de equilibrio.
n	Parámetro isoterma de Langmuir – Freundlich
N_{OG}	Número de unidades de transferencia.
P	Presión [bar]
q	Cantidad adsorbida [$\frac{mol}{g}$]
$\bar{q}$	Cantidad promediada en volumen adsorbida en un adsorbente [$\frac{mol}{g}$]

q_m	<i>Parámetro isoterma de Langmuir – Freundlich</i> $\left[\frac{\text{mol}}{\text{g}}\right]$
Q	<i>Calor isostérico medio de adsorción</i> $\left[\frac{\text{cal}}{\text{mol}}\right]$
R	<i>Radio</i> [cm]
Sc	<i>Número de Schmidt para el gas y el líquido</i> $\left[\frac{\mu}{\rho D}\right]$
T	<i>Temperatura</i> [K]
T_{atm}	<i>Temperatura ambiente</i> [K]
t	<i>Tiempo</i> [s]
u	<i>Velocidad del gas intersticial</i> $\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$
X_2	<i>Fracción molar de soluto en el líquido de entrada.</i>
Y_1	<i>Fracción molar de soluto del gas de entrada.</i>
Y_2	<i>Fracción molar de soluto en el gas procesado.</i>
y	<i>Fracción molar en fase gaseosa a granel</i>
z	<i>Posición axial en la cama</i> [cm]
Z	<i>Altura de la columna</i> [m].

Letras griegas

α	<i>Fracción de vacío total</i>
ρ	<i>Densidad</i> $\left[\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}\right]$
μ	<i>Viscosidad</i> $\left[\frac{\text{cm}}{\text{g} \cdot \text{s}}\right]$
ε	<i>Fracción vacía entre partículas</i>
$\alpha, \beta, \gamma, n, \emptyset$	<i>Coeficientes según el tipo de relleno.</i>

Subíndice

<i>B</i>	<i>Lecho (Bed)</i>
<i>i</i>	<i>Especie i</i>
<i>g</i>	<i>Fase gas</i>
<i>l</i>	<i>Fase líquida</i>
<i>s</i>	<i>Fase sólida</i>
<i>w</i>	<i>Pared (wall)</i>

Superíndice

*	<i>Equilibrio</i>
---	-------------------

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE BIOGÁS POR ABSORCIÓN CON AGUA Y *PRESSURE SWING ADSORPTION* (PSA)*

AUTORES: Laura Carolina Ardila Pérez - Anggie Marcela Revuelta Sanjuan**

PALABRA CLAVE: Purificación de biogás, absorción con agua, *pressure swing adsorption* (PSA).

DESCRIPCIÓN:

El biogás es un valioso biocombustible renovable producido por digestión anaerobia, usado en la generación de calor, electricidad, gas vehicular solucionando problemas relacionados a residuos. El biogás producido a partir de diferentes fuentes puede contener diversos componentes indeseables que deben ser removidos ya que constituyen un problema perjudicial para cualquier equipo de procesamiento de biogás, ya que producen corrosión, causan emisiones contaminantes y reduce el contenido energético del biogás. Por tanto, se debe purificar para cumplir con las condiciones reglamentarias de la CREG. Como alternativa de solución en este trabajo, se propuso el diseño y simulación de sistemas de tratamiento de biogás por absorción con agua y *pressure swing adsorption*.

En el diseño del proceso de absorción con agua se usó una presión de 10 bar y temperatura de 27 °C; una columna empacada con anillos rashing 3/8 in y se calculó diámetro y altura de la columna para cada tipo de biogás. En el diseño del proceso PSA se usó una presión de 10 bar y temperatura de 25°C; se construyó un modelado no isotérmico, empleándose dos lechos fijos ambos con zeolita 5A y carbón activado, se eligió la isoterma Langmuir-Freunlich empleándose 6 etapas para cada ciclo. Las simulaciones se realizaron en los programas Aspen Hysys® y Aspen Adsorption®, obteniéndose un porcentaje de purificación de metano del 97.21% en la tecnología absorción con agua para el tipo de biogás desechos industriales, cumpliendo con las condiciones reglamentarias para redes interconectadas de la CREG.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Grupo de investigación en fluidos y energía (GIFE) CDT de gas. Director: Carlos Eduardo García Sánchez. Ingeniero Químico, Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND SIMULATION OF BIOGAS TREATMENT SYSTEMS BY ABSORPTION WITH WATER AND PRESSURE SWING ADSORPTION (PSA)*

AUTHORS: Laura Carolina Ardila Pérez - Anggie Marcela Revuelta Sanjuan**

KEYWORDS: Biogas purification, water scrubbing, pressure swing adsorption (PSA).

DESCRIPTION:

Biogas is a valuable renewable biofuel produced by anaerobic digestion, used in the generation of heat, electricity, vehicular gas, solving problems related to waste. The biogas produced from different sources can contain various undesirable components that must be removed since they are a harmful problem for any biogas processing equipment, since they produce corrosion, cause polluting emissions and reduce the energy content of the biogas. Therefore, it must be purified to comply with the regulatory conditions of the CREG. As an alternative solution in this work, the design and simulation of biogas treatment systems by water absorption and pressure swing adsorption was proposed.

In the design of the absorption process with water, a pressure of 10 bar and a temperature of 27 ° C was used; a column packed with rashing rings 3/8 in. and column diameter and height were calculated for each type of biogas. In the design of the PSA process, a pressure of 10 bar and a temperature of 25 ° C was used; a non-isothermal modeling was built, using two fixed beds, both with zeolite 5A and activated carbon, the Langmuir-Freunlich isotherm was chosen using 6 stages for each cycle. The simulations were carried out in the Aspen Hysys® and Aspen Adsorption® programs, obtaining a percentage of methane purification of 97.21% in the water absorption technology for the type of industrial waste biogas, complying with the regulatory conditions for interconnected networks of the CREG.

* Undergraduate Project

** Physical and Chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Fluid and energy research group (GIFE) CDT gas. Advisor: Carlos Eduardo García Sánchez, Chemical Engineer, Ph.D.

INTRODUCCIÓN

La demanda de combustibles renovables aumenta con la creciente preocupación por el cambio climático debido a la alta tasa de contaminación, mal manejo de residuos, deforestación de bosques y agotamiento de los combustibles fósiles. El calentamiento global es causado en su mayoría por aumentos en las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, compuestos principalmente por dióxido de carbono y metano (gas con efecto invernadero 24,5 veces mayor que el CO_2)¹, los cuales pueden ser obtenidos a partir de la combustión de combustibles, por la expulsión de dióxido de carbono al respirar y/o descomposición de material biodegradable en ausencia de oxígeno, más conocido como biogás.

En Colombia, se han venido promulgando documentos regulatorios para impulsar el uso del biogás como una alternativa a los combustibles fósiles en la generación de calor y electricidad. El biogás es un biocombustible obtenido por digestión anaerobia a partir de biomasa de distintas fuentes, como desechos agrícolas, desechos industriales, lodos cloacales y relleno sanitario¹. Sin embargo, dicho biogás obtenido a partir de digestión anaerobia no sólo está compuesto por metano (CH_4) sino que además, contiene dióxido de carbono (CO_2), pequeñas cantidades de amoníaco (NH_3), sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2), nitrógeno (N_2) y monóxido de carbono (CO), impurezas que pueden tener un impacto negativo significativo ya que generan emisiones nocivas para el medio ambiente, pueden causar graves problemas de salud en los seres humanos y su presencia es perjudicial para cualquier equipo, causando problemas de corrosión, o simplemente disminuyendo la eficiencia del equipo². Por esto, se hace necesario

¹ ARELLANO, Luis, et al. Purificación y usos del biogás. España. Universidad Autónoma de Barcelona, 2017. ISBN 978-84-490-6961-1.

² MORENO, Betzabet. GROPELLI, Eduardo. CAMOANELLA Enrique. Biogás obtenido de la digestión anaeróbica de diferentes residuos orgánicos: revisión de las principales tecnologías de purificación. Universidad Nacional del Litoral. [en línea], septiembre 2010 [revisado 10 mar., 2018].

mejorar la calidad del biogás producido, a partir de una serie de tecnologías para la separación del dióxido de carbono de una corriente de biogás. Entre ellas se distinguen adsorción, absorción física y química, separación con membranas y destilación criogénica³. En el marco de la presente tesis se estudia la separación de CO₂ de corrientes de biogás mediante las tecnologías absorción física con agua y adsorción por oscilación de presión (PSA), con miras a cumplir con las condiciones de calidad vigentes en la comercialización de biogás, donde el metano deberá alcanzar el 95% v/v según los estándares de calidad de la resolución 017 de 2007 de la CREG (ver Anexo A).

Absorción con agua: El método más sencillo, económico y simple para la eliminación de impurezas del biogás es el que se basa en la absorción física, utilizando agua presurizada como absorbente⁴, ya que el dióxido de carbono (CO₂) tiene mayor solubilidad que el metano (CH₄) en el agua utilizada como absorbente³. Además, el H₂S también puede ser eliminado mediante la absorción, aunque por lo general se retira antes del proceso de purificación junto con otros contaminantes³. La solubilidad del CO₂ en agua se rige por la presión, la temperatura y el pH del medio⁵. De acuerdo con la Ley de Henry, el agua absorbe los gases en diferente medida dependiendo principalmente de la presión del gas y de la temperatura del agua⁵.

En esta tecnología, el biogás crudo se comprime normalmente a una presión de entre 5 y 20 bares a temperatura constante, y se alimenta a una columna de absorción en sentido ascendente, mientras que el agua presurizada es rociada

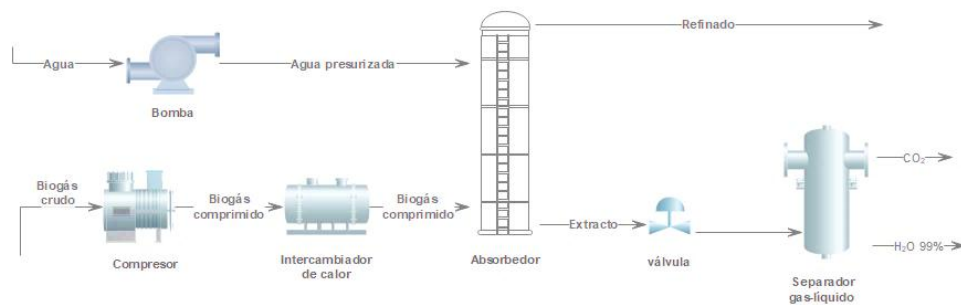
³ ÁLVAREZ GUTIERREZ, Noelia. Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de biogás. Tesis doctoral en Ingeniería Energética. Oviedo: Universidad de Oviedo, 2016. p 8.

⁴ QIE, Sun, et al. Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. Jinan, China. El Sevier, 2015. p 522.

⁵ DE LA PUENTE PAZOS, Alberto. Validación técnica y económica de sistema de purificación y enriquecimiento de biogás. Tesis de Maestría. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Química, 2017. p 22.

desde la parte superior, permitiendo el contacto agua-biogás en contracorriente³. Se instala material de relleno dentro de la columna, con el fin de que haya gran superficie de contacto entre el agua y el biogás³. Por consiguiente, el CO₂ se disuelve en el agua y se elimina por la base de la columna, que se alimenta a un separador donde se obtiene dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) que deberá someterse a un tratamiento de purificación para poder ser recirculada, mientras el biogás purificado, se recupera por la parte superior de la torre³. Los resultados muestran que del 5 al 10% de CO₂ permanece en el biogás [5]. El proceso depende de factores como las dimensiones de la torre de depuración, la presión del gas y la composición del biogás en bruto, así como los caudales de agua y la pureza del agua utilizada⁵. Todo el proceso se representa en la Figura 1.

Figura 1. Esquema del proceso purificación de lavado con agua.



A partir del año 1900 existen proveedores proporcionando esta tecnología, dentro los cuales se destacan Brückner's, Metener y Malmberg Water AB [5]. Brückner's, ofrece una tecnología que se caracteriza por operar a altas presiones. Metener, por su parte, ofrece un sistema de eliminación no regenerativo. Por último, Malmberg Water AB ofrece un sistema que presenta un consumo de agua de 3 L/m³ de biogás tratado, obteniendo en el gas de salida una composición del 97% de metano⁵. Malmberg Water AB, cubre todos los aspectos del proceso de actualización de biogás empleando absorción con agua. Sin embargo, esta empresa relata que

desde el principio estaba completamente abierta a qué tecnología de actualización elegirían. La elección fue entre la tecnología de lavado con agua o un proceso de absorción química con aminas⁶. Plantearon un análisis referente a la tecnología con aminas, y llegaron a la conclusión que éstas producen un gas de alta pureza, pero además requieren calor y esto aumenta considerablemente el costo de operación. Por esto, se decidieron y optaron por purificar el biogás con la tecnología de lavado con agua⁶. Actualmente, esta empresa es el mayor proveedor de plantas de mejoramiento de biogás en el mundo debido a que han entregado más de 40 plantas de mejoramiento de biogás solo en Alemania⁶.

Adsorción por oscilación de presión: El método de PSA, es una tecnología de actualización de biogás por adsorción. La adsorción significa que los compuestos gaseosos (adsorbatos) se retienen en la superficie de los sólidos (adsorbentes) y quedan atrapados por el tamaño del tamiz molecular. Como adsorbentes, se puede usar carbón activado, zeolitas, entre otras. Las bajas temperaturas y las altas presiones aumentan la tasa de adsorción⁷.

El proceso clásico de PSA de dos lechos fue patentado en la década de 1960 por Charles Skarstrom, y se conoce como el ciclo de Skarstrom. El ciclo básico de Skarstrom utiliza dos lechos adsorbentes empaquetados, como se muestra esquemáticamente en la Figura 4. El ciclo "básico" consta de cuatro pasos: presurización, adsorción, despresurización y purga a contracorriente. Es posible agregar un paso de equilibrio de seguridad adicional que permita ahorrar energía⁸. En el primer paso, la alimentación fluye al lecho 1 y aumenta su presión, mientras

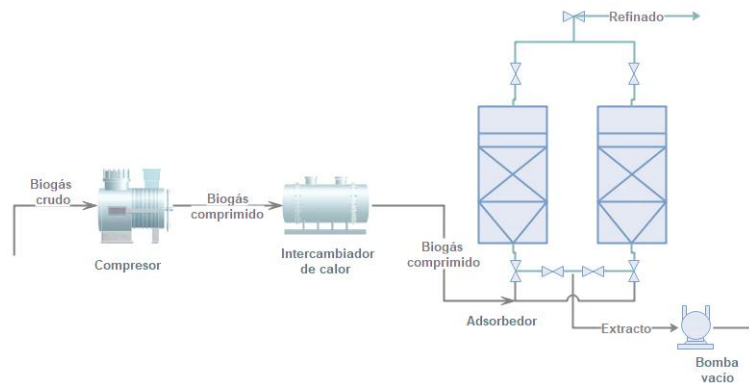
⁶ MALMBERG. The Magic Factory. [En línea]. Sweden. 2017. Disponible en <https://www.malmberg.se/en-us/Insights/The-Magic-Factory> p 1.

⁷ BEIL, Michael and BEYRICH, Wiebke. Biogas upgrading to biomethane. Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology, Germany: Woodhead Publishing Limited, 2013. p 343-345. DOI: 10.1533/9780857097415.3.342.

⁸ WOOD, Kevin R; LIU, Y.A y YU, Yueying. Design, simulation and Optimization of adsorptive and Chromatographic Separations. Taiwan: WILEY-VCH, 2018. p 12-13. ISBN 978-3-527-34469-7.

que el segundo lecho completamente cargado, está conectado al producto de extracción. Una vez alcanzada la presión deseada, el sistema entra en el paso 2, donde el componente más fuertemente adsorbido se retiene en el segundo lecho y la corriente de salida de gas se enriquece en el componente menos fuertemente adsorbido. Una porción del producto refinado se desvía al segundo lecho, para ayudar a regenerarlo completamente. Una vez que se ha cargado el primer lecho y se ha regenerado el segundo lecho, puede tener lugar un paso de ecualización a presión. Esto permite ahorrar energía al reducir la cantidad de gas que necesita ser comprimido. Después del paso de equilibrio, el proceso se repite, pero con los roles de los dos lechos invertidos. Esta es solo una configuración posible⁸.

Figura 2. Esquema del proceso de purificación PSA.



1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y simular sistemas de tratamiento de biogás por absorción con agua y *pressure swing adsorption* (PSA) para cumplir con las condiciones de calidad vigentes para la comercialización de biogás.

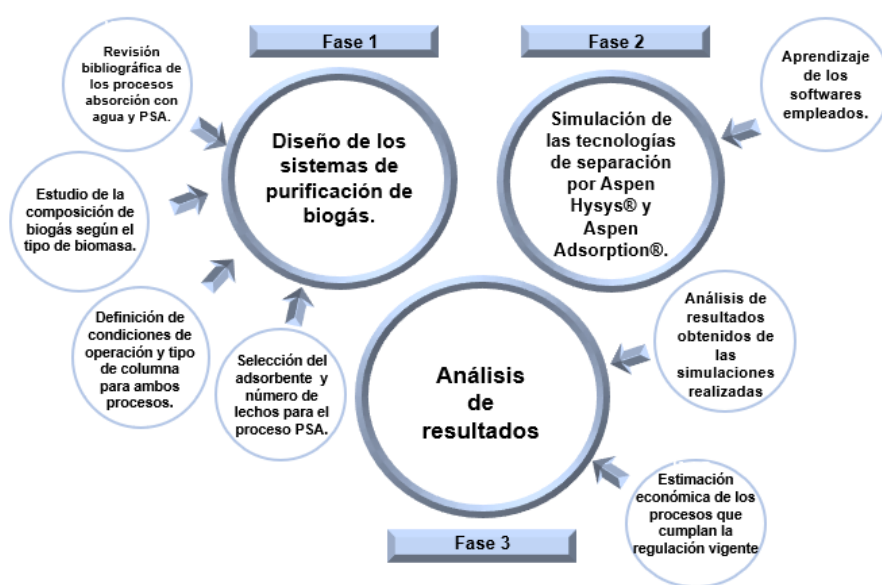
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar los sistemas de purificación de biogás por absorción con agua y *pressure swing adsorption* considerando el tipo de biomasa.
- Simular procesos de tratamiento de biogás para las operaciones de interés cumpliendo con las condiciones reglamentarias según la comisión de regulación de energía y gas de Colombia.
- Analizar los resultados obtenidos en función del porcentaje de purificación de metano y condiciones económicas.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 3 se evidencia la metodología empleada para cumplir con los objetivos de este proyecto.

Figura 3. Diagrama metodológico.



2.1 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.

En esta fase, se realizó el diseño de los dos sistemas de purificación de biogás tratados en este proyecto. Se hizo una cuantiosa revisión bibliográfica de cada proceso, para entender detalladamente el funcionamiento de éstos, su historia y las diferentes investigaciones y actualizaciones que se han hecho de estas tecnologías de separación, alrededor del mundo.

2.1.1 Diseño del proceso absorción con agua. Para esta tecnología se seleccionó el tipo de columna de absorción y su tipo de empaque, siendo la columna empacada la más usada, ya que los empaques incrementan el área y el tiempo de contacto entre el agua y el biogás³. Se determinó el dimensionamiento de las columnas según la fuente de obtención del biogás, calculando el diámetro y la altura para cada una de las estas.

2.1.2 Diseño de *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Para el desarrollo de este diseño, fue fundamental una extensa revisión bibliográfica del proceso, debido a que se debe seleccionar correctamente las condiciones de operación del sistema, características del lecho, modelado, adsorbente a utilizar, la isoterma de adsorción y las condiciones de contorno.

2.2 SIMULACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE SEPARACIÓN POR ASPEN HYSYS® Y ASPEN ADSORPTION®

En esta fase, se realizó la simulación de los procesos Absorción con agua y Pressure Swing Adsorption en los softwares de simulación Aspen Hysys v8.8 y Aspen Adsorption v8.8 respectivamente. Se afianzaron los conocimientos en el simulador Aspen Hysys® y se aprendió a manejar de cero el programa Aspen Adsorption®.

2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta fase se realizó el análisis de resultados de los procesos de purificación de biogás. Se analizó el porcentaje de metano purificado de los procesos en cada simulación según el tipo de biomasa, y se verificó si cumplía con las condiciones

reglamentarias de la Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia (CREG). Además, se hizo una estimación económica de los procesos simulados que cumplen con las especificaciones de calidad según la CREG, teniendo en cuenta el posible precio de comercialización del biogás obtenido, y los costos asociados a su producción.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.

Se realizó el estudio detallado de la composición y producción de biogás para cada tipo de biomasa. La composición encontrada se aproximó a los componentes con mayor presencia en el biogás: metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). La purificación del biogás implica una etapa previa conocida como limpieza de biogás, mediante la cual se eliminan los productos corrosivos, principalmente los compuestos de azufre y otros contaminantes³.

Tabla 1. Composiciones del biogás según el tipo de biomasa.

Tipo de biomasa	CH ₄ %v/v	CO ₂ %v/v
Relleno sanitario	60,41	39,58
Desechos industriales	83,65	16,35
Lodos cloacales	58,00	42,00
Desechos agrícolas	65,00	35,00

Relleno Sanitario⁹; Desechos Industriales¹⁰; Lodos Cloacales¹¹; Desechos Agrícolas¹².

Para conocer la producción de biogás, se escogió el departamento de Santander, y se recopilaron los datos de producción reales a partir de los desechos de cada área, quedando como resultado:

⁹ REY, M. FONT, R y Aracil, I. iogas from MSW landfill: Composition and determination of chlorine content with the AOX (adsorbable organically bound halogens) technique. España., 2013. p. 3.

¹⁰ REGATTIERI, Alberto. et al. Biogas Micro-Production from Human Organic Waste – A research proposal. Switzerland.: Creative Commons, 2018. p. 10.

¹¹ Di Marcoberardino, et al. Life Cycle Assessment and Economic Analysis of an Innovative Biogas Membrane Reformer for Hydrogen Production. Switzerland.: Creative Commons, 2019. p. 3.

¹² SARABIA, Marco. et al. Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. México, 2016. p. 6.

Tabla 2. Origen de la biomasa y producción de biogás en Santander.

Tipo de biomasa	Origen de la biomasa	Producción biogás [m ³ biogás / h]
Relleno sanitario	El Carrasco	180
Desechos industriales	Cervecería Bavaria	380
Lodos cloacales	Ciudad de Bucaramanga	206
Desechos agrícolas	Gallinaza huevos Kikes	4,1

Relleno Sanitario¹³; Desechos Industriales¹⁴; Lodos Cloacales¹⁵; Desechos Agrícolas¹⁵.

3.1.1 Diseño del proceso absorción con agua. El sistema opera a 10 bar de presión y 27°C de temperatura, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Diagrama de flujo de la columna.



Se realiza en balance de materia para determinar el caudal de líquido necesario, el cual permitirá la absorción deseada de CO₂ en el biogás crudo alimentado. Este valor es necesario para realizar la simulación en el simulador Aspen Hysys®. Para

¹³ LLANO, Nataly. Environmental Justice Atlas: Relleno sanitario (Landfill), El Carrasco, Bucaramanga, Colombia [En línea]. 2014. (Recuperado en 2 abril 2019). Disponible en <https://ejatlas.org/conflict/relleno-sanitario-landfill-el-carrasco-bucaramanga-colombia>.

¹⁴ CRISTANCHO, Jorge. Diseño de un sistema para el aprovechamiento del biogás aplicado a la producción de vapor en la cervecería Bavaria Bucaramanga. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2009. p. 67.

¹⁵ VELÁSQUEZ, Mario. et al. Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. Bogotá D.C, 2018. p. 24,200.

el gas, se emplea una base de cálculo de 1 kmol/h de biogás crudo, siendo este un porcentaje de la producción total de biogás según el tipo de biomasa.

Los balances de materia se realizan bajo una base libre de soluto (X Y), esto significa que se harán sin la presencia del contaminante que será transferido al líquido. La base libre de soluto se define como:

$$Y = \frac{y}{1-y} \quad X = \frac{x}{1-x} \quad (1)$$

El balance de materia en el sistema es:

$$\textit{Entrada} = \textit{Salida}$$

$$G (\textit{entrada}) + L (\textit{entrada}) = G (\textit{salida}) + L (\textit{salida})$$

$$G_1 + L_2 = G_2 + L_1 \quad (2)$$

El balance de masa del agua o el agente contaminante es:

$$G_1 Y_1 + L_2 X_2 = G_2 Y_2 + L_1 X_1 \quad (3)$$

Esta ecuación se puede simplificar ya que las corrientes de gas y líquido son las mismas en la entrada y salida, es decir, su masa total no cambia, por lo tanto:

$$G_1 = G_2 \text{ y } L_1 = L_2.$$

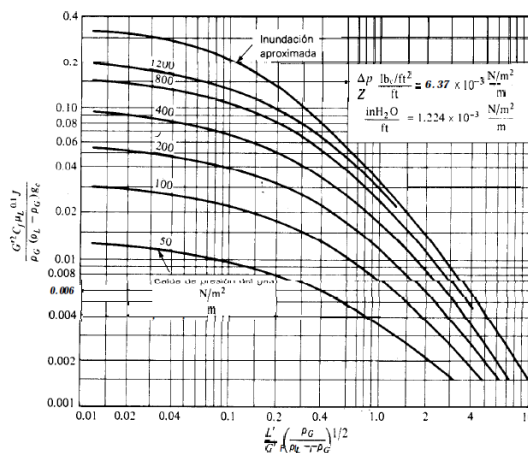
Entonces:

$$G(Y_1 - Y_2) = L(X_1 - X_2) \quad (4)$$

Esta ecuación de línea recta se traza en el diagrama de equilibrio y define las condiciones de funcionamiento del absorbedor. La absorción de dióxido de carbono con agua para sistemas de tratamiento de biogás sigue la ley de Henry⁵. Para 27°C la constante de Henry en el equilibrio a la presión de operación es de $H'=171$. Para el cálculo del solvente, se usó un valor de 1.5 en la relación L_{ope}/L_{min} .

3.1.1 Cálculo del diámetro de la columna empacada. El cálculo del diámetro de la columna se hizo para una velocidad menor a la velocidad de inundación, a la cual por heurística se le asignó un valor del 80%. Para una torre empacada es usada la correlación de Sherwood, mostrada en la figura 5¹⁶.

Figura 5. Gráfica de la correlación de Sherwood generalizada para inundación y caída de presión en torres con empaques al azar.



El gráfico se usa para predecir la velocidad de inundación. El eje x o abscisa es una función de las características físicas de las corrientes de gas y líquido, y el eje y u ordenada, es una función de las características del gas y el líquido como también

¹⁶ TREYBAL, Robert. Operaciones de transferencia de masa. México: Mc Graw-Hill. p. 224. ISBN 968-6046-34-8.

del tipo de empaque utilizado. El procedimiento para determinar el diámetro de la torre es:

1. Calcular el valor de la abscisa:

$$Abscisa = \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho g}{\rho l - \rho g} \right)^{0,5} \quad (5)$$

2. Ubicar el valor de la abscisa en el diagrama hasta la curva de inundación y calcular el valor de la ordenada.

3. Con el valor del eje y, se reordena la ecuación y se calcula G'

$$G' = \sqrt{\frac{eje\ y * \rho g (\rho l - \rho g)}{Cf * \mu^{0.1} * J}} \left[\frac{kg\ gas}{m^2 * s} \right] \quad (6)$$

4. Se calcula el G' de operación, siendo por heurística el 80% del G' de inundación.

5. Determinar el área de la torre.

$$\text{Área} = \frac{G's}{G'_{ope}} [m^2] \quad (7)$$

6. Se calcula el diámetro con el valor del área anteriormente calculado.

$$D = \sqrt{\frac{4a}{\pi}} [m] \quad (8)$$

La caída de presión en la columna empacada se considera despreciable¹⁷, ya que es de aproximadamente 0.00689 bar/etapa.

3.1.2 Cálculo de la altura de la columna empacada. El cálculo de la altura se realizó con el método de unidades de transferencia, mediante la ecuación 9.

$$Z = N_{OG} * H_{OG} \quad (9)$$

3.1.2.1 Cálculo de N_{OG} . El cálculo del número de unidades de transferencia [N_{OG}] se realiza mediante la ecuación 10 para disoluciones que cumplen con la ley de Henry:

$$N_{OG} = \frac{\ln \left[\left(\frac{Y_1 - mX_2}{Y_2 - mX_2} \right) * \left(1 - \frac{1}{A} \right) + \frac{1}{A} \right]}{1 - \frac{1}{A}} ; \quad A = \frac{Lm}{Gm * m} \quad (10)$$

3.1.2.2 Cálculo de H_{OG} . El cálculo de la altura de la unidad de transferencia [H_{OG}] se realizó con la ecuación 11.

$$H_{OG} = H_G + \frac{H_L}{A} ; \quad A = \frac{Lm}{Gm * m} \quad (11)$$

Donde:

$$H_G = \frac{\alpha * G'^{\beta}}{L'\gamma} Sc^{0,5} \quad (12)$$

$$H_L = \phi \left(\frac{L'}{\mu l} \right)^n Sc^{0,5} \quad (13)$$

¹⁷ DURAND, Alejandro. Reglas heurísticas y criterios para diseño de equipos de procesos. En: Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, A.C. Noviembre-Diciembre.1993. Vol 3. p.3.

3.1.3 Número de platos reales. El cálculo del número de platos reales se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\# \text{ platos reales} = \frac{\# \text{ platos ideales}}{\text{eficiencia}} \quad (14)$$

Siendo:

$$\# \text{ platos ideales} = \frac{\log \left[\frac{y_n + 1 - Hx_o}{y_1 - Hx_o} * \frac{A - 1}{A} + \frac{1}{A} \right]}{\log A} \quad (15)$$

El valor de la eficiencia se determinó por heurística, siendo este del 80%¹⁷.

En la Tabla 3, se muestran los resultados del diseño de las columnas de absorción según el tipo de biomasa, obtenidos a partir de los balances de masa y los cálculos realizados para el diámetro y la altura de la columna.

Tabla 3. Diseño altura y diámetro de las columnas de absorción según el tipo de biomasa.

Tipo de biogás	Diámetro [m]	Altura [m]
Desechos agrícolas	0,2744	2,2566
Desechos industriales	0,2989	1,4542
Lodos cloacales	0,2724	2,4366
Relleno sanitario	0,2728	2,381

3.1.2 Diseño de *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Se emplearon dos lechos fijos con condiciones de operación y características evidenciadas en la Tabla 4, basadas en una recopilación de artículos e investigaciones del proceso. Del mismo modo, cumplen con las reglas heurísticas de PSA¹⁸.

Tabla 4. Condiciones de operación PSA.

CONDICIONES DE OPERACIÓN				
Presión Adsorción (bar)	Presión Desorción (bar)	Temperatura (K)	Flujo (kmol/h)	Composición (%v/v)
10	1,013	298,15	1	Depende del tipo de biomasa
CARACTERÍSTICAS DEL LECHO				
Diámetro interno (m)				0,01855
Altura del lecho (m)				0,5
Espesor de la pared (m)				0,00134
Coeficiente de transferencia de calor fluido/sólido (MW / m ² K ⁻¹)				1
Coeficiente de transferencia de calor pared/fluido (MW / m ² K ⁻¹)				3,851e-005
Coeficiente de transferencia de calor pared/ambiente (MW / m ² K ⁻¹)				1,423e-005
Conductividad térmica de la pared (MW / m K ⁻¹)				1e-20
Capacidad de calor del material de la pared (MJ / kg K ⁻¹)				5,0232e-4
Densidad de material de la pared (kg/m ³)				7830
Número de capas				2

El modelado de PSA requirió la resolución de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales, donde el tiempo y la posición espacial son variables independientes. También las condiciones de contorno de cada ecuación cambian dependiendo de cada etapa del proceso.

¹⁸ SAIN, S, et al. Heuristic design of pressure swing adsorption: a preliminary study. Germany: Indian Institute of Technology. p.28-34.

Se construyó un modelo matemático que contiene balance de masa, energía y momento para desarrollar un modelo de PSA no isotérmico completo con los siguientes supuestos:

- I. El flujo a través de una columna de adsorción en un sistema PSA no es diferente del flujo a través de cualquier lecho adsorbente fijo¹⁹. Es por esto, que el patrón de flujo se describió mediante el modelo de flujo de tapón axialmente disperso, por tanto, se hizo un balance por componentes de las especies i en cada lecho (ecuación 16)¹⁷.

$$-D_L \frac{\partial^2 y_i}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z}(v y_i) + \frac{\partial y_i}{\partial t} + \frac{1 - \varepsilon}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

- II. Se asumió el equilibrio térmico entre el fluido y las partículas. Por esta razón, el balance de energía para la fase gaseosa y sólida de cada lecho de adsorción viene dado por:

$$-\varepsilon K_L \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + (\alpha \rho_g C_{p,g} + \rho_B C_{p,s}) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g C_{p,g} \varepsilon u \frac{\partial T}{\partial z} - \rho_B \sum_i^n Q_i \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial t} + \frac{2h_i}{R_{Bi}} (T - T_w) = 0 \quad (17)$$

Existe un efecto de transferencia de calor en la pared de cada lecho. Por lo tanto, se construyó otro balance de energía de conducción axial en la pared (ecuación 18).

$$\rho_w C_{pw} A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 2\pi R_{Bi} h_i (T - T_w) - 2\pi R_{B0} h_0 (T_w - T_{atm}) \quad (18)$$

Donde:

$$A_w = \pi(R_{B0}^2 - R_{Bi}^2)$$

¹⁹ RUTHVEN, Douglas M; FAROOQ, Shamsuzzaman y KNAEBEL, Kent S. Pressure Swing Adsorption. Canada: WILEY-VCH, 1994. p 173. ISBN 1-56081-517-5.

- III. En ambos lechos la velocidad está relacionada con los gradientes de presión generales o internos. En tales casos, la velocidad y el gradiente de presión se relacionan a través de un balance de momento²⁰. El equilibrio de impulso en estado estable fue dado por la ecuación de Ergún (ecuación 19).

$$-\frac{dP}{dz} = a\mu u + b\rho u^2 \quad (19)$$

Donde:

$$a = \frac{150}{4R_p^2} \frac{\varepsilon(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad y \quad b = 1,75 \frac{\varepsilon^2(1-\varepsilon)^2}{2R_p \varepsilon^3} \quad (20)$$

- IV. La tasa de transferencia de masa se representó mediante un modelo de fuerza impulsora lineal (LDF), (ecuación 21). Este modelo para la cinética de adsorción de gases se usa con frecuencia y con éxito para el análisis de datos dinámicos de columnas de adsorción y para diseños de procesos de adsorción porque es simple, analítico y físicamente consistente²¹.

$$\frac{\partial \bar{q}_i}{\partial t} = k_i(q_i^* - \bar{q}_i) \quad (21)$$

Donde:

$$k_i = \frac{15D_e}{R_p^2} \quad (22)$$

- V. La concentración radial y los gradientes de temperatura son despreciables.

3.1.2.1 Selección del adsorbente e isoterma de adsorción. Para seleccionar correctamente el adsorbente a utilizar en el proceso, se hizo uso de las normas heurísticas de PSA, donde la regla 1 enuncia que se debe utilizar un adsorbente que proporcione el mayor factor de separación (ecuación 23), que también es usado como una medida de selectividad¹⁸.

²⁰ ASPEN TECH. Adsorption reference guide, ADSIM v2004. USA, Abril 2005. p.32.

²¹ ZHONG, Y, et al. Dynamics of BaCl₂-NH₃ adsorption pair. Reino Unido: El Sevier, Abril 2009. p.1180.

$$\alpha_{12} = \frac{x_1/x_2}{y_1/y_2} \quad (23)$$

Donde x_1 y y_1 son, respectivamente, la fracción molar del componente 1 en fase adsorbida y fase fluida. Además, el adsorbente debe tener propiedades mecánicas, como fuerza y resistencia al desgaste. Es por esto, que los adsorbentes que se eligieron para el proceso y que van en cada capa de ambos lechos son: Zeolita 5A y Carbón Activado, porque cumplen con lo anteriormente dicho.

Para el equilibrio de adsorción, se empleó la isoterma de Langmuir-Freundlich o Loading Ratio Correlation (LRC), (ecuación 24)

$$q_i = \frac{q_{mi} B_i P_i^{n_i}}{1 + \sum_{j=1}^n B_j P_j^{n_j}} \quad (24)$$

Donde los parámetros de la isoterma son función de la Temperatura:

$$q_m = k_1 + k_2 T \quad (25)$$

$$B = k_3 e^{k_4/T} \quad (26)$$

$$n = k_5 + \frac{k_6}{T} \quad (27)$$

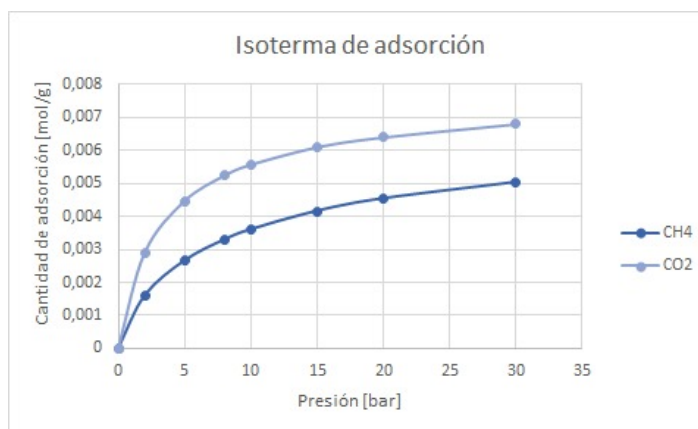
Los parámetros para la isoterma (LRC) de CH₄ y CO₂, se evidencian en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros para la isoterma Langmuir-Freunlich.

Parámetros para la Isotherma Langmuir-Freunlich			
CH ₄		CO ₂	
k ₁	0,02386	k ₁	0,028797
k ₂	-5,621e-005	k ₂	-7e-005
k ₃	0,003478	k ₃	0,01
k ₄	1159	k ₄	1030,0
k ₅	1,618	k ₅	0,999
k ₆	-248,9	k ₆	-37,04

Se ingresaron los parámetros de cada compuesto en la ecuación de la isoterma (LRC) con presiones de 0 a 30 bar (Figura 6). Se graficaron los resultados y como se esperaba, se observó que la isoterma de adsorción tiene mayor selectividad en CO₂ que en CH₄ en el rango de temperatura de 298,15K.

Figura 6. Isotherma de adsorción de CO₂ y CH₄ a 298,15K.



3.1.2.2 Condiciones de contorno. Para el proceso cíclico se emplearon 6 etapas o condiciones de contorno, basadas en el ciclo de Skarstrom. Se agregaron las etapas de ecualización de presión al proceso porque éstas conservan energía, y así el gas comprimido del lecho de alta presión presuriza parcialmente el lecho de baja

presión. También la ecualización de presión hace que los dos lechos se desconecten y asimismo el primer lecho se presuriza con gas de alimentación, mientras que el segundo lecho se ventila para completar la purga.

Las etapas del proceso son:

- I. Presurización de la alimentación del lecho fijo.
- II. Adsorción a alta presión.
- III. Ecualización de presión de despresurización.
- IV. Despresurización a contracorriente (Blowdown).
- V. Purga con una parte de un producto ligero.
- VI. Ecualización de presión de presurización.

Las ecuaciones de las etapas I, II, V y VI son:

$$-D_L \left(\frac{\partial y_1}{\partial z} \right)_\alpha = u_\alpha (y_{i,in} - y_{i,\alpha}); \quad \left(\frac{\partial y_i}{\partial z} \right)_\beta = 0 \quad (28)$$

$$-K_L \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_\alpha = \rho_g C_{pg} u_\alpha (T_{in} - T_\alpha); \quad \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_\beta = 0 \quad (29)$$

Donde para la etapa I y II α es $z = 0$ y β es $z = L$ y $y_{in} = y_{alimento}$. Para la etapa v; α es $z = L$ y β es $z = 0$ y $y_{i,in}$ = composición promediada en el tiempo de la corriente de efluentes durante el paso II. Para la etapa VI; α es $z = L$ y β es $L = 0$ y y_{in} = composición temporal de la corriente de efluentes durante el paso III²².

²² YANG, Jaeyoung; CHANG, Jay-Woo. Separation of Hydrogen Mixtures by a Two-Bed Pressure Swing Adsorption Process Using Zeolite 5A. Korea: American Chemical Society, 1997. p.2-4.

Las ecuaciones de la etapa III y IV son:

$$\left(\frac{\partial y_1}{\partial z}\right)_{z=0} = \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0} = 0; \quad \left(\frac{\partial y_1}{\partial z}\right)_{z=L} = \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=L} = 0 \quad (30)$$

3.2 SIMULACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE SEPARACIÓN POR ASPEN HYSYS® Y ASPEN ADSORPTION®

3.2.1 Simulación en Aspen Hysys®. Para la simulación de la tecnología absorción con agua se utilizó en software Hysys v8.8. Los compuestos ingresados al simulador son: metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). El paquete termodinámico utilizado en la simulación fue SOUR SRK, el cual es usado en su mayoría para sistemas de hidrotratamiento, que contengan agua y gases ácidos como H₂S y CO₂²³. Se realizaron 4 simulaciones bajo las mismas condiciones de operación presión:10 bar, temperatura: 27°C, y una base de cálculo de biogás crudo en la alimentación de 1 kmol/h. A partir de los cálculos y balances de masa, se obtuvo el valor de flujo de agua que ingresa al sistema, para los diferentes tipos de biomasa, valor que será ingresado al simulador.

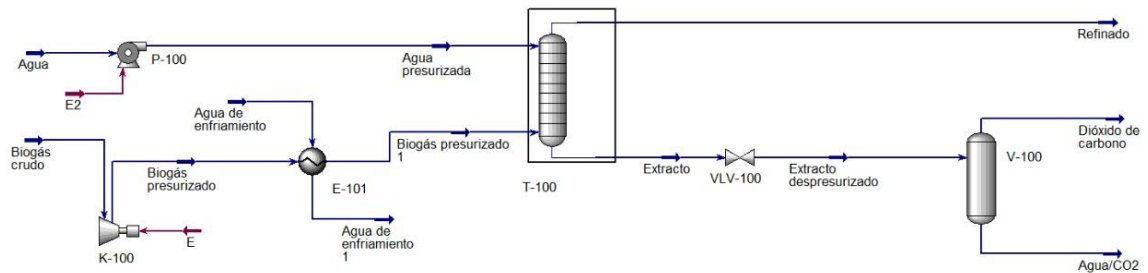
El sistema cuenta con un compresor, el cual aumenta la presión del biogás crudo de 1 atm a 10 bar, para lograr una temperatura de biogás de 27 °C se agregó un intercambiador de calor tubo carcaza. El agua deberá ingresar a las mismas condiciones, por lo tanto, se hace necesario el uso de una bomba para alimentar el agua al proceso. La columna de absorción empacada es alimentada a 10 bar de presión y 27°C de temperatura. El empaque usado fue anillos rashing 3/8 de

²³ GUERRA, María. Aspen HYSYS Property Packages: Overview and Best Practices for Optimum Simulations. España.: AspenTech, 2006.

pulgada ya que presenta una relación óptima entre el diámetro de la torre y el empaque, logrando así un producto con gran porcentaje de purificación.

En el fondo de la torre, se encuentra la corriente de extracto, la cual está compuesta en su mayoría por agua y el dióxido de carbono absorbido en el proceso, la cual deberá someterse a un proceso de despresurización, para luego ser separados. La corriente de agua podrá ser recirculada, pero antes, deberá someterse a un proceso de tratamiento, con la finalidad de ingresar al proceso en las condiciones necesarias.

Figura 7. Esquema simulación absorción con agua en Aspen Hysys®.



Con los datos obtenidos por el balance de masa para cada tipo de biomasa se simuló en el software Aspen Hysys v.8.8 y se obtuvieron los siguientes resultados en el refinado, corriente por la cual se obtiene el metano purificado.

Tabla 6. Porcentaje de purificación de metano con el proceso absorción con agua.

Tipo de biogás	% CH₄ en el biogás de salida
Desechos agrícolas	87,45
Desechos industriales	97,21
Lodos cloacales	85,06
Relleno sanitario	87,22

A partir de los resultados arrojados por la simulación en Aspen Hysys v.8.8 y la regulación de la CREG, en la Tabla 6 se puede evidenciar que el tipo de biogás apto para su uso y comercialización en redes interconectadas es el de desechos industriales, ya que posee un porcentaje de biometano del 97,21%, cumpliendo así con los estándares de calidad de la resolución 017 de 2007 de la CREG. Sin embargo, los otros tipos de biogás presentan un porcentaje de purificación de metano mayor al 85%, lo que los hace útiles para redes aisladas según la CREG resolución 240 del 2016, demostrando que esta tecnología tiene gran porcentaje de eliminación del dióxido de carbono presente en el biogás.

3.2.2 Simulación en Aspen Adsorption®. La simulación de PSA se hizo en el simulador Aspen Adsorption v8.8 cuyo programa pertenece al paquete de simuladores de Aspen Tech®. Este programa simula procesos de gas solo con adsorción, o procesos donde la reacción y la adsorción ocurren simultáneamente²⁰.

Al simulador, se ingresaron los compuestos metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) a condiciones de operación anteriormente descritas en el diseño del proceso y su composición dependiendo del tipo de biomasa del biogás. Para el ingreso de los compuestos, el programa hace uso de Aspen Properties®, simulador que

suministra una base de datos de propiedades termo físicas de los componentes a alimentar al proceso.

Se realizó la simulación en estado estacionario cíclico (CSS) es decir, una simulación dinámica del sistema, comenzando con un conjunto específico de condiciones iniciales, durante un gran número de ciclos. CSS es el resultado de una discretización completa de tiempo y espacio y presenta un proceso de adsorción periódica, como un problema de estado estable²⁰.

Se emplearon dos lechos fijos gCSS; siete tanques de vacío que regulan la presión, para permitir el cálculo del caudal a través de la ecuación de la válvula, basada en la caída de presión a través de ella y de la caída de presión a través de un lecho de adsorción; diez válvulas, tres de ellas se usaron para la alimentación, tres para el producto, tres para el extracto y una válvula se usó para el paso de purga. También se añadieron tres corrientes al proceso, una de alimentación, y las dos restantes de salida del producto y extracto.

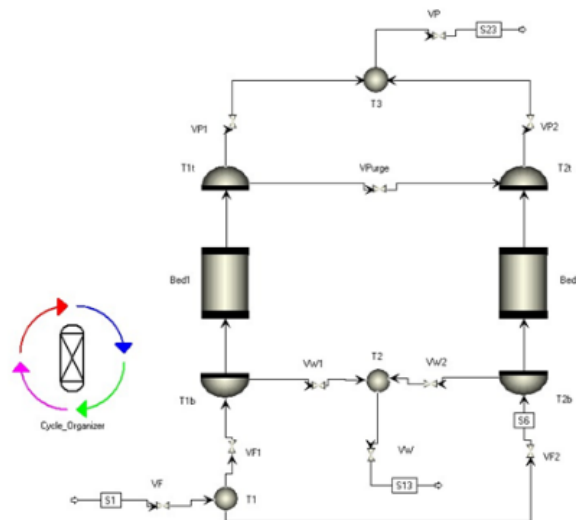
Se ingresaron los datos de todo el modelado diseñado a cada lecho fijo. El proceso simulado es no isotérmico con 16 nodos y cada tanque es adiabático. Para verificar que la simulación no tenga errores, en la parte inferior de la ventana, debe aparecer un pequeño cuadro en color verde, esto indica que las ecuaciones empleadas y el proceso están bien diseñadas. Debido a que el proceso es cíclico, Aspen Adsorption® ofrece una herramienta llamada organizador de ciclos. Esta herramienta permite añadir las etapas del proceso con sus respectivos tiempos de adsorción y número de ciclos.

3.2.2.1 Tiempos de duración. Los tiempos de duración de cada etapa se eligieron en base a la regla 4a y 4b de las reglas heurísticas de PSA, que expresa que el tiempo de adsorción debe estar cerca del tiempo de penetración de la adsorción y también debe ser igual al tiempo de desorción¹⁸. Asimismo, están soportados en varios artículos de investigación del proceso. Los tiempos de duración de cada etapa se ven evidenciados en la Tabla 7. Después de que el organizador de ciclos quedó listo, se generó y se procedió a correr el proceso con 10 ciclos.

Tabla 7. Tiempo de duración de cada etapa en la simulación.

Etapas	Tiempo [s]
Presurización lecho 1, Despresurización lecho 2	40
Adsorción lecho 1, Purga lecho 2	190
Ecualización de presión	290
Despresurización lecho 1, Presurización lecho 2	40
Purga lecho 1, Adsorción lecho 2	190
Ecualización de presión	290

Figura 8. Esquema simulación PSA en Aspen Adsorption®.



Los resultados de las simulaciones en el programa Aspen Adsorption®, siguiendo el diseño implantado de PSA, se evidencian en la Tabla 8.

Tabla 8. Porcentaje de purificación de metano con el PSA.

Tipo de biogás	% CH₄ en el biogás de salida
Desechos industriales	92,81
Desechos agrícolas	80,29
Lodos cloacales	73,22
Relleno Sanitario	72,74

De los resultados se observa, que la simulación con mayor porcentaje de purificación de metano (CH₄) fue la de tipo de biogás de desechos industriales. Esto se debió a que el metano tenía mayor composición en comparación con los demás tipos de biogás; también se debió a que los adsorbentes seleccionados tal vez no proporcionaron el mayor factor de separación con relación al dióxido de carbono (CO₂), es decir la selectividad no fue alta. Por tanto, ninguna simulación cumplió con las condiciones reglamentarias para redes interconectadas según la CREG.

El tiempo de todas las simulaciones fue de 10400 s, tiempo acorde a los diez ciclos establecidos para cada simulación. La Figura 9, muestra el esquema de la Presión [bar] vs Tiempo [s] de cada simulación²⁴. El gráfico de cada simulación es similar pero no igual, es decir, todos tienen diferentes puntos de presión en la despresurización y presurización. Todos los procesos PSA con 6 etapas iguales a las diseñadas en este proyecto, generan un gráfico muy similar, como ejemplo tenemos:

²⁴ SANTOS, Mónica; GRANDE, Carlos; RODRIGUEZ, Alírio. Pressure Swing Adsorption for Biogas Upgrading. Effect of Recycling Streams in Pressure Swing Adsorption Design. Portugal: American Chemical Society, 2011. p.977.

Figura 9. Esquema Presión [bar] vs Tiempo [s].

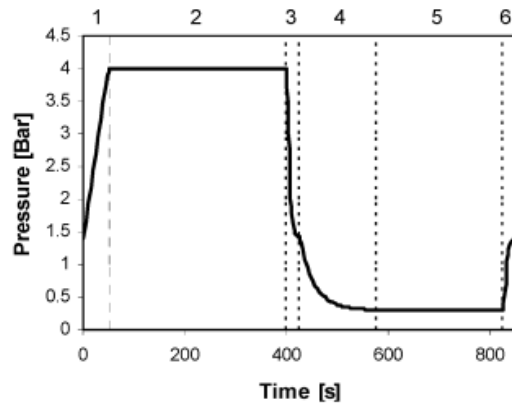
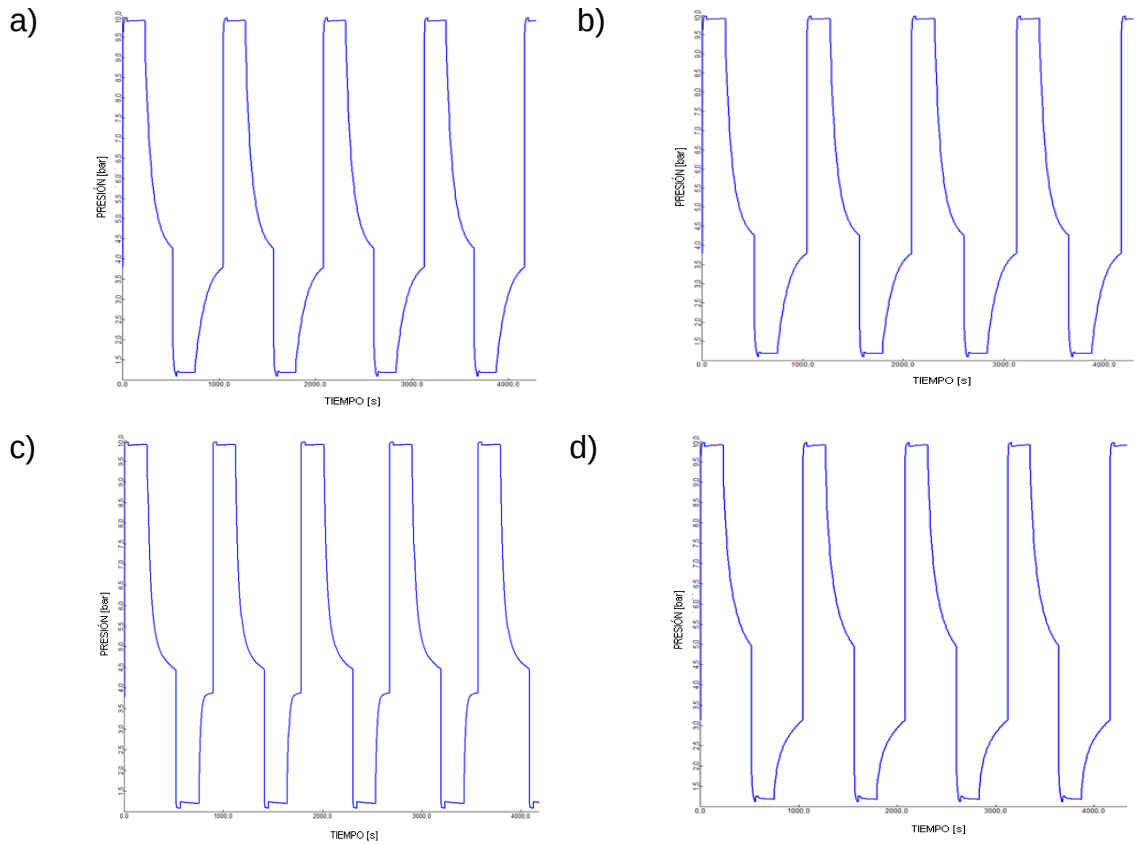


Figura 10. Esquema de la Presión [bar] vs Tiempo [s] a) Desechos agrícolas, b) Desechos industriales, c) Relleno sanitario, d) Lodos cloacales.



3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico se realizó para las tecnologías que cumplen con las especificaciones de calidad de la CREG, siendo en la tecnología de absorción con agua, la realizada con biogás de tipo desechos industriales con un porcentaje de metano de 97.21%. En el Anexo A se muestra el cálculo del costo de los equipos calculados por el método de Guthrie del libro Turton²⁷. En la Tabla 9, se muestra el resumen del valor de los equipos y en la Tabla 10, se evidencia el costo operacional del proceso considerando el consumo de cada equipo.

Tabla 9. Costo de los equipos.

Equipo	Valor [USD]
P-100	4.773,89
K-100	29.836,91
E-100	72.587,57
T-100	974,73
V-100	61.550,28
TOTAL [USD]	169.723,38
TOTAL [COP]	555'708.290,8

Tabla 10. Costo operacional del proceso.

	Consumo	Valor	Valor anual [COP]
Compresor	2,712 KW	482,88 \$/KWh	11'471.833,2
Bomba	1,021 KW	482,88 \$/KWh	4'318.855,2
Agua de enfriamiento	0,14 m ³ /h	2211 \$/m ³	2'711.570,4
Agua de proceso	3,083 m ³ /h	2211 \$/m ³	59'712.627,6
TOTAL CONSUMO ANUAL [COP/Año]			78'214.886,4

²⁷ TURTON, R. et al. Analysis, Synthesis, and Desing of Chemicar Processes, Westford: Prentice Hall, 2008.

En Colombia, actualmente no se comercializa el biogás, por tanto, no existe un precio asociado a éste, por esto, se toma el valor de comercialización del gas natural 1186,52 COP/m³ ya que presenta características similares al biogás. A partir de la simulación, se obtuvo la producción de biogás por hora (97.21% de metano) siendo de 20,31 m³/h, por tanto, el costo de comercialización anual de biogás producido podría ser de 211'100.417,7 COP. A partir de lo anterior, la ganancia anual si se comercializara este biogás sería de 132.885.531,3 COP.

4. CONCLUSIONES

Se diseñaron los sistemas de purificación de biogás por absorción agua y *pressure swing adsorption*, considerando el tipo de biomasa, condiciones de operación y tipo de columna. En el proceso de absorción con agua se usó una presión y temperatura de 10 bar y 27°C, respectivamente; se seleccionó columna empacada como tipo de columna y anillos rashing 3/8 in como tipo de empaque, obteniéndose un diámetro y altura de la columna para cada tipo de biogás. En el proceso PSA se usó una presión de 10 bar y temperatura de 25°C; se construyó un modelado no isotérmico con balance de masa, energía y momento; se emplearon dos lechos fijos ambos con dos tipos de adsorbente (Zeolita 5A y Carbón Activado) ubicados en las dos capas de cada lecho, se eligió la isoterma Langmuir-Freunlich para el equilibrio de adsorción y se emplearon 6 etapas para el proceso cíclico.

Se simularon los procesos de tratamiento de biogás en los programas Aspen Hysys® y Aspen Adsorption®, obteniéndose un porcentaje de purificación de biometano del 97.21% en la tecnología de absorción con agua para el tipo de biogás desechos industriales, cumpliendo con las condiciones reglamentarias para redes interconectadas según la CREG.

Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos en función del porcentaje de purificación de metano, alcanzándose en la tecnología de absorción con agua una purificación mayor al 85% cumpliendo sólo una de las cuatro simulaciones con las condiciones reglamentarias para redes interconectadas, y en la tecnología PSA una purificación mayor al 72% siendo ninguna de las simulaciones aptas para su uso y comercialización. Sin embargo, todas las simulaciones cumplen con las condiciones reglamentarias para comercialización en redes aisladas según la CREG. Se estimaron los costos asociados a la tecnología de purificación que cumple con las

condiciones reglamentarias anteriormente mencionadas, para redes interconectadas, siendo el costo total de los equipos en el proceso de 555'708.290,8 COP y un costo operacional de 78'214.886,4 COP/año.

5. RECOMENDACIONES

- Si se desea ejecutar el proyecto, se recomienda hacer análisis de cromatografía de gases a cada tipo de biogás para determinar con certeza el porcentaje de contaminantes presentes en éste y realizar de nuevo las respectivas simulaciones.
- Se recomienda para la tecnología de *pressure swing adsorption* optar por el uso de otros tipos de adsorbentes y hacer una validación de los parámetros para la isoterma de adsorción seleccionada.
- Se recomienda la evaluación experimental del proceso que cumple con las condiciones reglamentarias según la CREG.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ GUTIERREZ, Noelia. Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de biogás. Tesis doctoral en Ingeniería Energética. Oviedo: Universidad de Oviedo, 2016. p 8.

ARELLANO, Luis, et al. Purificación y usos del biogás. España. Universidad Autónoma de Barcelona, 2017. ISBN 978-84-490-6961-1.

ASPEN TECH. Adsorption reference guide, ADSIM v2004. USA, Abril 2005. p.31.

BEIL, Michael and BEYRICH, Wiebke. Biogas upgrading to biomethane. Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology, Germany: Woodhead Publishing Limited, 2013. p 343-345. DOI: 10.1533/9780857097415.3.342.

COLOMBIA, COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. CREG-017 (8, marzo, 2007). Especificaciones de la calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema de transporte. Bogotá, D.C., 2007. p. 1-2.

COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 240 (06, diciembre, 2016). Por la cual se adoptan las normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con biogás y biometano. Bogotá, D.C., 2016. p. 9-11.

CRISTANCHO, Jorge. Diseño de un sistema para el aprovechamiento del biogás aplicado a la producción de vapor en la cervecería Bavaria Bucaramanga. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2009. p. 67.

DE LA PUENTE PAZOS, Alberto. Validación técnica y económica de sistema de purificación y enriquecimiento de biogás. Tesis de Maestría. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Química, 2017. p 22.

Di Marcoberardino, et al. Life Cycle Assessment and Economic Analysis of an Innovative Biogas Membrane Reformer for Hydrogen Production. Switzerland.: Creative Commons, 2019. p. 3.

DURAND, Alejandro. Reglas heurísticas y criterios para diseño de equipos de procesos. En: Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, A.C. Noviembre-Diciembre.1993. Vol 3. p.3.

GUERRA, María. Aspen HYSYS Property Packages: Overview and Best Practices for Optimum Simulations. España.: AspenTech, 2006.

JENKINS, Scott. Chemical engineering plant cost index: 2018 annual value. [En línea]. Chemical Engineering. New York. Marzo del 2019. Disponible en https://www.chemengonline.com/2019-cepci-updates-january-prelim-and-december-2018-final/#disqus_thread.

LLANO, Nataly. Environmental Justice Atlas: Relleno sanitario (Landfill), El Carrasco, Bucaramanga, Colombia [En línea]. 2014. (Recuperado en 2 abril 2019). Disponible en <https://ejatlas.org/conflict/relleno-sanitario-landfill-el-carrasco-bucaramanga-colombia>.

MALMBERG. The Magic Factory. [En línea]. Sweden. 2017. Disponible en <https://www.malmberg.se/en-us/Insights/The-Magic-Factory> p.1.

MORENO, Betzabet. GROPELLI, Eduardo. CAMOANELLA Enrique. Biogás obtenido de la digestión anaeróbica de diferentes residuos orgánicos: revisión de las principales tecnologías de purificación. Universidad Nacional del Litoral. [en línea], septiembre 2010 [revisado 10 mar., 2018].

QIE, Sun, et al. Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. Jinan, China. El Sevier, 2015. p 522.

REGATTIERI, Alberto. et al. Biogas Micro-Production from Human Organic Waste – A research proposal. Switzerland.: Creative Commons, 2018. p. 10.

REY, M. FONT, R y Aracil, I. iogas from MSW landfill: Composition and determination of chlorine content with the AOX (adsorbable organically bound halogens) technique. España., 2013. p. 3.

RUTHVEN, Douglas M; FAROOQ, Shamsuzzaman y KNAEBEL, Kent S. Pressure Swing Adsorption. Canada: WILEY-VCH, 1994. p 173. ISBN 1-56081-517-5.

SAIN, S, et al. Heuristic design of pressure swing adsorption: a preliminary study. Germany: Indian Institute of Technology. p.28-34.

SANTOS, Mónica; GRANDE, Carlos; RODRIGUEZ, Alírio. Pressure Swing Adsorption for Biogas Upgrading. Effect of Recycling Streams in Pressure Swing Adsorption Design. Portugal: American Chemical Society, 2011. p.977.

SARABIA, Marco. et al. Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. México, 2016. p. 6.

TREYBAL, Robert. Operaciones de transferencia de masa. México: Mc Graw-Hill. p. 224. ISBN 968-6046-34-8.

TURTON, R. *et al.* Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes, Westford: Prentice Hall, 2008.

VELÁSQUEZ, Mario. et al. Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. Bogotá D.C, 2018. p. 24,200.

WOOD, Kevin R; LIU, Y.A y YU, Yueying. Design, simulation and Optimization of adsorptive and Chromatographic Separations. Taiwan: WILEY-VCH, 2018. p 12-13. ISBN 978-3-527-34469-7.

YANG, Jaeyoung; CHANG, Jay-Woo. Separation of Hydrogen Mixtures by a Two-Bed Pressure Swing Adsorption Process Using Zeolite 5A. Korea: American Chemical Society, 1997. p.2-4.

ZHONG, Y, et al. Dynamics of $\text{BaCl}_2\text{-NH}_3$ adsorption pair. Reino Unido: El Sevier, Abril 2009. p.1180.

ANEXOS

Anexo A . Condiciones reglamentarias según la comisión de regulación de energía y gas de Colombia (CREG)

La comisión de regulación de energía y gas (CREG) en su resolución No. 240 de 2016, adopta las normas aplicables al servicio público de gas combustible con biogás y metano²⁵. Por lo tanto, en las tablas 6 y 7 se muestran las especificaciones de calidad para el biogás para redes aisladas e interconectadas^{25,26}.

Tabla 11. Especificaciones de calidad del biogás para redes aisladas.

BIOGÁS PARA REDES AISLADAS		
Especificaciones	Cantidad	Unidad
Poder calorífico inferior	>16	MJ/m ³
Índice de Wobbe	>18	MJ/m ³
CH ₄	>50	mol %
H ₂ S	<20	mg/m ³
Dióxido de carbono	<45	mol%

Tabla 12. Especificaciones de calidad del biogás para redes interconectadas.

BIOGÁS PARA REDES INTERCONECTADAS		
Especificaciones	Sistema Internacional	Sistema Inglés
Máximo poder calorífico bruto (GHV) (Nota 1)	42,8 MJ/m ³	1,150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV) (Nota 1)	35,4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de Líquido (Nota 2)	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg/m ³	0,25 grano/100PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m ³	1.0 grano/100PCS
Contenido CO ₂ , máximo en % volumen	2%	2%
Contenido de N ₂ , máximo en % volumen	3	3
Contenido de inertes máximo en % volumen (Nota 3)	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0,1%	0,1%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m ³	6,0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49 °C	120 °F
Temperatura de entrega mínimo	7,2 °C	45 °F

²⁵ COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 240 (06, diciembre, 2016). Por la cual se adoptan las normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con biogás y biometano. Bogotá, D.C., 2016. p. 9-11.

²⁶ COLOMBIA, COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. CREG-017 (8, marzo, 2007). Especificaciones de la calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema de transporte. Bogotá,D.C., 2007. p. 1-2.

Contenido máximo de polvos y material en suspensión (Nota 4)	1,6 mg/m ³	0,7 grano/1000 pc
---	-----------------------	-------------------

Nota 1. Todos los datos sobre metro cúbico o pie cúbico de gas están referidos a Condiciones Estándar.

Nota 2. Los líquidos pueden ser: hidrocarburos, agua y otros contaminantes en estado líquido.

Nota 3. Se considera como contenido de inertes la suma de los contenidos de CO₂, nitrógeno y oxígeno.

Nota 4. El máximo tamaño de las partículas debe ser 15 micrones.

Para redes interconectadas, son usadas las especificaciones de calidad del gas natural, establecidas en el documento CREG-017 del 8 de marzo de 2007²⁶. Para el biogás proveniente de fuentes residuales, industriales y urbanas, deberán controlar adicionalmente las variables de la tabla 8²⁵.

Tabla 13. Especificaciones especiales para biogás proveniente de fuentes residuales, industriales y urbanas.

Especificaciones	Cantidad	Unidad
Siloxanos	<10	mg/m ³
Compuestos halogenados	<1	mg(Cl)/m ³

Anexo B. Estimación de los costos de los equipos para el proceso de absorción con agua.

Para determinar el costo de los equipos en el proceso, se utilizó el método de Guthrie del libro Turton²⁷. El método de Guthrie para el costo de equipos tiene como ecuación:

$$CE = C_{BM} * CI + CT$$

En el ejercicio de este proyecto se calcularon el valor de los equipos sin el costo de traslado, por lo que la ecuación será:

$$CE = C_{BM} * CI$$

Donde:

$$C_{BM} = Cp^0 * F_{BM}$$

Calculando el costo base del equipo como:

$$\log C_p^0 = K_1 + K_2 \log(A) + K_3 [\log(A)]^2$$

K_1 , K_2 y K_3 : son parámetros empíricos para cada tipo de equipo y característica.

A: capacidad característica del equipo.

La corrección del tiempo se determinó con los datos de CEPCI para los años 2001 y 2018²⁸

$$\text{Índice CEPCI}_{(2001)} = 394.3$$

$$\text{Índice CEPCI}_{(2018)} = 603.1$$

Bomba: El factor del costo modular se calcula por medio de las ecuaciones

$$F_{BM} = B_1 + B_2 F_M F_P$$

$$\log F_A = C_1 + C_2 \log(A) + C_3 [\log(A)]^2$$

Coeficientes para el cálculo de C_p^0		
K_1	K_2	K_3
3.3892	0.0536	0.1538
Coeficientes para el cálculo de F_p		
C_1	C_2	C_3
0	0	0
Constantes de la correlación de Guthrie		
B_1		1.89
B_2		1.35

Fuente: Turton, R [27]

Para el factor F_M se tuvo en cuenta el material de acero inoxidable (SS) ANSI 316 en la bomba para el uso del agua. Leyendo así de la Figura A.18 del apéndice A del libro, para su posterior lectura en la Figura A.3 del apéndice A del libro.

Intercambiador de calor: El material que se utilizará acero al carbón para la carcasa y para los tubos aleación de níquel debido a que por estos pasa el fluido

²⁸ JENKINS, Scott. Chemical engineering plant cost index: 2018 annual value. [En línea]. Chemical Engineering. New York. Marzo del 2019. Disponible en https://www.chemengonline.com/2019-cepci-updates-january-prelim-and-december-2018-final/#disqus_thread.

corrosivo. La ecuación del costo base del equipo se puede utilizar para valores de área entre 10 y 100 m². Si se tienen valores menores o mayores a este intervalo, se debe utilizar la siguiente ecuación de potencia:

$$\frac{C_{p2}^0}{C_{p1}^0} = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^n$$

El factor del costo modular se calcula por medio de las ecuaciones

$$F_{BM} = B_1 + B_2 F_M F_P$$

$$\log F_P = C_1 + C_2 \log(P) + C_3 [\log(P)]^2$$

Coeficientes para el cálculo de C_p^0		
K_1	K_2	K_3
4.3247	-0.3030	0.1634
Coeficientes para el cálculo de F_P		
C_1	C_2	C_3
0.03881	-0.11282	0.08183
Constantes de la correlación de Guthrie		
B_1		1.63
B_2		1.66

Fuente: Turton, R [27]

Compresor: El compresor es usado para elevar la presión de biogás a 10 bar. El compresor usado es de tipo rotatorio.

$$C_{BM} = C_p^0 * F_{BM}^0$$

Coeficientes para el cálculo de C_p^0		
K_1	K_2	K_3
5.0355	-1.8002	0.8253

Fuente: Turton, R [27]

La ecuación del costo base del equipo se puede utilizar para valores de área entre 18 y 950 KW. Si se tienen valores menores o mayores a este intervalo, se debe utilizar la siguiente ecuación de corrección:

$$\frac{C_{p2}^0}{C_{p1}^0} = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^n$$

El valor de F_{BM} es de 5, ya que es necesario usar un material de acero inoxidable debido a que el biogás está compuesto por corrosivos como el dióxido de carbono (CO_2).

Columna de absorción: la columna de absorción empacada, esta compuestas por empaques cerámicos.

$$C_{BM} = Cp^0 * F_{BM}^0$$

Coeficientes para el cálculo de Cp^0		
K_1	K_2	K_3
3.2999	0.9744	0.0055

Fuente: Turton, R [27]

El F_{BM} es el factor de corrección asociado al material por lo que al usar en el proceso compuesto corrosivos deberá usarse acero inoxidable; por lo tanto, el F_{BM} será 3.1

Separador: El separador será de acero inoxidable ya que almacenará fluidos como agua y dióxido de carbono.

$$C_{BM} = Cp^0 * (B_1 + B_2 F_M F_P)$$

Coeficientes para el cálculo de Cp^0		
K_1	K_2	K_3
3.4974	0.4485	0.1074
Constantes de la correlación de Guthrie		
B_1		2.25
B_2		1.82

Fuente: Turton, R [27]