

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA DE INGENIERIA PETROLERA



PROYECTO DE GRADO

**INCREMENTO DEL PODER CALORIFICO DEL BIOGAS
OBTENIDO EN BIODIGESTORES MEDIANTE ADSORCION**

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL
TITULO DE LICENCIATURA EN INGENIERIA EN PETROLEO GAS Y
PROCESOS

POSTULANTE: RONALD HUANCA MACHACA

TUTOR: M. Sc. Ing. RODOLFO MAURICIO ALVAREZ VELASCO

LA PAZ – BOLIVIA

2024



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgencita de Copacabana por darme fuerzas e inteligencia para culminar mis estudios superiores.

A mis padres Gilberto Huanca Mamani, Ignacia Machaca Cayo, mis hermanos Lourdes, Gonzalo, Jhonny y Brayan, mi cuñado Rubén Ángel Choque Mamani, mis sobrinos Darwin y Neyder, a mis tíos Feliciano y Jesusa, expresar mi profunda gratitud y afecto inagotable, mi reconocimiento por su constante respaldo durante el proceso evolutivo de este proyecto que a lo largo de diversas fases lunares, su presencia y apoyo han sido pilares fundamentales, contribuyendo de manera significativa a su desarrollo y mi abuelita Raymunda (+) modelo a seguir y que siempre me apoyaron en mi crecimiento, ahora lo hace desde el cielo.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, y la Virgen de Copacabana por concederme la existencia y el deseo insaciable de conocimiento, permitiéndome así disfrutar de ambas y ser una contribución para mis congéneres. Estos han generado momentos edificantes como desafíos reflexivos, contribuyendo a mi desarrollo personal como individuo beneficioso para la sociedad.

A mi tutor **Ing. Rodolfo Mauricio Álvarez Velasco** por el invaluable respaldo brindado durante la realización de este trabajo, aportando su experiencia. También agradezco al **Ing. Rolando Cespedes Paredes**, director de la Estación Experimental Choquenaira, a la **Ing. María Eugenia Cari Mamani**, Encargada del área de Bioinsumo y Fertilidad de Suelos en la Estación Experimental Choquenaira, quien me asesoró para el uso adecuado del biodigestor, y se ha convertido en mi mentora dentro del ámbito de energías renovables como también una figura destacada en mi trayectoria profesional.

A mis amigos de carrera (Daniela, Emerson, Silvana, Ruben Jhonny, Alvaro, Nestor Gabriel, Rolando) con quienes compartí experiencias tanto académicas, extracurriculares y únicas, haciendo ameno y llevadero nuestro recorrido por la universidad. Esto es para ustedes.

A mis distinguidos **Docentes y administrativos de la Carrera de Ingeniería Petrolera**, les expreso mi gratitud por la formación académica muchas gracias.

A todos ellos les agradezco por la confianza y el tiempo brindado en impartir y difundir conocimiento.

¡¡¡Gracias!!!

ÍNDICE

CAPITULO I – GENERALIDADES	16
1.1 INTRODUCCIÓN	16
1.2 ANTECEDENTES	17
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.3.1 Identificación del problema	19
1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.5 OBJETIVOS Y ACCIONES DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.5.1 Objetivo general	20
1.5.2 Objetivos específicos	20
1.6 JUSTIFICACIÓN	20
1.6.1 Justificación técnica	20
1.6.2 Justificación económica	21
1.6.3 Justificación social	21
1.6.4 Justificación medio ambiental.....	21
1.7 ALCANCE.....	22
1.7.1 Alcance temático.....	22
1.7.2 Alcance geográfico	22
1.8 Alcance temporal	22
CAPITULO II – MARCO TEÓRICO	23

2.1	BIODIGESTORES.....	23
2.1.1.	Tipos de Biodigestores.....	24
2.2.	BIOGAS.....	29
2.2.1.	Características del biogás.....	30
2.2.2.	Composición del Biogás	30
2.2.3.	Materia prima.....	31
2.2.4.	Naturaleza y composición bioquímica de materias primas.....	32
2.2.5.	Fermentación.....	35
2.2.6.	Fermentación metanogénica	36
2.2.7.	Condiciones determinantes para la generación de biogás en procesos metanogénicos.....	41
2.2.8.	Respiración anaeróbica	42
2.2.9.	Naturaleza y composición bioquímica de materias primas.....	42
2.2.10.	Relación carbono/nitrógeno de las materias primas	42
2.2.11.	Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles.....	44
2.2.12.	Temperatura	45
2.2.13.	Tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica	46
2.2.14.	Rangos de pH y alcalinidad	48
2.2.15.	Uso del Biogás	49

2.2.15.3. Combustible para Vehículos	51
2.2.16. Beneficios Adicionales	55
2.3. PODER CALORÍFICO	56
2.3.1. Tipos de poder calorífico	56
2.3.2. Poder calor calorífico superior	56
2.3.3. Poder calorífico inferior	57
2.3.4. Importancia del Poder Calorífico	58
2.3.5. Determinación del poder calorífico.....	58
2.3.6. Método Analítico	59
2.3.7. Método Práctico	59
2.3.8. Método del Calorímetro de Bomba.....	59
2.4. ADSORCIÓN	60
2.4.1. Factores influyentes en la adsorción	63
2.4.2. pH.....	63
2.4.3. Temperatura	63
2.4.4. Área superficial	64
2.4.5. Tamaño del poro	64
2.4.6. Naturaleza del tamaño.....	64
2.4.7. Tipos de adsorbentes	64
2.4.8. Carbón activado	65

2.4.9. Lana de hierro	65
2.4.10. Gel sílice	66
2.4.11. Tierra vegetal	66
2.4.12. Aplicaciones industriales de la adsorción	67
2.5. Remoción del CO ₂	68
2.6. Remoción de agua.....	69
2.7. Remoción del sulfuro de hidrogeno (H ₂ S).....	69
2.8. Adsorción con tecnología de oscilación de presión (PSA).....	69
CAPITULO III – APLICACIÓN PRÁCTICA.....	71
3.1 APLICACIÓN PRACTICA	71
3.2 Calculo para la carga de materia orgánica al biodigestor.	73
3.3 Cálculo para la producción del biogás.....	76
3.4 Muestra inicial de biogás	77
3.5 Contenido de H ₂ S previo al tratamiento.....	78
3.6 Contenido de CO ₂ previo al tratamiento	78
3.7 Determinación del poder Calorífico del biogás original (previo al tratamiento), a partir de estiércol bovino.....	79
3.7.1. Determinación del poder Calorífico del biogás original (previo al tratamiento), a partir de estiércol porcino.	79
3.7.2. Adsorción con Carbón Activado.....	80

3.7.3. Determinación del poder Calorífico del biogás resultante, a partir de estiércol porcino.....	81
3.8. Método de adsorción (implementación de filtros).....	81
3.9. Simulación Aspen Adsorption.....	82
3.9.1. Interfaces Aspen Adsorption.....	83
3.9.2. Selección de componentes.....	84
3.9.3. Configuración de lecho adsorbente.....	86
3.9.4. Especificación del Gas_Bed.....	91
3.9.5. Organizador de ciclos.....	92
3.10. Simulación en Aspen Adsorption.....	92
3.10 Cálculo de producción de electricidad por unidad de biogás.....	103
CAPÍTULO IV – ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO.....	108
4.1 ANÁLISIS TÉCNICO.....	108
4.1.1. Descripción del proyecto.....	108
4.1.2. Estudio de viabilidad técnica.....	108
4.1.3. Impacto ambiental.....	108
4.1.4. Ventajas de la producción de biogás.....	110
4.1.5. Desventajas de la producción de biogás.....	110
4.1.6. Análisis económico.....	111
CAPÍTULO – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	122

5.1	CONCLUSIONES.....	122
5.2	RECOMENDACIONES	123
	BIBLIOGRAFÍA	124
	ANEXOS	129

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición del biogás.....	31
Tabla 2 Composición del estiércol bovino	32
Tabla 3 Características de los residuos	33
Tabla 4 Composición química de diversos residuos de origen animal y vegetal (valores promedios, base seca)	34
Tabla 5 Rango de niveles de nutrientes en diversos residuos de origen animal y vegetal.....	34
Tabla 6 Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.....	43
Tabla 7 Rango de solidos volátiles y solidos totales de estiércol animal	44
Tabla 8 Tiempo de retención	46
Tabla 9 Carga total al biodigestor.....	75
Tabla 10 Disponibilidad de estiércol para la producción de biogás	76
Tabla 11 Cromatografía del biogás de muestra inicial	78
Tabla 12 Contenido de H ₂ S.....	78
Tabla 13 Contenido de CO ₂ inicial	78
Tabla 14 Contenido del biogás	79
Tabla 15 Biogás composición.....	80
Tabla 16 Biogás obtenido por adsorción	80
Tabla 17 Muestra inicial del biogás.....	93
Tabla 18 Especificaciones del flujo de alimentación.....	94
Tabla 19 Especificaciones para el lecho	94
Tabla 20 Especificaciones del adsorbente (carbón activado)	95

Tabla 21 Parámetros de la isoterma para el lecho	96
Tabla 22 Valores iniciales del primer nodo del lecho.....	96
Tabla 23 Valores de entrada y salida de válvula	98
Tabla 24 Especificaciones y valores del producto.....	99
Tabla 25 Concentración del biogás simulado en Aspen Adsorption.	102
Tabla 26 Poder calorífico iniciales y resultantes	102
Tabla 27 Producción de electricidad por unidad de biogás	107
Tabla 28 Costo de un filtro de adsorción con carbón activado y lana de hierro....	112
Tabla 29 CAPEX inicial	113
Tabla 30 Costo de un biodigestor finalizado	113
Tabla 31 OPEX inicial.....	116
Tabla 32 OPEX final.....	116
Tabla 33 Poder calorífico final	122
Tabla 34 Valores obtenidos del simulador aspen adsorption	123

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Biodigestor modelo horizontal, tipo semicontinuo.	23
Figura 2 Biodigestor de tipo continuo	25
Figura 3 Biodigestor de domo fijo.....	26
Figura 4 Biodigestor modelo chino	27
Figura 5 Biodigestor modelo indio.....	27
Figura 6 Biodigestor de modelo horizontal	28
Figura 7 Biodigestor tipo batch	29
Figura 8 Etapas de la fermentación metanogénica	37
Figura 9 Proceso de obtención de biogás	38
Figura 10 Interpretación grafica del poder calorífico superior.....	57
Figura 11 Interpretación grafica del poder calorífico inferior.....	58
Figura 12 Componentes del fenómeno de adsorción.....	62
Figura 13 Tecnología PSA	70
Figura 14 Estación Experimental Choquenaira, Municipio Viacha	73
Figura 15 Muestra inicial de biogás	77
Figura 16 Materiales.....	82
Figura 17 Interface inicial Aspen Adsorption	84
Figura 18 Configuración de componentes.....	85
Figura 19 Selección de componentes y métodos con la ayuda de las propiedades de Aspen.	86
Figura 20b Crear ventana de lista de componentes.....	86
Figura 21 Opciones de modelo disponibles en Gas: ventana dinámica	87
Figura 22 Ventana de configuración de la columna de adsorción.....	87

Figura 23 Pestaña general de la ventana de configuración.....	88
Figura 24 Pestaña Kinetic Model de la ventana de configuración	89
Figura 25 Pestaña Isotherm de la ventana de configuración	90
Figura 26 Pestaña Energy Balance de la ventana de configuración	91
Figura 27 Specify para el lecho	91
Figura 28 Presets/Initials para el lecho	92
Figura 29 Circuito completo de simulación	92
Figura 30 Especificaciones de la alimentación.....	93
Figura 31 Configuración del Lecho.....	97
Figura 32 Valores del lecho y adsorbente	97
Figura 33 Válvula de entrada.....	98
Figura 34 Válvula de salida	98
Figura 35 Especificaciones del producto.....	99
Figura 36 Resultado de la simulación.....	100
Figura 37 Comportamiento de los componentes	101
Figura 38 Filtro de remoción de PVC	115

SIMBOLOGÍA UTILIZADA

GLP	Gas Licuado de Petroleo
DDV	Derecho de Vía
Km	Kilómetro
Kp	Progresiva
MM	Millones (10 ⁶)
MPC	Millar de pies cúbicos (1.000 PC)
Nº	Número
PCD	Pie cúbico por día
Plg, ”	Pulgada
PSI	Libras por pulgada por cuadrada (lbf/in ²)
Psia	Presión absoluta
Psig	Presión manométrica

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto “Incremento del poder calorífico del biogás obtenido en biodigestores mediante adsorción”, se enfoca en el biogás producido a partir de la descomposición anaeróbica de materia orgánica, representa una fuente de energía renovable de gran potencial. Sin embargo, su uso está limitado por su bajo poder calorífico, lo que reduce su eficiencia como combustible.

Se realizó un experimento en la Estación Experimental Choquenaira, dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), ubicado en el municipio de Viacha, en esta investigación se utilizaron distintos materiales adsorbentes, como zeolitas, carbón activado y limaduras de hierro, que fueron incorporados a un filtro de PVC. Se analizaron las variaciones en la composición del biogás, así como su poder calorífico antes y después del tratamiento.

Además, se empleó el software Aspen Adsorption, cuyo principal objetivo es reducir el CO₂ para aumentar el porcentaje de metano. La incorporación en el software, de materiales con alta capacidad de adsorción, como el carbón activado, la zeolita y la sílica, permite que este simulador obtenga resultados positivos para lograr un biogás de mayor calidad.

Los resultados indican un aumento significativo en el poder calorífico del biogás tratado. El uso de zeolitas, carbón activado y limaduras de hierro en comparación con el biogás no tratado. Estos hallazgos sugieren que la adsorción puede ser una estrategia efectiva para mejorar la calidad del biogás.

La adsorción se presenta como una solución viable para incrementar el poder calorífico del biogás, lo que facilita su aplicación como combustible en diversas industrias y en el ámbito doméstico. Este enfoque no solo optimiza el aprovechamiento de recursos renovables, sino que también contribuye de manera significativa a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y mitigación del cambio climático. En conclusión, el proyecto no solo representa un avance en el aprovechamiento del biogás como fuente de energía, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones y aplicaciones en el campo de la energía renovable.

CAPITULO I – GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

La generación de biogás constituye un procedimiento de notable interés en el ámbito de la recuperación de nutrientes y energía renovable a partir de distintos flujos de desechos orgánicos. Este proceso resulta atractivo en tanto permite la producción de productos químicos de valor añadido mediante cultivos mixtos, así como su aplicación en sistemas integrados de producción de bioenergía. En este contexto, se exponen estrategias y oportunidades destinadas a la mejora tanto de la calidad como de la cantidad de biogás obtenido.

El biogás puede llegar a ser empleado como combustible en las cocinas, calefacción o iluminación reemplazando al gas domiciliario o al gas licuado de petróleo (GLP). El biogás obtenido de los biodigestores tiene un poder calorífico aproximado de 5.0 a 5.5 Kcal/m³ que en comparación al gas natural de un poder calorífico de 9.185 Kcal/m³ aproximadamente es menor lo que provoca que la flamabilidad de este biogás sea menor.

Cabe aclarar que el poder calorífico aprovechable del biogás depende en gran medida del rendimiento de los equipos diseñados para funcionar con este combustible. Por lo tanto, la mejora de la tecnología de combustión y la optimización de los sistemas de utilización del biogás son aspectos clave para aumentar su viabilidad como fuente de energía renovable para así coadyuvar en la implementación de nuevas fuentes de energía al país.

Entre los materiales a utilizar está principalmente la zeolita que es un mineral micro poroso en cuya superficie porosa atraparán partículas de CO₂ y H₂S o las demás impurezas y cuyos yacimientos en el departamento de Oruro en occidente y en Chuquisaca en el sur del país hacen una fuente accesible del mismo además de tener al carbón activado y las limaduras de hierro como alternativa a la zeolita.

Finalmente, la generación de biogás no solo ofrece una solución para la gestión de desechos orgánicos, sino que también abre coadyuva para la producción de energía renovable. A medida que se desarrollen nuevas tecnologías y se implementen estrategias efectivas, el biogás podría convertirse en un recurso energético más competitivo y sostenible, favoreciendo tanto a las comunidades locales como al medio ambiente.

1.2 ANTECEDENTES

Los primeros biodigestores que se tienen registrados datan de finales del siglo XIX en la India en donde para contrarrestar las bajas temperaturas se utilizaba la calefacción con suministro de estiércol y material vegetal de la zona los cuales se introducían a estos pequeños biodigestores elaborados a base de arcilla en estructuras similares a hornos de ladrillos. (CONCYTEG, 2006)

Ya de manera mejor elaborada y con un uso masivo en Alemania a inicios del siglo XX en 1906 el ingeniero Karl Imhoff diseña una estructura en forma de cono cuya finalidad era la de realizar un estudio a la sedimentación de las aguas residuales en plantas de tratamiento, llamados tanques estas estructuras contaban con una zona de sedimentación y una zona de digestión de lodos. (Salas, 2020)

Previo al inicio de la Segunda Guerra Mundial en muchas zonas de Asia se aumentó la construcción de biodigestores para satisfacer aspectos sanitarios y ya al finalizar la contienda bélica (1950) se necesitaban alternativas para el alcance de la población con pocos recursos económicos para cuestiones de iluminación y cocción de alimentos. (Rodriguez Alvarez, 2012)

En Bolivia se elabora el primer proyecto para biodigestores en el año 2002 teniendo como límite la altitud de 2000 m.s.n.m. en Cochabamba, luego de realizar estudios se elaboran proyectos a altitudes del departamento de La Paz siendo exitosos en su ejecución y a partir de ahí se han ido implementando en diferentes zonas rurales. (Hivos People Unlimited, 2013)

Para los contaminantes sólidos del biogás se han desarrollado filtros que funcionan como colectores de partículas, mientras que para gases están métodos de lavado, secado y adsorción el CO₂ requiere de altas presiones y bajas temperaturas, incluso es mejor llegar a la condensación ya que el metano puede separarse de forma líquida. (Hilbert & Eppel, 2007)

Respecto al tratamiento del biogás este ha ido tomando mayor importancia debido a que puede ser tomado como combustible o como materia prima, en ambos casos debe ser desprovisto de las impurezas que posee, se han desarrollado métodos como ser la absorción reactiva y procesos biológicos que llevan estas impurezas a grados menos nocivos. (Boivin & Abatzoglou, 2008)

Otro método llamado Depuración del Biogás consta de tres unidades, la primera donde se elimina el ácido sulfhídrico H₂S, la segunda donde se extrae el dióxido de carbono CO₂ y la última donde se captura la humedad, materiales como gel de sílice ayudan a la eliminación del vapor de agua. (Babu Nallamothe, 2013)

El aumento del poder calorífico por adsorción es una mejora con presencia de minerales o materiales aptos como el biocarbono se logra eliminar el dióxido de carbono a través de columnas interconectadas que al realizar el análisis cromatográfico final se demuestra mayor presencia de metano CH₄. (International Journal of Environmental Science And Development, 2018)

El 10 de mayo de 2011 se inauguró el primer Centro de Investigación de Biodigestores, Biogás y Biol (CIB3) en Bolivia, teniendo como socios fundadores a la Cooperación Técnica Alemana - GIZ; la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), a través del Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ) y del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Recursos Naturales (IIAREN); el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) de España y el Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles de Bolivia (CPTS). (EnDev, 2011)

El Centro de Investigación en Biodigestores, Biogás y Biol(CIB3) está situado en Viacha (Bolivia), en el Altiplano, a 22km de la ciudad de La Paz. Se ubica a 3884 metros sobre el nivel del mar (msnm) en una región de clima frío barrido por vientos fuertes y fríos, y tiene un clima frío árido, con grandes diferencias de temperatura diaria. Las temperaturas promedio máximas durante el día varían entre 15 a 20 ° C y las mínimas promedio van desde -15 a 3 ° C, con una presión atmosférica de alrededor de 460-500 mm Hg. (RIIARn, 2014)

Los estudios acerca de la geología del área de Corque, localizada a 68 Km. de la ciudad de Oruro, sobre la carretera Toledo-Huachacalla, describen un nivel de rocas blanquecinas ubicado en la parte superior de una unidad de areniscas y limolitas definidas como Formación Huayllamarca de edad Terciaria. Este nivel con clara expresión de “dique” contiene zeolitas del tipo MORDENITA. Según estos autores, el material zeolítico ha sido derivado de la alteración hidrotermal del dique de composición inicial dacítica y según Rivas (2002) su potencial de reservas sería de aproximadamente unas 1000 Toneladas. (BOMGEAM, 2017)

El primer yacimiento de zeolita natural boliviana se encuentra cerca de la localidad de Corque, a 68 Km de la ciudad de Oruro, Bolivia. Estudios preliminares de algunos autores indican la ocurrencia de mordenita natural en este depósito [12]. Esta muestra es denominada MORN (Mordenita Natural). (Quimica, 2019)

El segundo yacimiento zeolítico se encuentra en Sucre-Bolivia, a 23 Km de la ciudad en la Comunidad Señor de Maica. Este yacimiento es denominado "La Calera", estudios mineralógicos preliminares indican la ocurrencia de la fase zeolítica tipo Clinoptilolita [13]. La denominación de esta muestra es CLIN (Clinoptilolita Natural). (Quimica, 2019)

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Identificación del problema

El biogás obtenido en los reactores de biogás tiene un contenido promedio de metano de 55 a 75% y un poder calorífico de aproximadamente 6 a 6.5 kWh/m³. (Elizabeth Tilley, 2018)

El biogás obtenido de los biodigestores presenta impurezas como el dióxido de carbono CO₂, el ácido sulfhídrico H₂S y demás componentes que influyen en el bajo poder calorífico.

Los principales componentes del Biogás son metano y dióxido de carbono, aunque también contiene contaminantes tales como ácido sulfhídrico y siloxanos. La presencia de tales compuestos diferentes al metano constituye un problema ya que son perjudiciales para cualquier equipo de procesamiento de biogás y producen emisiones contaminantes. Por lo tanto, es importante incluir etapas de purificación antes de utilizar el biogás. (Morero, Gropelli, & Campanella, 2010)

Debido al bajo poder calorífico que posee el biogás este no llega a tener una alta flamabilidad no llegando a cumplir el requerimiento establecido por las normativas como el D.S. N° 27505 y por esta razón es difícil realizar una transición energética que coadyuve al uso de energías alternativas teniendo como base material orgánico desechado en el sector agricultor especialmente para lo cual se propone realizar una adecuación de este biogás eliminando las impurezas presentes por medio de métodos de adsorción.

La zeolita que es un mineral micro poroso en cuya superficie porosa, nos puede ayudar como agente de adsorción para atrapar partículas de dióxido de carbono CO₂ y el ácido sulfhídrico

H₂S o las demás impurezas que están presentes en el biogás, y de esa forma incrementar el poder calorífico. Además, se tiene al carbón activado y las limaduras de hierro como alternativa a la zeolita.

La zeolita se utiliza para secar aire comprimido. Funciona como desecante para adsorber humedad. Puede retener hasta una cuarta parte de su peso en agua sin un incremento significativo en la presión de vapor. ((MD-12), 1999)

1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es posible aumentar el poder calorífico del biogás eliminando impurezas como el dióxido de carbono (CO₂) o ácido sulfhídrico (H₂S) empleando el método de adsorción?

1.5 OBJETIVOS Y ACCIONES DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo general

- Evaluar el poder calorífico del biogás obtenido mediante métodos de adsorción empleando principalmente zeolita y carbón activado como adsorbente del CO₂ y H₂S.

1.5.2 Objetivos específicos

- Comprender las características de la obtención y procesamiento del biogás.
- Obtener Biogás en un biodigestor.
- Procesar el Biogás mediante adsorción.
- Determinar el poder calorífico del Biogás procesado.
- Realizar la evaluación técnica económica.

1.6 JUSTIFICACIÓN

1.6.1 Justificación técnica

En la actualidad el biogás generado por biodigestores tiene un bajo poder calorífico lo que lo hace poco atractivo para el consumo al tener que compararlo con combustibles gaseosos como el gas natural o el domiciliario que básicamente es metano.

Al utilizar métodos de adsorción se debe tener en cuenta materiales aptos para el desarrollo de la investigación como ser la zeolita presente en yacimientos como el de la localidad de Corque en el departamento de Oruro.

La materia prima de los biodigestores (estiércol y desechos varios de animales) usualmente no es utilizado más que como abono para la tierra pudiendo tener ahí una fuente directa para poder generar biocombustible. Los lugares beneficiados inicialmente serían las mismas localidades en donde se generaría la materia prima pudiendo expandirse el beneficio a áreas mucho más grandes previa elaboración de plantas aptas para el proceso.

El desarrollo de esta investigación permitirá establecer criterios y mejoras en la generación de biogás con la propuesta de construcción de un modelo de biodigestores que va a minimizar costos, traerá consigo mayores beneficios y evitará el consumo excesivo de los recursos naturales usados como combustibles fósiles para generar energía como materia prima o van a otra unidad de tratamiento.

1.6.2 Justificación económica

Esta investigación permitirá dar solución al problema del déficit energético y ecológico, que tienen principalmente las zonas rurales; difundiendo entre los pobladores y de todo el distrito el uso de la biomasa como materia prima para la obtención de biogás.

Los biodigestores necesitan de financiamiento ya sea externo o por emprendimiento propio conjuntamente con asesoramiento técnico apropiado.

Si los pobladores de las zonas rurales llegan a utilizar este biogás como fuente de energía alternativa llegaría a reducir recursos económicos tanto para las familias como para el estado.

1.6.3 Justificación social

La utilización de los biodigestores además de permitir la producción de biogás ofrece enormes ventajas para la transformación de desechos por lo cual concientizar a la población sobre el uso de estos, permitirá un aprovechamiento de los desechos orgánicos.

1.6.4 Justificación medio ambiental

La solución para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, disminución en el uso de combustibles fósiles, disminución de contaminantes orgánicos en aguas residuales y la eliminación de vectores transmisores de enfermedades es el uso de biodigestores para producir biogás, lo que resulta económicamente accesible al uso doméstico.

Con este biogás lo que se quiere es realizar un aporte de una eficiencia y transición energética.

1.7 ALCANCE

1.7.1 Alcance temático

El presente proyecto requiere del conocimiento de los siguientes tópicos:

- Ingeniería de gas
- Procesos químicos
- Transición energética
- Costos y presupuestos
- Evaluación de proyectos

1.7.2 Alcance geográfico

En la región de Choquenaira del municipio de Viacha dependiente de la Universidad mayor de San Andrés de la facultad de agronomía se produce Biol y Biogás, lo que nos permite tener una fuente segura para obtener el Biogás.

Los yacimientos Zeolita se encuentran en los departamentos de La Paz en la localidad de Charaña, en Oruro en la localidad de Corque, y en Chuquisaca en la comunidad Señor de Maica.

Se evaluará el biogás producido por los biodigestores existentes en los municipios del departamento de La paz como, por ejemplo:

- Municipio de Viacha (Choquenaira)

1.8 Alcance temporal

El presente proyecto se desarrollará en el lapso de 6 meses a partir de la aprobación de perfil.

CAPITULO II – MARCO TEÓRICO

2.1 BIODIGESTORES

Un biodigestor es un dispositivo diseñado para la descomposición anaeróbica de materia orgánica, como residuos vegetales, estiércol animal, alimentos no consumidos y otros desechos orgánicos. Su objetivo principal es generar biogás y fertilizantes naturales. Además del biogás, el biodigestor produce un subproducto líquido conocido como digestato, que es rico en nutrientes y puede usarse como fertilizante natural en la agricultura.

Los biodigestores son sistemas diseñados para la digestión anaeróbica de materia orgánica, lo que permite la producción de biogás y el tratamiento de residuos. Estos sistemas son utilizados para convertir residuos orgánicos en energía renovable (biogás) y en un fertilizante líquido (biol) y sólido (biosol).

Los biodigestores ofrecen una solución efectiva para la gestión de residuos orgánicos y la generación de energía renovable, siendo una tecnología adaptable a diferentes escalas y tipos de residuos.

Figura 1 *Biodigestor modelo horizontal, tipo semicontinuo.*



Fuente: Biodigestor de la Estación Experimental de Choquenaira UMSA-Agronomía

2.1.1. Tipos de Biodigestores

En este caso, la relación entre la producción de biogás y los biodigestores sigue una evolución temporal que coincide con el crecimiento de los microorganismos involucrados. Es decir, los biodigestores tienen un tiempo específico para la digestión de las sustancias, pero no para su retención.

Para optimizar la producción de biogás, es esencial utilizar varios reactores que se operen de manera intercalada a lo largo del tiempo.

Mencionamos a continuación los tipos de biodigestores que existen:

- Biodigestores de flujo discontinuo
- Biodigestores de flujo continuo y semicontinuo
- Biodigestores de mezcla completa
- Biodigestores de mezcla parcial

2.1.1.1. Biodigestores de flujo discontinuo

Son recipientes sellados en los que el proceso de biodegradación de los residuos continúa hasta que se ha generado la máxima cantidad posible de biogás. Una de sus ventajas es que pueden manejar grandes cantidades de materiales con un bajo consumo de agua. Por ello, son especialmente adecuados para residuos muy sólidos, como los generados por ganado vacuno con lecho de paja.

Los biodigestores discontinuos o por lotes son contenedores cerrados en los que no se permite añadir o retirar sustratos una vez que se ha comenzado el proceso hasta que se complete la biodegradación y producción de biogás. Es decir, el proceso finaliza cuando ya no se genera más biogás.

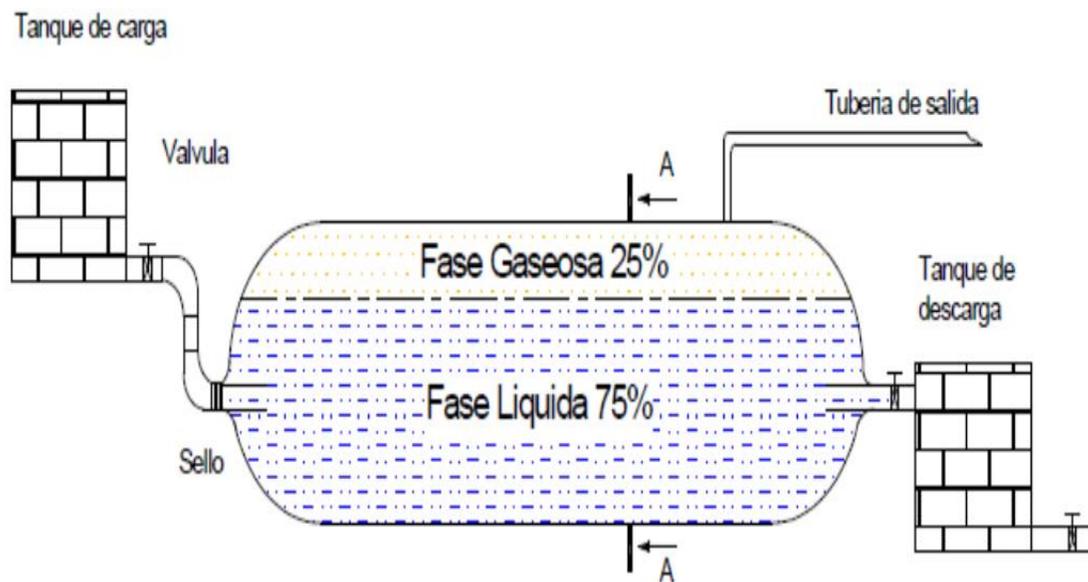
Este tipo de digestores permite manejar una mayor carga de materiales menos diluidos, lo que reduce la necesidad de agua en comparación con los sistemas continuos. Además, no se ven afectados por la presencia de materiales pesados como tierra o arena.

Al inicio y al final del proceso, la producción de biogás es significativamente menor debido a la falta de condiciones óptimas para los microorganismos anaeróbicos al comienzo, y al agotamiento de los nutrientes necesarios para ellos hacia el final.

2.1.1.2. Biodigestores de flujo continuo y semicontinuo

Este tipo de biodigestores se cargan diariamente con una cantidad relativamente pequeña en comparación con el volumen total del sistema. A diferencia del sistema discontinuo, las cargas y descargas se efectúan en intervalos específicos durante el proceso de producción de biogás, el cual generalmente proporciona nutrientes para las comunidades bacterianas. Uno de los usos principales de estos biodigestores es la purificación de agua contaminada. Existen tres tipos básicos según su diseño:

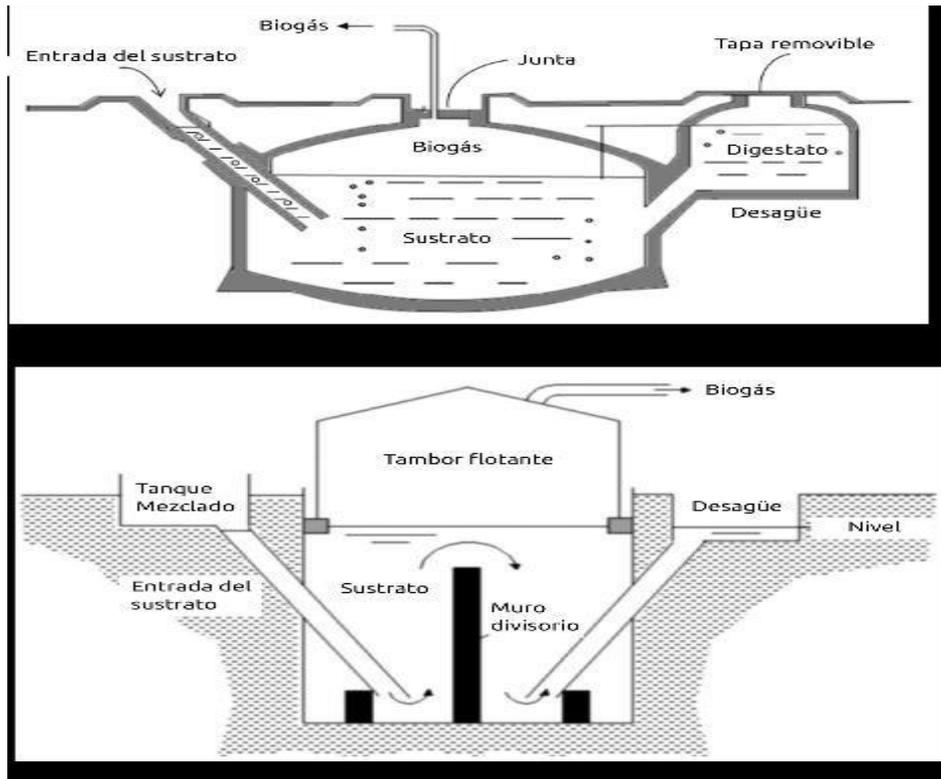
Figura 2 Biodigestor de tipo continuo



Fuente: (Changaro, 2010)

- Biodigestor de globo o salchicha.
- Biodigestor de domo fijo.
- Biodigestor de domo flotante.

Figura 3 Biodigestor de domo fijo



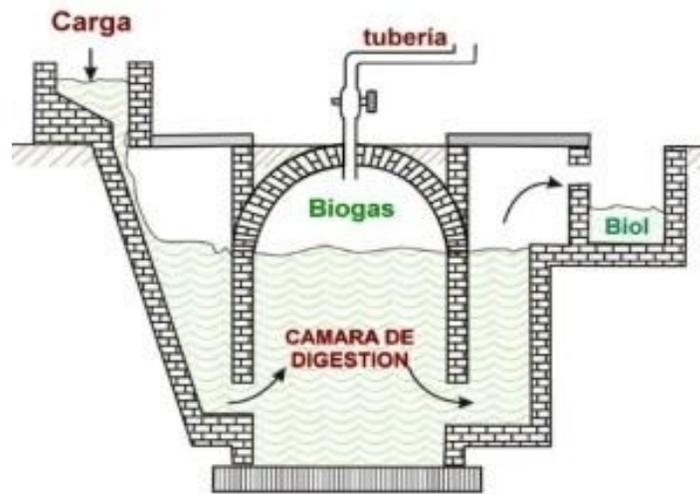
Fuente: (Garfi, 2016)

2.1.1.3. Biodigestores de mezcla completa

Este tipo de biodigestores se caracteriza porque necesita que se le añada carga periódicamente, que se mezcla con el contenido ya existente. Esta mezcla hace que parte del material salga en el efluente sin haberse degradado completamente. Existen dos tipos esenciales de estos biodigestores:

El modelo chino es una estructura cerrada de cemento armado o ladrillos, que puede llegar a tener unos 15 años de vida útil. Cuenta con cámaras de carga y descarga. Necesita un gasómetro para contener el volumen de gas generado.

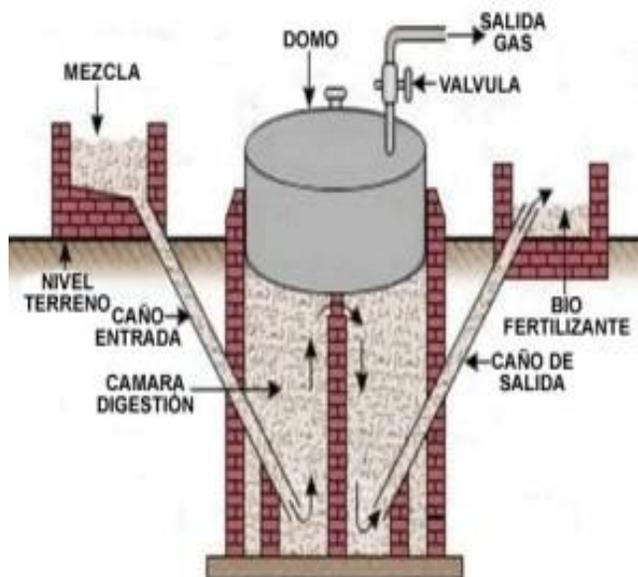
Figura 4 *Biodigestor modelo chino*



Fuente: (Inglese, 2018)

El modelo indio tiene una campana que sube y baja dependiendo del volumen de gas generado. Su principal ventaja es que no necesita un gasómetro, ya que el gas se mantiene a una presión relativamente constante en el interior.

Figura 5 *Biodigestor modelo indio*



Fuente: (Inglese, 2018)

2.1.1.4. Biodigestor de flujo pistón

Estos biodigestores tienen una cámara de digestión alargada, lo que permite que la degradación de los residuos ocurra mientras estos se desplazan a lo largo del digestor. Dentro de esta categoría se incluyen los digestores familiares de bajo costo.

- Modelo horizontal

Este tipo de digestor es esencialmente un tubo horizontal con cámaras de carga y descarga ubicadas en sus extremos. Su diseño alargado evita que la carga líquida inicial se mezcle con el efluente, lo que resulta útil para tratar residuos que necesitan un tratamiento extendido, como excretas humanas y ciertos residuos de sacrificio de animales.

Figura 6 Biodigestor de modelo horizontal



Fuente: (GEOTECSIM, 2019)

- Modelo horizontal a bajo costo

Los biodigestores familiares de bajo costo, comunes en países en desarrollo, son fáciles de instalar debido a que se fabrican con grandes bolsas de polietileno tubular. Generalmente se colocan en una especie de trinchera y tienen una vida útil de aproximadamente cinco años.

Además de los modelos estándar mencionados en este documento, existen diversas variantes que presentan diferencias en forma, tamaño, continuidad del flujo y materiales de construcción.

Figura 7 *Biodigestor tipo batch*



Fuente: (GEOTECSIM, 2019)

2.2. BIOGAS

El biogás es un tipo de biocombustible gaseoso producido a través de la fermentación anaeróbica (en ausencia de aire) de desechos orgánicos de origen animal o vegetal, dentro de determinados límites de temperatura, humedad y acidez. El principal gas combustible del biogás es el metano el que debe encontrarse por sobre el 45% de la composición total del biogás para que éste sea inflamable.

Su pureza y calidad dependen de la cantidad de metano que contenga, ya que cuanto mayor es el porcentaje de este elemento más puro y de mayor poder calorífico es el biogás. (Bernal, 2001)

El biogás proviene de la biomasa, más particularmente, proviene de un proceso biológico en el que se descompone la materia orgánica en productos gaseosos, (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.) y en una mezcla de minerales (N, P, K, Ca, etc) llamado digestato. Este proceso de descomposición se hace de manera anaerobia y tiene un alto atractivo en numerosos sectores del mercado rural. Tanto en el mundo de la ganadería como en el de la gestión de aguas residuales, la materia orgánica abunda y su digestión es crucial. Es importante resaltar, que actualmente la digestión de estos residuos orgánicos trae muchos beneficios a la planta de ganadería o de aguas residuales. La digestión anaerobia reduce enormemente los malos olores

mineralizando los residuos. Además, facilita el transporte de estos aligerándolos y compactándolos. La mayor ventaja de esta digestión, y la que es motivo de interés en este trabajo es la capacidad de generación de productos gaseosos. Unos productos gaseosos con concentraciones de en torno a 50-70% de metano.

El biogás ofrece una opción valiosa para la generación de energía a partir de recursos renovables y la gestión de residuos, con aplicaciones tanto a nivel doméstico como industrial.

2.2.1. Características del biogás

La lista de factores que distinguen el biogás y los biodigestores de otras energías incluye:

- La poca capacidad contaminante, lo convierte en un efectivo sustituto de los derivados del petróleo
- Permite generar electricidad
- Con la purificación del biogás, el biometano puede ser un sustituto del gas natural y neutro en carbono.
- El biogás y los biodigestores son una fuente de ingresos para los agricultores, que pueden sacar beneficio de los residuos que genera su actividad
- Es un elemento clave en la generación de fertilizantes
- Es una manera efectiva de optimizar el uso de los vertederos
- Permite revertir los residuos en energía limpia

2.2.2. Composición del Biogás

El biogás normalmente contiene:

- **Metano (CH₄):** 50-70%. El principal componente energético del biogás.
- **Dióxido de Carbono (CO₂):** 30-50%. No es combustible, pero está presente en grandes cantidades.
- **Otros Gases:** Incluyen trazas de hidrógeno (H₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), y amoníaco (NH₃), que pueden ser contaminantes o tener valor energético.

Tabla 1 *Composición del biogás*

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% Dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: (Steinhauser, 2008)

2.2.3. Materia prima.

La materia prima puede ser: residuos agrícolas, como estiércol animal y restos de cosecha; desechos orgánicos municipales, como lodos de depuradoras o desperdicios de alimentos; y restos orgánicos industriales. Lo que sí es indispensable es que esta materia prima se encuentre debidamente separada de otros tipos de residuos.

En el caso de muchas de las materias primas mencionadas, la presencia de compuestos de lenta degradación, como la lignina y los derivados de la esporopolenina, representa un desafío significativo que limita el acceso a materiales más fácilmente degradables. Estos compuestos complejos no solo dificultan la acción de los microorganismos responsables de la digestión anaeróbica, sino que también prolongan los tiempos de retención del proceso de descomposición, afectando la eficiencia y rentabilidad de la producción de biogás.

La lignina, por ejemplo, es un polímero altamente resistente que confiere rigidez y protección a las estructuras vegetales, lo que dificulta su degradación. Por su parte, los derivados de la

esporopolenina, presentes en estructuras como los esporos de algunas plantas, tienen una resistencia notable a la degradación microbiana. Esta resistencia inherente de los materiales orgánicos ricos en lignina y esporopolenina requiere la implementación de estrategias específicas para mejorar la accesibilidad de los nutrientes y facilitar su descomposición.

Tabla 2 *Composición del estiércol bovino*

Ceniza en base seca (%)	47.88
Carbono (C) (%)	33.21
Nitrógeno (N) (%)	2.80
Fosforo (P) (%)	0.98
Potasio (K) (%)	1.55
Calcio (Ca) (%)	1.45
Magnesio (Mg) (%)	1.59
Sodio (Na) (%)	3.97

Fuente: (Noguera, 2004)

2.2.4. Naturaleza y composición bioquímica de materias primas

Las distintas materias primas que se pueden emplear en la fermentación metanogénica incluyen residuos orgánicos provenientes de fuentes vegetales, animales, agroindustriales, forestales, domésticas u otras.

Las características bioquímicas de los residuos deben facilitar el desarrollo y la actividad microbiana en el sistema anaeróbico. El proceso microbiológico requiere no solo fuentes de carbono y nitrógeno, sino también un equilibrio adecuado de sales minerales como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros elementos en menor cantidad.

Generalmente, sustancias orgánicas como estiércoles y lodos cloacales contienen estos elementos en las proporciones necesarias. No obstante, en la digestión de ciertos desechos industriales, puede ser necesario añadir estos compuestos o realizar un tratamiento aeróbico posterior.

Las sustancias con un alto contenido de lignina no son directamente utilizables y, por lo tanto, requieren tratamientos previos, como cortado, macerado o compostaje, para liberar las sustancias que pueden ser transformadas de las incrustaciones de lignina. En el caso de los estiércoles animales, la degradación varía principalmente según el tipo de animal y su alimentación.

La producción y el rendimiento de gas de los estiércoles muestran grandes variaciones debido a la multitud de factores que pueden influir en el proceso, lo que dificulta la comparación de resultados.

Tabla 3 *Características de los residuos*

Residuos de origen animal	Estiercol, orina, guano, residuos de mataderos, residuos de pescado.
Residuos de origen vegetal	Malesas, rastrajos de cosechas, pajas, forrajes.
Residuos de origen humano	Heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	Salvado de arroz, orujos, bagazo de la caña, residuos de semillas.
Residuos forestales	Hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Fuente: (Varnero, 1991)

El contenido de agua en estas materias primas varía entre el 10% y el 90% del peso fresco del residuo, dependiendo de la edad, el tipo de órgano del residuo y los métodos de obtención. Los componentes orgánicos de estos residuos son diversos y constituyen aproximadamente el 50% del peso fresco, dependiendo del contenido de agua y de cenizas.

Los principales grupos identificados son: carbohidratos (50% del total de la materia orgánica seca), compuestos nitrogenados (20%), lignina (10 a 40%), y el resto está compuesto por fracciones como ceras, resinas y grasas. La composición promedio de la materia orgánica seca es: 48% carbono (C), 44% oxígeno (O), 7% hidrógeno (H) y 2% nitrógeno (N). Los minerales presentes, como calcio, potasio, magnesio, fósforo, azufre y elementos traza, representan entre el 1% y el 10% del peso seco.

Tabla 4 Composición química de diversos residuos de origen animal y vegetal (valores promedios, base seca)

Origen vegetal					
Materia prima	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Celulosa Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceniza (%)
Paja de trigo	1.10	2.10	65.45	21.60	3.53
Paja de centeno	9.62	5.42	59.95	12.70	12.31
Paja de arroz	2.35	12.26	30.51	10.61	12.55
Poroto verde	3.80	11.04	39.61	13.84	9.14
Pasto verde	8.05	4.94	57.22	9.80	19.99
Alfalfa	10.41	12.81	36.79	8.95	10.30
Hojas secas	4.01	3.47	32.78	29.66	4.68
Caña maíz		4.50	35.40	10.30	6.50
Estiércol animal					
Bovino	3.23	9.05	32.49	35.57	19.66
Porcino	11.50	10.05	32.39	27.49	23.67
Aves	2.84	9.56	50.55	19.82	17.23
Equino	2.70	5.00	40.50	35.00	17.80
Avino	6.00	3.75	32.00	32.00	25.95
caprino	2.90	4.70	34.00	33.00	26.40

Fuente: (Arellano, 2024)

Tabla 5 Rango de niveles de nutrientes en diversos residuos de origen animal y vegetal.

Materia prima	C (%)	N (%)	P₂O₅ (%)	K₂O (%)	CaO (%)	MgO (%)
Excretas						
Bovino	17.4	0.3	1.5	0.10	0.35	0.13
Porcino	17.4	1.1	4.6	0.30	0.09	0.10
Caprino	35.00	1.0	1.5	2.30		
Equino	35.00	0.3	1.6	0.35	0.15	0.12

Ovino	35.00	0.3	1.0	0.15	0.33	
Conejos	23.00	1.0	1.8	2.10	0.45	0.15
Aves	28.00	1.4	2.8	1.40	0.80	0.48
Patos	29.00	0.6	1.5	0.40	0.80	
Pavos	17.40	0.6	0.8	1.10	0.80	
Humanas	2.5	0.8	0.5	0.30		
Mezclas						
Porcino + paja	20.00	0.3	0.24	0.63	0.20	
Bovino + paja	44.00	0.3	0.79	1.55	0.30	
Rastrojo						
Caña de maíz	30.00	0.8	0.6	2.40	0.50	0.49
Paja de avena	22.00	0.53	0.40	0.30	0.40	
Paja de cebada	58.00	0.64	0.19	1.07	0.33	0.16
Paja de arroz	40.00	0.64	0.60	0.40	0.60	
Paja de haba	28.00	1.5	0.40	2.30	1.35	
Tomate	27.00	2.60				
Papas	30.00	0.34	0.16	0.58	0.64	
Beterraga	30.00	2.00	0.70	5.30	1.95	0.83
Rabanitos	30.00	2.50				
Hoas secas	35.00	1.00	0.30	0.20	2.00	
aserrin	44.00	0.06	0.01	0.01		

Fuente: (Arellano, 2024)

2.2.5. Fermentación

En la fermentación anaeróbica, la materia orgánica se descompone sin la presencia de un aceptor de electrones externo, utilizando microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción en condiciones de oscuridad. El producto generado en este proceso recibe los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Así, la materia orgánica actúa tanto como donadora como aceptora de electrones. En la fermentación, el sustrato se oxida parcialmente, por lo que solo se

conserva una pequeña cantidad de la energía contenida en él. En algunos sistemas, especialmente en pequeña escala, la fermentación puede ser utilizada para producir biogás a partir de desechos orgánicos como restos de comida.

2.2.6. Fermentación metanogénica

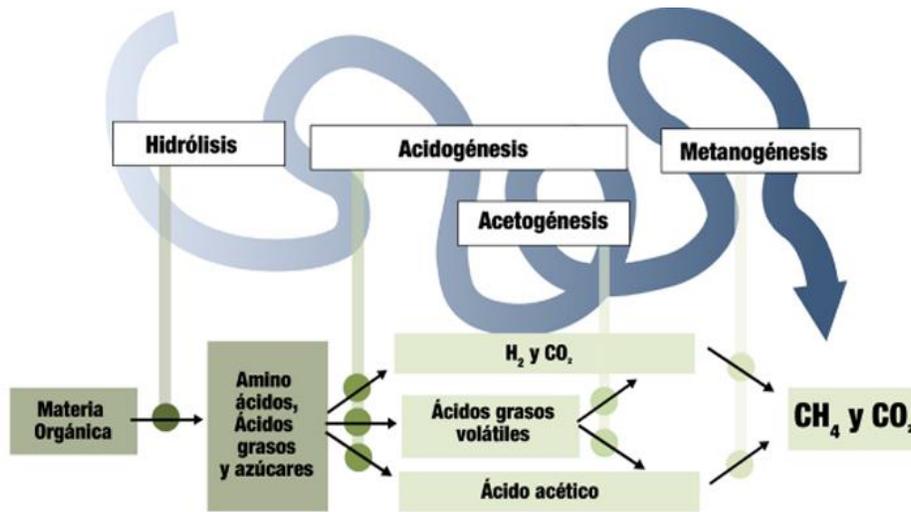
2.2.6.1. Etapas en la fermentación metanogénica

La digestión anaeróbica es un proceso altamente complejo debido tanto a la variedad de reacciones bioquímicas que ocurren como a la cantidad de microorganismos que participan en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones se llevan a cabo de manera simultánea. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta el momento han dividido la descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas distintas:

- Hidrolisis
- Fase fermentativa o acidogénica
- Fase acetogénica
- Fase metanogénica

Primero en la hidrolisis la materia orgánica entrante comienza a descomponerse, produciendo azúcares, ácidos grasos y amino ácidos. Hay materias orgánicas que son difíciles de hidrolizar, haciendo que esta etapa sea poco eficiente. La segunda etapa es la acidogénesis, donde los productos de la hidrolisis (azúcares, ácidos grasos y amino ácidos) son transformados en otros ácidos y H_2 y CO_2 . Parte de estos ácidos (los ácidos grasos volátiles) se convierten en H_2 , CO_2 y ácido acético. En una tercera etapa (la Acetogénesis). Así, para llegar a H_2 , CO_2 y ácido acético, se puede hacer directamente desde la etapa de acidogénesis, o desde la etapa de acetogénesis (a partir de los ácidos grasos volátiles de la acidogénesis). Una vez que se tiene H_2 , CO_2 y ácido acético. La cuarta etapa, llamada metanogénesis, hace uso del H_2 , CO_2 y ácido acético para producir metano (CH_4) y CO_2 .

Figura 8 Etapas de la fermentación metanogénica



Fuente: (Varnero, 1991)

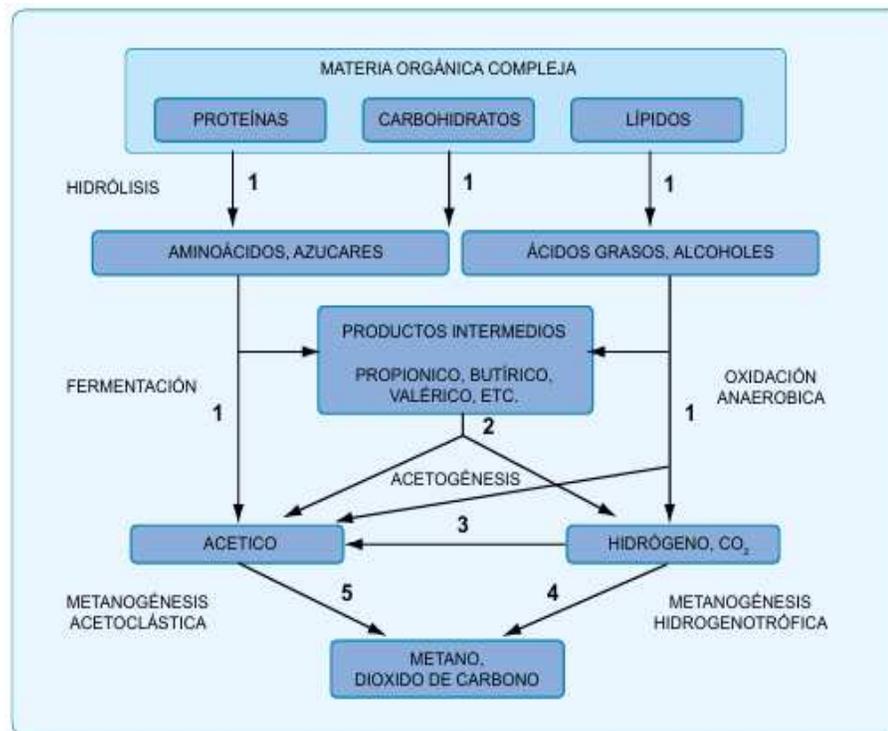
2.2.6.2. Hidrólisis

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolize en compuestos solubles capaces de atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso crucial en la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos, ya que convierte estas moléculas en sustratos orgánicos que pueden ser digeridos anaeróbicamente. Este proceso de hidrólisis es realizado por enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. La etapa de hidrólisis puede ser el factor limitante en la velocidad global del proceso, especialmente cuando se manejan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la eficacia de la hidrólisis está influenciada por la temperatura del proceso, el tiempo de retención hidráulica, la composición bioquímica del sustrato (como el porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), el tamaño de las partículas, el nivel de pH, la concentración de NH_4^+ y la concentración de los productos de la hidrólisis.

La hidrólisis térmica, por ejemplo, utiliza altas temperaturas y presiones para romper enlaces químicos en los compuestos de lignina y celulosa, favoreciendo la liberación de azúcares simples que son fácilmente fermentables. Por otro lado, el tratamiento alcalino implica el uso

de soluciones alcalinas que descomponen la lignina y alteran la estructura de la celulosa, mejorando así su biodegradabilidad.

Figura 9 *Proceso de obtención de biogás*



Fuente: (Varnero, 1991)

Las proteínas juegan un papel crucial en el proceso de digestión anaeróbica, ya que no solo proporcionan carbono y energía, sino que los aminoácidos resultantes de su hidrólisis tienen un alto valor nutricional. Las proteínas se descomponen en péptidos y aminoácidos mediante la acción de enzimas proteolíticas conocidas como proteasas. Algunos de estos aminoácidos se utilizan directamente para la síntesis de nuevo material celular, mientras que el resto se descompone en ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en las etapas siguientes del proceso.

La descomposición de los lípidos en ambientes anaeróbicos inicia con la ruptura de las grasas mediante la acción de enzimas hidrolíticas llamadas lipasas, las cuales generan ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de descomposición de los materiales lignocelulósicos, que están compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que a menudo se convierte en la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto se debe a la gran resistencia de la lignina a la degradación por microorganismos anaeróbicos, lo que también afecta la biodegradabilidad de la celulosa, la hemicelulosa y otros carbohidratos. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiosa y glucosa, mientras que la hemicelulosa se descompone en pentosas, hexosas y ácidos urónicos. En general, la tasa de hidrólisis aumenta con la temperatura y también depende del tamaño de las partículas, ya que una mayor superficie disponible facilita la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos físico-químicos, que reducen el tamaño de las partículas, incrementan la tasa de hidrólisis. Si esta etapa es la que limita el proceso anaeróbico, su mejora puede beneficiar al proceso en general al reducir los tiempos de retención y el tamaño de los reactores.

2.2.6.3. Fase fermentativa o acidogénica

Durante esta etapa, se lleva a cabo la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas, como el ácido acético, ácido fórmico y el hidrógeno (H_2), así como en compuestos orgánicos más reducidos (como los ácidos propiónicos, butírico, valérico, láctico y etanol). Estos compuestos más reducidos deben ser oxidados por las bacterias acetogénicas en la siguiente fase del proceso. La relevancia de este grupo de bacterias radica no solo en que proporcionan el alimento necesario para las bacterias que actúan en etapas posteriores, sino también en su capacidad para eliminar cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema. Este grupo de microorganismos está compuesto por bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, conocidas colectivamente como bacterias formadoras de ácidos.

2.2.6.4. Fase acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación, como el hidrógeno (H_2) y el ácido acético, pueden ser utilizados directamente por los organismos metanogénicos, otros productos, como el etanol, los ácidos grasos volátiles y ciertos compuestos aromáticos, deben ser convertidos en compuestos más simples, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), mediante las bacterias acetogénicas. Ejemplos de microorganismos acetogénicos son

Syntrophomonas wolfei y *Syntrophobacter wolini*. Un grupo particular de microorganismos acetogénicos son los homoacetogénicos, que pueden crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como una mezcla de H_2/CO_2), produciendo únicamente acetato. A diferencia de las bacterias acetogénicas, las homoacetogénicas no generan hidrógeno como producto de su metabolismo; en su lugar, lo utilizan como sustrato. Los estudios indican que el metabolismo homoacetogénico ayuda a mantener bajas presiones parciales de hidrógeno, facilitando así la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. Los principales microorganismos homoacetogénicos identificados incluyen *Acetobacterium woodii* y *Clostridium aceticum*.

En esta fase del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han utilizado todo el alimento disponible en la biomasa y, a consecuencia de su metabolismo, expulsan los productos de desecho de sus células. Estos desechos, que son ácidos volátiles simples, serán empleados como sustrato por las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

2.2.6.5. Fase Metanogénica

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas actúa sobre los productos generados en las fases anteriores. Los microorganismos metanogénicos son los más destacados dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son responsables de la producción de metano y de la eliminación de los productos de las etapas previas, y son quienes dan nombre al proceso general de biometanización.

Estos microorganismos completan la digestión anaeróbica al producir metano a partir de sustratos monocarbonados o de dos átomos de carbono unidos por enlaces covalentes, como el acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos pertenecen al dominio Archaea (bacteria microbiológica) y presentan características distintivas que los diferencian de otros procariotas. Se pueden clasificar en dos grandes grupos según el sustrato que metabolizan: los hidrogenotróficos, que utilizan H_2/CO_2 y ácido fórmico, y los acetoclásticos, que metabolizan acetato, metanol y algunas aminas.

Se ha demostrado que aproximadamente el 70% del metano generado en los reactores anaeróbicos se origina de la descarboxilación del ácido acético. Aunque todos los organismos

metanogénicos pueden usar H_2 como aceptor de electrones, solo dos géneros pueden metabolizar acetato. Los géneros que tienen especies capaces de utilizar acetato son *Methanosarcina* y *Methanothrix*. El metano restante se produce a partir de otros sustratos como ácido carbónico, ácido fórmico y metanol, siendo el ácido carbónico el más significativo. Este último es reducido por el hidrógeno, que también se produce en la etapa previa.

2.2.7. Condiciones determinantes para la generación de biogás en procesos metanogénicos.

2.2.7.1. Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo en el que una parte de los materiales orgánicos en un sustrato, como residuos animales y vegetales, se transforma en biogás, una mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros compuestos. Este proceso es llevado a cabo por un grupo de bacterias que son sensibles o totalmente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (como el H_2O_2). Mediante la digestión anaeróbica, es posible convertir grandes cantidades de residuos, como restos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, así como de la industria papelera y algunas químicas, en subproductos útiles. En este proceso, más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se convierte en metano, mientras que solo un 10% se usa en el crecimiento bacteriano, en comparación con el 50% en sistemas aeróbicos. Los microorganismos metanogénicos actúan como enzimas respiratorias y, junto con las bacterias no metanogénicas, forman una cadena alimentaria similar a las cadenas enzimáticas de las células aeróbicas, transformando los residuos orgánicos en biogás, que luego abandona el sistema. No obstante, el biogás generado a menudo contiene contaminantes que pueden complicar su manejo y utilización. El proceso anaeróbico se clasifica en fermentación anaeróbica o respiración anaeróbica, según el tipo de aceptores de electrones utilizados.

2.2.7.2. Microorganismos involucrados en cada proceso de la digestión anaeróbica.

- **Bacterias que participan de la hidrólisis:** Bacteroides, Lactobacillus, Propionibacterium, Sphingomonas, Sporobacterium, Megasphaera, Bifidobacteria.

- **Bacterias que participan de la acidogénesis:** Los géneros Clostridium, Paenibacillus y Ruminococcus están presentes en todas las etapas del proceso de fermentación, pero predominan en la etapa acidogénica el grupo Cytophaga-Flavobacteria-Bacteroidetes
- **Bacterias que participan de la acetogénesis:** Estas bacterias sólo pueden sobrevivir en simbiosis con bacterias consumidoras de hidrógeno. Las bacterias acetogénicas reductoras de sulfato pueden degradar el ácido láctico y el etanol, pero no los ácidos grasos ni los compuestos aromáticos.
- **Especies metanogénicas:** Las especies metanotróficas son las que se encuentran en el proceso de metanización.

2.2.8. Respiración anaeróbica

La respiración anaeróbica es un proceso biológico de oxidación-reducción de monosacáridos y otros compuestos, en el que el aceptor final de electrones es una molécula inorgánica distinta del oxígeno, o en ocasiones, una molécula orgánica. Este proceso es llevado a cabo exclusivamente por ciertos grupos de bacterias, que emplean una cadena transportadora de electrones similar a la de las mitocondrias en la respiración aeróbica. No debe confundirse con la fermentación, que también es un proceso anaeróbico, pero en el cual no se utiliza una cadena transportadora de electrones y el aceptor final de electrones siempre es una molécula orgánica.

2.2.9. Naturaleza y composición bioquímica de materias primas

Los procesos microbianos requieren no sólo fuentes de carbono y nitrógeno, sino también sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, etc.) en un cierto equilibrio.

2.2.10. Relación carbono/nitrógeno de las materias primas

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno,

por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado.

Tabla 6 *Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.*

Materiales	%C	%N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1
Residuos vegetales			
Paja de trigo	46	0.53	87:1
Paja de cebada	58	0.64	90:1
Paja de arroz	42	0.63	67:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	730:1

Fuente: (Varnero, 1991)

2.2.11. Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60% de sólidos totales. Por ejemplo, en el caso del estiércol de bovino fresco, suponiendo que tiene un 20% de sólidos totales y se quiere diluir esta carga a un 5% de sólidos totales, para saber cuánta agua se debe agregar por kilo de excretas frescas, se realiza el siguiente cálculo:

$$\%S.T. (carga diluida) = \frac{1Kg\ excreta * \%S.T.\ excreta\ fresca}{1Kg\ excreta\ fresca + agua\ agregada} \dots (3)$$

$$0.05 = \frac{1 * 0.20}{1 + W_{agua}}$$

$$0.05 + 0.05W_{agua} = 0.20$$

$$W_{agua} = \frac{0.15}{0.05} = 3 \frac{\text{Litros}}{\text{Kg excreta fresca}}$$

Los Sólidos Volátiles son aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C. Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano.

Tabla 7 Rango de sólidos volátiles y sólidos totales de estiércol animal

Estiércol	%ST	SV(%ST) (base seca)	%SV (base húmeda)
Vaca	(10-17)	(70-80)	(7-13.6)
Cerdo	(20-35)	(60-75)	(12-26.25)
Cabra/oveja	(50-70)	(70-75)	(35-52.5)
llama	(55-65)	(70-75)	(38.5-48.75)

Fuente: (Varnero, 1991)

Contar con una alta cantidad de sólidos totales en un sustrato generalmente sugiere un buen potencial para la producción de biogás. Sin embargo, esto no es suficiente, ya que los sólidos

volátiles (SV) no especifican el tipo de sólidos orgánicos presentes. Es posible que una parte significativa de esos SV sea fibra (como la lignina en pasto, ramas, hojas o rumen), la cual, como se ha mencionado anteriormente, es difícil de hidrolizar y, por lo tanto, disminuye el potencial para producir biogás.

2.2.12. Temperatura

La producción de biogás está directamente relacionada con la temperatura del biodigestor, donde al incrementar la temperatura, disminuyen los tiempos de retención. En el caso del estiércol porcino, se tiene un tiempo de retención de 15 a 25 días a temperatura mesofílica (20 a 40 °C), donde se producen entre 340 y 550 litros de biogás por Kg de sólidos volátiles. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la tasa de crecimiento de microorganismos y se acelera el proceso de digestión, lo que da como resultado un aumento en la producción de biogás. Los cambios repentinos de temperatura en el biorreactor pueden causar inestabilidad en el proceso. Por lo tanto, para garantizar una temperatura uniforme en el biorreactor, son importantes un sistema de agitación y un controlador de temperatura adecuados.

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, están muy influenciados por la temperatura. Cuando la temperatura aumenta, el crecimiento de los microorganismos se acelera y el proceso de digestión se vuelve más rápido, resultando en una mayor producción de biogás. La temperatura en la que opera el digestor es un parámetro clave en su diseño, debido a su notable impacto en la velocidad de la digestión anaeróbica. Cambios bruscos en la temperatura pueden desestabilizar el proceso, por lo que es crucial contar con un sistema de agitación eficiente y un controlador de temperatura para mantener una temperatura uniforme en el digestor.

Por otro lado, la solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura, lo que facilita el acceso de los microorganismos a la materia orgánica y acelera el proceso. No obstante, si se trata de compuestos tóxicos, su mayor solubilidad con la temperatura puede hacerlos más perjudiciales, lo que podría explicar en parte la mayor inhibición de ciertos compuestos orgánicos en el rango termofílico, como los ácidos grasos de cadena larga. Además, la temperatura afecta directamente a ciertos equilibrios químicos que son cruciales

para el proceso anaeróbico, como los relacionados con el amonio-amoniaco libre o los ácidos grasos volátiles (AGV) en sus formas ionizadas y no ionizadas. En general, la temperatura favorece las formas no ionizadas, que son más tóxicas para los microorganismos (como el NH₃ y los AGV no ionizados). Finalmente, el aumento de la temperatura reduce la viscosidad de sólidos y semisólidos, lo que disminuye la necesidad de agitación.

2.2.13. Tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica

Se refiere a la cantidad de sustrato orgánico que se alimenta al biorreactor por día. Este valor está inversamente relacionado con el tiempo de retención. A las bacterias les lleva tiempo descomponer la materia orgánica. La tasa de degradación depende en gran medida de la temperatura; cuanto mayor sea la temperatura, menor será el tiempo de retención o fermentación para obtener un buen rendimiento de biogás.

La eficiencia en la producción de biogás generalmente se mide mediante el volumen de biogás generado por cada unidad de peso de materia seca (MS) o materia orgánica volátil (SV). La fermentación para la producción de biogás requiere un rango de concentración de MS bastante amplio, que suele variar entre el 1% y el 30%. La concentración óptima de MS está influenciada por la temperatura. Las bacterias necesitan un tiempo específico para descomponer la materia orgánica, y la velocidad de esta degradación está fuertemente ligada a la temperatura; a medida que aumenta la temperatura, se reduce el tiempo necesario para obtener una producción eficiente de biogás. Por ejemplo, en el caso del estiércol de ganado, los tiempos de retención y fermentación (TRH) varían según la temperatura promedio de la región.

Tabla 8 *Tiempo de retención*

Tiempo de retención hidráulica	Características
30-40 días	Clima tropical
40-60 días	Clima frío y cálido
60-90 días	Altiplano

Fuente: (Varnero, 1991)

En un sistema de carga diaria (régimen semicontinuo), el tiempo de retención influye en el volumen diario de carga necesario para alimentar al digestor, de acuerdo con la siguiente relación:

$$\frac{\text{volumen del biodigestor (m}^3\text{)}}{\text{tiempo de retncion (días)}} = \text{volumen de carga diaria } \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \dots \dots (4)$$

En otras palabras, para un tiempo de retención de 30 días, se introduce cada día 1/30 del volumen total del digestor, de modo que, en promedio, los residuos orgánicos y la biomasa microbiana permanecen en el sistema durante 30 días. La cantidad de biogás generado por un digestor depende, entre otros factores, de la cantidad de residuo añadido diariamente. Generalmente, se utilizan tiempos de retención que oscilan entre 20 y 55 días, con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor. Por lo tanto, con tiempos de retención más cortos, el tamaño del digestor puede reducirse y, con ello, los costos asociados.

Otro parámetro relevante para determinar el tiempo de retención en el digestor es el Tiempo de Retención de los Sólidos Biológicos (TRSB), que se calcula como la relación entre la cantidad de materia orgánica (MO) o materia orgánica volátil (SV) que entra al digestor y la cantidad que sale diariamente. El TRSB refleja el tiempo medio que los microorganismos permanecen en el digestor.

Estos parámetros son cruciales para digestores avanzados de alto nivel, que han logrado un control independiente del TRSB y del tiempo de retención hidráulico (TRH) mediante la retención de biomasa. La medición del TRH suele ser más sencilla y práctica en el entorno de las granjas en comparación con el TRSB.

Optar por una temperatura más alta reducirá los tiempos de retención necesarios y, en consecuencia, disminuirá el volumen del reactor requerido para procesar una cantidad determinada de material. La relación costo-beneficio será el factor decisivo para optimizar la temperatura y el TRH, ya que influye en los volúmenes del reactor, los sistemas de control paralelos, la calefacción y la eficiencia general. En cuanto al tipo de sustrato, materiales con

una alta proporción de carbono en formas resistentes como la celulosa requerirán tiempos de retención más largos para su completa digestión.

En los sistemas de mezcla completa, el TRH coincide con el TRSB, por lo que el tiempo de retención debe ser lo suficientemente largo para permitir el crecimiento adecuado de la población bacteriana. A medida que aumenta el TRH, también lo hace la degradación de la materia orgánica y la producción de metano, aunque esta última comenzará a disminuir una vez alcanzado el punto óptimo. El tiempo de retención típico en el rango mesofílico para lodos de depuradora varía entre 15 y 20 días, aunque este valor puede depender del tipo de reactor utilizado.

La velocidad de carga orgánica (VCO) se refiere a la cantidad de materia orgánica añadida diariamente en el reactor por unidad de volumen, y está directamente relacionada con la concentración del sustrato y el tiempo de retención establecido. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas pueden resultar en una mayor producción de biogás, aunque también aumenta el riesgo de sobrecarga, lo que puede llevar a la acidificación del reactor.

2.2.14. Rangos de pH y alcalinidad

Las diferentes poblaciones bacterianas presentes durante la digestión anaeróbica tienen un nivel de actividad óptimo que es aproximadamente neutral. Los valores óptimos para la acidogénesis están entre 5,5 y 6,5, y para la metanogénesis, entre 7,8 y 8,2. El pH óptimo para cultivos mixtos está entre 6,8 y 7,4, siendo ideal un pH neutro. Para que este proceso transcurra satisfactoriamente, el pH no debe ser inferior a 6,0 ni superior a 8,0. Una de las consecuencias de bajar el pH por debajo de 6 es que el biogás producido tiene un contenido de metano muy bajo y por lo tanto una calidad energética baja.

El proceso anaeróbico puede verse perjudicado incluso por pequeños cambios en los niveles de pH fuera del rango óptimo. Los microorganismos metanogénicos son más sensibles a las variaciones de pH en comparación con otros microorganismos de la comunidad anaeróbica. Los distintos grupos bacterianos en el proceso de digestión anaeróbica tienen niveles óptimos de actividad cerca de la neutralidad. Para las bacterias acidogénicas, el rango óptimo de pH es entre 5.5 y 6.5, mientras que para las metanogénicas es entre 7.8 y 8.2. Para cultivos

mixtos, el pH ideal se encuentra entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el más adecuado. Para un desarrollo adecuado del proceso, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0. El valor del pH en el digestor no solo afecta la cantidad de biogás producido, sino también su composición.

Una de las repercusiones de que el pH caiga por debajo de 6 es que el biogás producido contiene una menor cantidad de metano, lo que reduce su valor energético. Dado que la metanogénesis es la etapa crítica del proceso, es crucial mantener el pH del sistema lo más cerca posible de la neutralidad. Los microorganismos acidogénicos, por otro lado, son mucho menos afectados por variaciones extremas en el pH.

2.2.15. Uso del Biogás

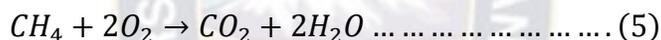
El biogás tiene múltiples aplicaciones que lo convierten en una fuente de energía versátil y sostenible, destacándose en diversos sectores como la agricultura, la industria y los hogares. Esta polivalencia se debe a su capacidad para ser utilizado como combustible en la cocción de alimentos, en sistemas de calefacción, y como fuente de electricidad a través de generadores, así como en vehículos adaptados para su uso como combustible. Estas características hacen del biogás una alternativa atractiva frente a combustibles fósiles, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y promoviendo una economía más circular.

La transición energética hacia fuentes renovables es uno de los principales objetivos globales para la gestión y reutilización de la materia orgánica deseada. Esta transición no solo busca mitigar el impacto ambiental asociado con la dependencia de combustibles fósiles, sino también fomentar la sostenibilidad y la seguridad energética. En este contexto, el biogás emerge como una solución viable para transformar residuos orgánicos, que de otro modo contribuirían a la contaminación y al cambio climático, en un recurso energético útil y rentable.

La correcta valorización del biogás implica establecer sistemas integrados de gestión de residuos que permitan la recolección y tratamiento eficiente de la materia orgánica. A través de biodigestores, los residuos se descomponen anaeróbicamente, produciendo biogás que

puede ser utilizado de diversas maneras. Además de su uso como combustible, el digestato resultante del proceso de digestión anaeróbica es un fertilizante orgánico de alta calidad, que puede ser reaplicado en la agricultura, cerrando así el ciclo de los nutrientes y mejorando la salud del suelo.

Para maximizar el aprovechamiento del biogás, es fundamental implementar políticas y programas que fomenten su producción y uso. Esto incluye incentivos para la inversión en tecnologías de digestión anaeróbica, la promoción de la investigación y desarrollo en biotecnologías relacionadas, y la sensibilización de la comunidad sobre los beneficios de la energía renovable y la gestión de residuos. Asimismo, la colaboración entre gobiernos, empresas y comunidades locales es clave para crear un entorno favorable que impulse la adopción de prácticas sostenibles. La combustión es una reacción química en la cual ocurre una rápida oxigenación/oxidación del biogás. La combustión completa puede ser representada por la siguiente ecuación química:



El aire mínimo necesario para la combustión es del 21%, aunque este porcentaje debe aumentarse para asegurar una combustión eficiente. La relación entre aire y gas se puede mejorar incrementando la presión del aire, aumentando la apertura de la válvula dosificadora de gas (el biogás requiere una apertura de 2 a 3 veces mayor que la del metano puro) y ajustando la geometría del paso de aire desde el exterior. Para un uso óptimo del biogás, la presión adecuada debe estar entre 7 y 20 mbar. Es fundamental prestar atención a este aspecto, por lo que es necesario calcular las pérdidas de presión en la salida del gasómetro.

2.2.15.1. Aplicaciones del biogás

2.2.15.2. Generación de Electricidad:

Los sistemas de cogeneración de calor y electricidad aprovechan tanto la electricidad generada por el combustible como el calor residual producido. Algunos de estos sistemas se enfocan principalmente en la producción de calor, utilizando la electricidad como un subproducto, mientras que otros priorizan la generación de electricidad y utilizan el calor residual para calentar agua en sus procesos. En ambos casos, la eficiencia del sistema se

incrementa en comparación con el uso del biogás únicamente para generar electricidad o calor. Las turbinas de gas, que pueden ser microturbinas (de 25 a 100 kW) o turbinas más grandes (superiores a 100 kW), son opciones viables para la producción de calor y energía, ofreciendo una eficiencia similar a la de los motores de encendido por chispa y requieren poco mantenimiento. Sin embargo, los motores de combustión interna son los más comúnmente empleados en estas aplicaciones. Para utilizar biogás en estos sistemas, es necesario eliminar el H₂S (manteniéndolo por debajo de 100 ppm) y el vapor de agua. Las celdas de combustible se consideran la tecnología de generación de energía a pequeña escala del futuro, ya que pueden producir electricidad y calor con una eficiencia superior al 60% y emisiones reducidas.

Los motores generadores, donde el biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna para generar electricidad. Es común en plantas de biogás y en instalaciones agrícolas.

2.2.15.3. Combustible para Vehículos

Después de un proceso de purificación, el biogás puede convertirse en biometano, que puede ser utilizado como combustible para vehículos, similar al gas natural.

El biogás puede ser utilizado como combustible vehicular y se ha estado empleando de esta manera desde hace bastante tiempo. Para que esto sea posible, el biogás debe tener una calidad comparable a la del gas natural, lo que permite su uso en vehículos adaptados para funcionar con este tipo de gas. La mayoría de estos vehículos están equipados con un tanque de gas y un sistema de suministro específico, además del sistema de combustible a gasolina convencional.

El biogás se puede utilizar en motores de combustión interna, tanto de gasolina como diésel. El gas producido a través de fermentación presenta un octanaje entre 100 y 110, lo que lo hace ideal para motores con alta relación de compresión. Sin embargo, una desventaja es su baja velocidad de encendido.

A pesar de su potencial, la difusión del biogás en el transporte enfrenta varios desafíos: para asegurar una autonomía adecuada, el gas debe ser almacenado en contenedores cilíndricos

de alta presión (entre 200 y 300 bar). Este tipo de almacenamiento requiere que el biogás sea purificado antes de ser comprimido.

2.2.15.4. Fertilizante

Biosol: El biosol es un residuo sólido que queda después de la digestión anaeróbica, conocido como biosol, se convierte en un valioso recurso en la agricultura. Este fertilizante orgánico está compuesto por una mezcla rica en nutrientes, incluyendo nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica, lo que lo convierte en una enmienda excepcional para mejorar la calidad del suelo. Al aplicarlo, no solo se incrementa la fertilidad del terreno, sino que también se mejora su estructura, lo que facilita la retención de agua y la aireación del suelo. Esto es especialmente beneficioso en suelos degradados o agotados, donde el biosol puede revitalizar la actividad microbiana y fomentar un ecosistema saludable. Además, el uso de biosol contribuye a reducir la dependencia de fertilizantes químicos, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

Biol: El biol es un líquido resultante del proceso de digestión anaeróbica que se presenta como un fertilizante orgánico altamente efectivo. Este producto es rico en microorganismos beneficiosos y nutrientes esenciales, lo que lo hace ideal para aplicaciones foliares y riego en diversas plantaciones. Su uso en la agricultura no solo mejora la producción de cultivos, sino que también aumenta la resistencia de las plantas a enfermedades y plagas. Al fomentar un crecimiento más robusto y saludable, el biol permite maximizar los rendimientos y la calidad de las cosechas. Además, al ser un fertilizante orgánico, su aplicación contribuye a la sostenibilidad del sistema agrícola al enriquecer el suelo y reducir la contaminación asociada con el uso de fertilizantes químicos.

2.2.15.5. Tratamiento de Residuos

En las zonas urbanas se generan cada día grandes cantidades de residuos, y aunque se trata de sustancias no peligrosas, es importante llevar a cabo un correcto tratamiento de residuos sólidos para no perjudicar al medio ambiente. Estos desechos se producen diariamente en los hogares, empresas, oficinas y comercios y son fruto de la actividad diaria de las personas. Al tratarse de residuos generados por la actividad normal de cualquier persona en su rutina

habitual, hablamos de materiales que están muy presentes en nuestro día a día, como la materia orgánica, el papel y cartón, el plástico o el vidrio.

En España, cada persona produce alrededor de 1kg de residuos diarios, por lo que, sin un tratamiento de residuos sólidos adecuado, esta cantidad de desechos podría tener efectos muy nocivos para el medio ambiente.

Pero generar residuos es algo inherente a la vida de las personas, es decir, aunque nos esforzásemos por producir menos residuos, resultaría prácticamente imposible dejar de hacerlo, por lo que un adecuado tratamiento de residuos sólidos es la única solución para evitar que todo lo que generamos acabe deteriorando el medio ambiente.

El tratamiento de residuos sólidos urbanos consiste tanto en la recogida general de estos residuos en contenedores de basura, como en la recogida selectiva de los residuos separados en contenedores de reciclaje.

Una vez se recogen los residuos, se llevan hasta las plantas de selección donde se le da un tratamiento concreto a cada tipo de residuo. Con el tratamiento de residuos sólidos, la materia orgánica se puede volver a utilizar como abono a través del compostaje. Y a través de algunos sistemas como la incineración, también es posible reducir el volumen de residuos y obtener importantes cantidades de energía.

Los escombros producidos en las viviendas, comercios, etc., también se incluyen dentro de los residuos urbanos, y por lo tanto, también requieren un manejo de residuos sólidos adecuado. Y es que los escombros se deben depositar en vertederos controlados y con el acondicionamiento necesario para que los residuos no supongan un daño para el medio ambiente o para la salud pública.

El tratamiento de residuos sólidos tiene como fin recuperar sustancias y materiales valorizables, facilitar la utilización de estos residuos como fuente de energía y preparar los residuos para su tratamiento final. Y es que muchos de los desechos que generamos diariamente están formados por materiales a los que se les puede dar una segunda vida, por

lo que el tratamiento de residuos sólidos se convierte en un factor clave para mantener una economía circular.

Pero además de encontrar materiales reutilizables, gracias a los sistemas de tratamiento de residuos sólidos también es posible obtener algo tan valioso para la sociedad como la energía o el combustible.

2.2.15.6. Producción de Hidrógeno

En este último año el hidrógeno verde o renovable ha recibido un gran impulso a nivel mundial como fuente de energía del futuro. Hablamos de un vector energético que hará que las energías renovables proporcionen una contribución mayor gracias a su capacidad de almacenar y transportar la energía.

Ahora bien, hoy por hoy, el 90% del hidrógeno que se consume actualmente en el mundo es el gris, es decir, que se obtiene mediante reformado de gas natural y emite CO₂ a la atmósfera.

Por lo que, el primer paso para que el hidrógeno se convierta en elemento esencial para la transición energética y se puedan alcanzar los objetivos de descarbonización es lograr una transición de hidrógeno gris al verde (renovable y libre de emisiones), impulsando el desarrollo de la tecnología necesaria.

Para ello, una de las vías tecnológicas importantes para la obtención de este hidrógeno verde a corto plazo es una derivada del reformado de gas natural, sustituyendo este por el biometano.

El gas natural está compuesto principalmente por metano (95-99%) y por pequeñas proporciones de otros compuestos, pero su origen es el de un combustible fósil.

En cambio, el biometano, que tiene una composición similar al gas natural (95-99% de metano, CO₂ y otros compuestos) tiene su origen en la degradación de los compuestos orgánicos mediante un proceso biológico (digestión anaerobia). En un primer paso del proceso de obtención del biometano, se genera biogás, con una concentración menor de

metano (50-70%). Este es luego purificado y enriquecido mediante un proceso de upgrading para producir el biometano.

Aunque el biogás, por sí mismo, es un combustible idóneo para generar calor o electricidad, es el biometano el que puede reemplazar al gas natural, al ser su composición similar.

Es decir, el biometano puede emplearse como biocombustible para el transporte, inyectarse en la red gasista o utilizarse como materia prima para la obtención de hidrógeno mediante la misma tecnología de reformado de gas natural.

En este caso, ya no hablamos de hidrógeno gris sino de verde, al tener el biometano su origen en la valorización energética de los residuos

2.2.16. Beneficios Adicionales

Un 67% de estas emisiones se deben a la gestión del estiércol animal, Si atendemos al conjunto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las correspondientes al sector agropecuario se han mantenido en torno a los 465 Mt de CO₂ equivalentes anuales durante el periodo 2008-2020, siendo el metano (CH₄) responsable del 44,5% de estas emisiones.

Teniendo en cuenta estos datos, urge reducir las emisiones debidas a este sector para poder hacer frente al cambio climático y el calentamiento global.

Como datos alentadores, cabe mencionar que, durante el 2022, el 75% de las granjas porcinas en España han implementado mejoras técnicas para reducir los niveles de emisiones de sus instalaciones, atendiendo al nuevo marco regulatorio. La adecuación de las nuevas técnicas de gestión de los purines conlleva la modificación en el manejo y la revisión de los condicionantes constructivos para los nuevos alojamientos y dispositivos exteriores de almacenamiento.

En resumen, el biogás es una fuente de energía renovable con diversas aplicaciones que contribuyen a la sostenibilidad y a la gestión eficiente de residuos.

2.3. PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de una sustancia o combustible se refiere a la cantidad de calor producida por kilogramo o metro cúbico de dicha sustancia cuando se oxida completamente. Este valor se mide en función de la unidad de masa o volumen del combustible quemado. Un mayor poder calorífico implica que se necesita menos cantidad de combustible para generar la misma cantidad de energía, lo que hace que la calidad del gas sea crucial para optimizar los costos energéticos

El poder calorífico es una medida que indica la cantidad de energía que se puede obtener de un combustible cuando se quema completamente. Se expresa en términos de energía por unidad de masa o volumen del combustible y se usa para comparar la eficiencia de diferentes fuentes de energía. El poder calorífico es una medida clave en la ingeniería energética y en la selección de combustibles para diversas aplicaciones.

2.3.1. Tipos de poder calorífico

Hay dos tipos principales de poder calorífico: el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI).

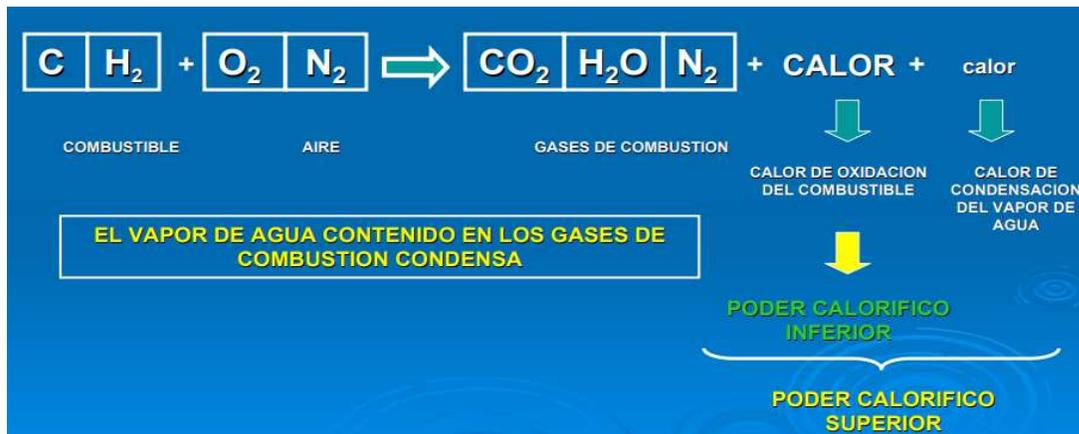
2.3.2. Poder calor calorífico superior

El poder calorífico superior, también conocido por las siglas PCS, es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kilogramo o metro cúbico de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión se condensa de forma líquida. Es decir, se aprovecha todo el calor de oxidación de los componentes del combustible. El PCS se denomina también poder calórico neto.

El poder calorífico superior es una medida clave para evaluar la eficiencia y viabilidad de diferentes combustibles en la producción de energía. Contribuye a la toma de decisiones informadas en la selección de fuentes de energía, así como en la optimización de procesos industriales y sistemas de calefacción.

Se utiliza en contextos donde la recuperación de calor latente del vapor de agua es posible, como en ciertas aplicaciones industriales y sistemas de calefacción de alta eficiencia.

Figura 10 Interpretación grafica del poder calorifico superior



Fuente: (Fernandez J. , 2015)

2.3.3. Poder calorífico inferior

El poder calorífico inferior o PCI es el calor que puede obtenerse en la combustión completa de la unidad de combustible, si en los productos de la combustión el agua está en forma de vapor. Esto es, una parte del calor generado en las oxidaciones se utiliza para evaporar el agua y por ello no se aprovecha.

Para aprovechar el poder calorífico superior (PCS) son necesarias calderas específicamente diseñadas para ello, que se denominan calderas de condensación. Una caldera que no sea de condensación, solo podrá obtener el poder calorífico inferior (PCI) del combustible.

Se utiliza en contextos donde no se recupera el calor latente del vapor de agua, como en la mayoría de los sistemas de combustión comunes y en el cálculo de la eficiencia de motores y calderas.

Conocer el PCI ayuda en la comparación de la efectividad de diferentes combustibles, como gas natural, carbón, biogás, y biomasa. También es crucial para el cálculo de las emisiones de gases contaminantes y para optimizar procesos de combustión.

El poder calorífico inferior es una medida esencial en el ámbito energético que permite evaluar la cantidad de energía utilizable de un combustible. Comprender la diferencia entre

PCI y PCS es crucial para optimizar la eficiencia energética y desarrollar tecnologías más sostenibles en la producción de energía.

Figura 11 Interpretación grafica del poder calorífico inferior



Fuente: (Fernandez J. , 2015)

2.3.4. Importancia del Poder Calorífico

- **Eficiencia Energética:** Conocer el poder calorífico de un combustible ayuda a evaluar su eficiencia y compararlo con otros combustibles en términos de energía producida.
- **Diseño de Equipos:** Es fundamental para diseñar y dimensionar equipos de combustión, como calderas y motores, para asegurar que funcionen de manera eficiente con el tipo de combustible utilizado.
- **Costos y Economía:** Determina los costos operativos de la energía, ya que los combustibles con mayor poder calorífico suelen ser más eficientes y económicos a largo plazo.

2.3.5. Determinación del poder calorífico

Existen dos procedimientos para la determinación del poder calorífico de los combustibles, que son: el método analítico y práctico.

2.3.6. Método Analítico

El poder calorífico de un cuerpo compuesto es: El poder calorífico de un cuerpo compuesto es igual a la suma de los poderes caloríficos de los igual a la suma de los poderes caloríficos de los elementos simples que lo forman, multiplicados por elementos simples que lo forman, multiplicados por la cantidad centesimal en que intervienen, la cantidad centesimal en que intervienen, descontando de la cantidad de hidrógeno total del descontando de la cantidad de hidrógeno total del combustible la que se encuentra ya combinada con combustible la que se encuentra ya combinada con el oxígeno del mismo.

El poder calorífico se determina con las siguientes ecuaciones.

$$PC_i = \sum X_i * PC_i \dots \dots \dots (6)$$

Formula de Dulong, poder calorífico superior e inferior:

$$PCS = 3140 * C + 34400 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2220 * S \dots \dots \dots (7)$$

$$PCI = 8140 * C + 29000 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2220 * S \dots \dots \dots (8)$$

2.3.7. Método Práctico

Medir el poder calorífico de un combustible, como el biogás, se puede realizar mediante varios métodos. Uno de los métodos prácticos más comunes y accesibles es el uso de un calorímetro.

2.3.8. Método del Calorímetro de Bomba

Materiales

- Calorímetro de bomba
- Muestra de biogás
- Balanza

- Agua
- Termómetro
- Mechero o sistema de combustión

Procedimiento

Preparación del Calorímetro:

Llena el calorímetro con una cantidad medida de agua (por ejemplo, 1000 ml). Anota la temperatura inicial del agua (T_i - T_f).

- **Pesaje del Biogás:** Utiliza la balanza para medir una cantidad específica de biogás. Este paso puede requerir un sistema de contención que permita medir el volumen de biogás con precisión (un sistema de recogida de gas).
- **Combustión:** Introduce el biogás en el quemador del calorímetro. Enciende el quemador y permite que el biogás se quemé completamente.
- **Medición de Temperatura:** Observa y registra la temperatura máxima alcanzada por el agua en el calorímetro.

2.4. ADSORCIÓN

La adsorción es un proceso físico o químico en el cual moléculas, átomos o iones de un material se adhieren a la superficie de un sólido o líquido, formando una capa delgada en la interfaz entre dos fases. A diferencia de la absorción, donde las sustancias se incorporan en el interior del material, en la adsorción, las partículas se concentran únicamente en la superficie. Este fenómeno ocurre debido a las interacciones entre el adsorbente (la superficie que captura las partículas) y el adsorbato (las partículas que se adhieren). La adsorción es un proceso clave en diversas aplicaciones, como la purificación de gases y líquidos, el tratamiento de aguas y la catálisis.

Definido como el aumento de concentración de uno o varios componentes en la región que separa dos fases, conocida como la interfase o capa interfacial. En este contexto, una de las fases es siempre un sólido, denominado adsorbente, mientras que la fase móvil es un fluido, que puede ser un gas o un líquido.

El componente que se acumula en la superficie se llama adsorbato, y la sustancia en la fase fluida que puede ser adsorbida se conoce como adsorbible. Si el adsorbato es un gas, puede ser una sustancia pura o una mezcla. Si la fase fluida es un líquido, puede ser un componente puro, una mezcla de líquidos miscibles o una disolución. Cuando la fase móvil no es una sustancia pura, diferentes componentes compiten entre sí durante la adsorción. Este proceso se basa en la capacidad de ciertos sólidos para atraer y retener solutos específicos en su superficie.

La adsorción consiste en la acumulación de uno o varios componentes de un gas o líquido en la superficie de un sólido. Este sólido, conocido como adsorbente, retiene las moléculas adsorbidas en su superficie, donde su concentración es mayor que en la fase fluida; a estas moléculas se les llama adsorbato. La adsorción ocurre debido a las fuerzas de atracción entre las moléculas del fluido y la superficie del sólido. Si estas fuerzas son de tipo van der Waals, se produce una fisisorción, que implica interacciones intermoleculares débiles entre el sólido y el fluido. Por otro lado, la adsorción activada o quimisorción se da cuando se forman enlaces químicos entre las moléculas del fluido y la superficie del adsorbente. Generalmente, la quimisorción resulta en la formación de una monocapa en la superficie del adsorbente. (Perry, 2001)

La energía involucrada en la fisisorción es considerablemente menor que la de un enlace químico, lo que permite que el proceso sea reversible mediante calentamiento o reducción de presión en el sistema. La fisisorción es un fenómeno exotérmico, aunque la energía liberada es mayor que en la condensación. En el caso de la adsorción en poros de pequeño tamaño, la energía implicada aumenta significativamente. (Kennet, 2003)

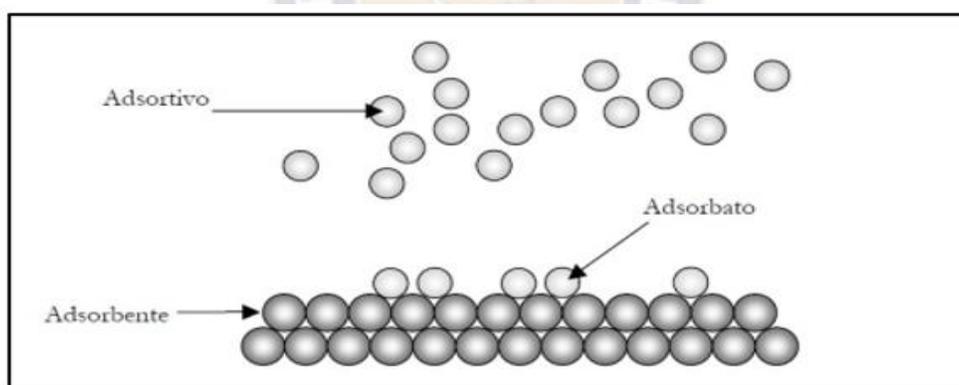
Dependiendo del nivel de separación necesario y de las propiedades de la corriente a procesar, las operaciones que emplean adsorción pueden servir tanto para la separación como para la purificación. En el ámbito de la separación, algunas aplicaciones de la adsorción incluyen: la separación de isoparafinas, parafinas y compuestos aromáticos; la separación de oxígeno y nitrógeno de una corriente de aire; y la purificación de corrientes gaseosas que contienen acetona e hidrocarburos, entre otras. En cuanto a la purificación, la adsorción se usa para eliminar compuestos de azufre y dióxido de carbono en el gas natural, retener

compuestos orgánicos volátiles y eliminar disolventes del aire, entre otros casos. (Maccabe, 2005)

Además de su uso en la separación de compuestos, la adsorción también se emplea para el almacenamiento de gases, lo cual es particularmente relevante en el desarrollo de soluciones para almacenar y estabilizar gases utilizados en la automoción, como el gas natural actualmente, biogás y el hidrógeno en el futuro.

Independientemente de su aplicación para separación o almacenamiento, es crucial comprender las características del adsorbente y el equilibrio de adsorción entre este y los compuestos de la corriente a tratar. Conocer el equilibrio de adsorción para un sistema específico permite diseñar las condiciones operativas adecuadas, como presión y temperatura. Además, la información obtenida del equilibrio de adsorción ayuda a caracterizar el adsorbente, por lo que a veces se usa para evaluar materiales con vistas a su uso posterior como adsorbentes o catalizadores.

Figura 12 Componentes del fenómeno de adsorción



Fuente: (Steinhauser, 2008)

El fenómeno de adsorción consiste en 4 etapas:

- Transferencia del adsorbato de la fase líquida externa hacia la fase líquida situada en proximidad de la superficie del material.
- Transferencia del adsorbato a través de la capa líquida hacia la superficie externa del adsorbente.

- Difusión del adsorbato hacia el interior de los poros del adsorbente bajo el efecto del gradiente de concentraciones. La molécula puede difundirse de un sitio de adsorción hacia otro (difusión superficial) o difundirse de la fase líquida al interior del grano hacia un sitio de adsorción (difusión porosa).
- Adsorción.

La retención de una molécula de adsorbato por un adsorbente puede ser debida a dos causas:

- Adsorción física: Es una interacción débil, similar a la condensación.
- Adsorción química: Una interacción fuerte, también llamada adsorción de van der Waals.

2.4.1. Factores influyentes en la adsorción

Existen infinidad de factores que influyen en la adsorción, debido a que es un proceso que pertenece a la química de superficies, en consecuencia, el conocimiento de las características de la superficie activa es importante, para así poder modificar y/o mejorar sus propiedades para hacerla óptima para el proceso de adsorción.

2.4.2. pH

En una disolución el pH da lugar al grado de adsorción que gobierna el grado de ionización de los compuestos ácidos o básicos, el cual es factor determinante para la adsorción.

2.4.3. Temperatura

La mayoría de las reacciones de adsorción son susceptibles a los grandes cambios de temperatura, por lo que el grado de adsorción suele aumentar o disminuir respecto a la temperatura. Así, pequeñas variaciones de temperatura no alteran notablemente el proceso de adsorción.

La temperatura es un factor crucial en los procesos de adsorción, ya que afecta tanto la capacidad de adsorción como el equilibrio del sistema. Comprender cómo influye la temperatura permite mejorar el diseño y la operación de procesos industriales que utilizan la adsorción como técnica de separación o purificación.

2.4.4. Área superficial

El área superficial específica del adsorbato generalmente proporcional a su capacidad de sorción. Los materiales adsorbentes son famosos por su gran área superficial (área activa) donde se llevan a cabo los fenómenos de sorción físicos y/o químicos.

2.4.5. Tamaño del poro

La cantidad de partículas que se pueden adsorber está relacionada con el tamaño y distribución de poro, lo cual es referente con la cantidad de espacios libres o vacíos. Un poro con diámetro > 25 nm es un macroporo, con > 1 nm es un microporo

2.4.6. Naturaleza del tamaño

Las propiedades fisicoquímicas son fundamentales para que la adsorción tenga lugar a que las sustancia se adhiera a la superficie de la partícula adsorbente, así como las propiedades fisicoquímicas del adsorbato (solubilidad, carga superficial, carácter hidrofóbico/hidrofílico) tamaño de la partícula para penetrar los poros en su caso.

2.4.7. Tipos de adsorbentes

Los adsorbentes son materiales, ya sean naturales o sintéticos, que tienen una estructura amorfa y microcristalina. Entre los más utilizados a gran escala se encuentran el carbón activado, la alúmina activa, la zeolita, el gel de sílice, la tierra de Fuller y otras arcillas. Se han creado numerosos adsorbentes para diversas aplicaciones de separación. Generalmente, los adsorbentes tienen forma esférica y se presentan como pequeños gránulos que varían en tamaño desde 0.1 mm hasta 12 mm. (Treybal, 1993)

Cada partícula de adsorbente posee una estructura altamente porosa, con numerosos poros muy finos que pueden constituir hasta el 50% del volumen total de la partícula. La adsorción normalmente ocurre en forma de una monocapa en la superficie interna de los poros, aunque en ocasiones se forman varias capas. La adsorción física, también conocida como adsorción de van der Waals, suele tener lugar entre las moléculas adsorbidas y la superficie sólida interna del poro, y es fácilmente reversible.

2.4.8. Carbón activado

El carbón activado es un material poroso de origen carbonoso con una extensa área superficial, que tiene la capacidad de adsorber una amplia variedad de sustancias tanto en forma de gases como de líquidos. Conocido desde principios del siglo XX por sus propiedades de absorción, hoy en día se utiliza de manera generalizada para eliminar color, olor, sabor y numerosas impurezas orgánicas en el tratamiento del agua para fines domésticos e industriales.

La eficacia del carbón activado para eliminar sustancias se debe a su extensa superficie interna, aunque la porosidad y la distribución del tamaño de los poros también desempeñan un papel crucial.

Este material microcristalino se obtiene mediante la descomposición térmica de madera, cortezas vegetales, carbón, entre otros, y presenta áreas superficiales que varían entre 300 y 1200 m²/g, con un diámetro promedio de poro de entre 10 y 60 angstroms. El carbón activado suele adsorber sustancias orgánicas de manera eficiente.

En la actualidad, el 60% del carbón activado producido a nivel mundial se obtiene a partir de carbón mineral. En 1998, se estimaba que la cantidad de carbón utilizada para fabricar carbón activado era de 2.105 toneladas al año. Una parte de este carbón activado se emplea para eliminar contaminantes de diversos sectores, tanto en gases (como sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y vapores de gasolina) como en líquidos (incluyendo aguas industriales, aguas residuales y desechos de tintorerías).

2.4.9. Lana de hierro

La lana de acero se obtiene mediante un proceso mecánico que con la ayuda de unas cuchillas de extremada dureza arranca filamentos de un alambre. De este modo se obtienen una masa esponjosa de filamentos metálicos que se asemejan a la lana. A partir de aquí se va obteniendo distintos grados que van de más fino al más grueso.

La lana de hierro adsorbente es un material compuesto por filamentos de hierro que se utiliza en diversos procesos de adsorción. Este tipo de lana, al estar hecha de hierro, tiene propiedades que la hacen útil para capturar y retener diferentes sustancias.

La lana de hierro está formada por una red de finos hilos de hierro entrelazados. Su estructura porosa y fibrosa proporciona una amplia superficie para la adsorción de diversos contaminantes.

Es comúnmente utilizada en la eliminación de contaminantes en agua y aire, especialmente para la reducción de metales pesados, como el arsénico y el plomo, o para la captura de gases contaminantes.

La lana de hierro es efectiva para adsorber ciertos compuestos debido a la alta área superficial de los filamentos de hierro y su capacidad para reaccionar químicamente con algunos contaminantes. Además, puede ser regenerada o reciclada en algunos casos, lo que la hace una opción económica y sostenible.

En la purificación del biogás, por ejemplo, la lana de hierro puede reducir la concentración de CO_2 y H_2S y otros contaminantes, contribuyendo a la purificación del Biogás. Dependiendo del uso, la lana de hierro puede requerir reemplazo o regeneración periódica, ya que puede saturarse con los contaminantes que adsorbe.

2.4.10. Gel sílice

Este adsorbente se fabrica tratando con ácido una solución de silicato de sodio y luego secándola. Tiene un área superficial de 600 a 800 m^2/g y un promedio de diámetro de poro de 20 a 50 Å. Se utiliza principalmente para deshidratar gases líquidos y para fraccionar hidrocarburos.

2.4.11. Tierra vegetal

La tierra vegetal adsorbente es un tipo de material utilizado en procesos de adsorción debido a sus propiedades naturales.

La tierra vegetal adsorbente es una mezcla de materiales orgánicos y minerales que provienen de la descomposición de restos vegetales. Esta tierra suele tener una estructura porosa y una gran superficie específica, lo que le confiere propiedades adsorbentes.

Su capacidad para adsorber diversas sustancias se debe a su estructura porosa y su contenido en materia orgánica. Estas características le permiten capturar y retener contaminantes tanto en líquidos como en gases.

En la gestión de residuos y en la industria, la tierra vegetal puede adsorber compuestos que causan olores, mejorando así la calidad del aire.

Aunque es eficaz para ciertas aplicaciones, la capacidad de adsorción de la tierra vegetal puede variar según su composición exacta y el tipo de contaminantes presentes. Por lo tanto, su eficacia debe evaluarse en función del uso específico y las necesidades del tratamiento.

2.4.12. Aplicaciones industriales de la adsorción

La adsorción, además de estar presente en procesos naturales, tiene aplicaciones industriales significativas que rivalizan con métodos tradicionales como la extracción, la destilación y la cristalización. Su capacidad para retener compuestos en concentraciones extremadamente bajas, como muchos contaminantes, la convierte en una de las tecnologías más empleadas para abordar diversos problemas ambientales.

En particular, los procesos de separación son una de las aplicaciones más destacadas de la adsorción, a menudo reemplazando técnicas de separación como la destilación, la cristalización y la extracción con disolventes. En estos casos, la adsorción suele ser un proceso físico y reversible, lo que permite la reutilización del adsorbente y la recuperación de los adsorbatos. Entre las aplicaciones más comunes se encuentran:

- Separación de gases de mezclas gaseosas: desodorización del aire, eliminación de gases tóxicos, etc.
- Separación de vapores de gases: recuperación de disolventes, secado de gases, deshumidificación del aire, etc.
- Fraccionamiento de mezclas de fluidos y sólidos disueltos: la mayor parte de estas separaciones utilizan como adsorbentes tamices moleculares, por su gran selectividad.

- Separación de iones de disoluciones: compite con el intercambio iónico en la concentración de metales, eliminación de compuestos inorgánicos, recuperación de residuos, desmineralización y ablandamiento de aguas, etc.
- Separación de sólidos no iónicos y coloides disueltos: decoloración y clarificación de aceites vegetales, de fracciones petrolíferas, de melazas, etc.

2.5. Remoción del CO₂

Un biogás enriquecido en metano es aquel que contiene más del 95% de este gas. Para lograr esta concentración, es necesario eliminar el CO₂. La elección del método para la remoción del CO₂ debe basarse en los siguientes criterios:

- Concentración mínima requerida
- Bajo consumo de material absorbente o adsorbente (e.g. fácil regeneración, estabilidad química y térmica)
- Que no genere impactos ambientales significativos
- Que sea fácilmente disponible y a bajo costo

En gran parte de las aplicaciones básicas de biogás, como calentadores, motores de combustión interna o generadores, no es necesario eliminar el CO₂, ya que este gas simplemente se expulsa a través del quemador o motor. Sin embargo, en aplicaciones más complejas, como en vehículos que requieren combustibles con mayor densidad, sí es necesaria la remoción del CO₂. Al eliminar el CO₂, se incrementa el poder calorífico del biogás, generando un gas de calidad similar al del gas natural.

La eliminación de CO₂ puede llevarse a cabo mediante procesos de absorción o adsorción. Otras técnicas disponibles incluyen separaciones por membrana y procesos criogénicos. Un método para eliminar tanto CO₂ como H₂S es el lavado a presión contracorriente con agua. En particular, los factores críticos para la remoción de CO₂ son el pH, la presión y la temperatura. Para optimizar la eliminación de CO₂ del biogás, es recomendable trabajar bajo condiciones de alta presión, baja temperatura y un pH alcalino. El uso de soluciones de Ca(OH)₂ puede eliminar completamente el CO₂ y el H₂S, ya que estos gases son más solubles en ciertos solventes orgánicos como el polietilenglicol, que no disuelven el metano. Así, estos solventes pueden ser utilizados para lavar los gases. Los sistemas que emplean solventes

orgánicos pueden reducir el CO₂ en el biogás a niveles inferiores al 0.5%, aunque su uso resulta más costoso que los sistemas de lavado con agua.

La adsorción de CO₂ en sólidos como el carbón activado, zeolitas y lana de hierro, si bien requiere costos adicionales se ha demostrado que son muy buenos agentes adsorbentes para eliminar el Dióxido de Carbono, H₂S y demás impurezas que se presenten en el biogás.

2.6. Remoción de agua

Cuando el biogás sale del digester, suele estar saturado de vapor. Para evitar la formación de condensado en las tuberías de transporte, es necesario que la humedad relativa del biogás sea inferior al 60%. Este condensado, especialmente al mezclarse con otras impurezas, puede causar corrosión en las paredes de las tuberías. Por lo general, es necesario secar el biogás antes de proceder con su purificación. El secado del biogás se puede realizar mediante compresión, enfriamiento del gas o adsorción en carbón activado.

2.7. Remoción del sulfuro de hidrogeno (H₂S)

El sulfuro de hidrógeno presente en el biogás crudo, al combinarse con el vapor de agua, puede generar ácido sulfúrico (H₂SO₄), que es altamente corrosivo para los motores y sus componentes. Además, a concentraciones superiores a 100 ppm en volumen, el H₂S se vuelve muy tóxico. El carbón activado puede emplearse para eliminar tanto el H₂S como el CO₂, actuando como un catalizador que convierte el H₂S en azufre elemental (S). Otra opción para eliminar el sulfuro de hidrógeno es utilizar soluciones de NaOH, agua o sales de hierro.

Otro método implica inyectar una corriente de biogás con O₂, lo que oxida el H₂S a azufre elemental. Este proceso puede reducir la concentración de H₂S en el biogás a niveles por debajo de 50 ppm, aunque conlleva riesgos de explosión y debe realizarse con precaución. Además, el óxido de hierro también puede eliminar el H₂S, transformándolo en sulfuro de hierro, aunque este método puede ser menos efectivo en condiciones de alta humedad en el biogás.

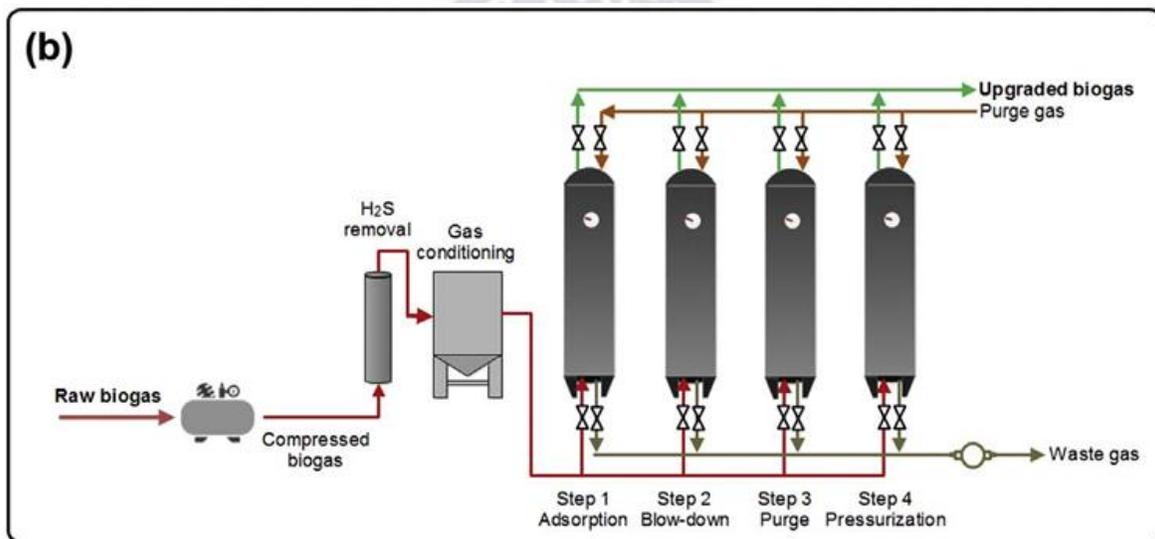
2.8. Adsorción con tecnología de oscilación de presión (PSA)

Esta tecnología permite obtener metano de alta pureza y se basa en la propiedad de los gases de ser atraídos hacia superficies sólidas (adsorción) bajo ciertas presiones. A mayor presión, se adsorbe una mayor cantidad de gas; al reducir la presión, el gas se libera o desorbe. Este

método puede emplearse para separar gases en una mezcla, ya que diferentes gases tienen distintas afinidades por diversas superficies sólidas.

Se pueden utilizar como adsorbentes materiales como carbón activado, zeolitas, tamices moleculares de zeolitas y tamices moleculares de carbón. El sistema funciona a temperaturas cercanas a las ambientales. En condiciones de alta presión, el material adsorbente retiene el CO₂ presente en el biogás. Luego, al cambiar las condiciones y reducir la presión, el CO₂ se desorbe del material adsorbente y se libera.

Figura 13 Tecnología PSA



Fuente: (Angelidaki, 2018)

CAPITULO III – APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1 APLICACIÓN PRACTICA

En este capítulo, se llevarán a cabo los cálculos de carga para un biodigestor semicontinuo con carga diaria, así como los cálculos de producción diaria de biogás. Se explicará cómo se obtienen las muestras iniciales de biogás y se implementarán filtros de carbón activado, zeolita y limadura de hierro, por los cuales deberá pasar el biogás para reducir las concentraciones de H₂S y CO₂. Posteriormente, se tomarán muestras del biogás tratado para realizar pruebas de cromatografía en el laboratorio de IIDEPROQ, perteneciente a la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés, ubicada en la calle 30 de Cota Cota, en el campus universitario de la UMSA.

Una vez que se obtengan las cromatografías del biogás, tanto las iniciales como las finales, se procederá a calcular el poder calorífico de las muestras. Finalmente, se utilizarán los datos de cromatografía de la muestra de biogás inicial para realizar una simulación con el software ASPEN ADSORPTION, con el fin de verificar el aumento en la concentración de CH₄ (metano) y la reducción del CO₂ (dióxido de carbono).

El presente proyecto llevó a cabo su parte experimental en la Estación Experimental de Choquenaira, que forma parte de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés, ubicada en el municipio de Viacha. La estación cuenta con un biodigestor de geomembrana de PVC de 9 m³, tipo semicontinuo con carga diaria, en el área de Bioensumos y Fertilidad, bajo la supervisión de la Ing. María Cari. Este procedimiento experimental comenzó el 31 de julio y se desarrolló de 8 a 12 AM, finalizando el 29 de agosto del presente año.

En este capítulo, se llevarán a cabo los cálculos de carga para un biodigestor semicontinuo con carga diaria, así como los cálculos de producción diaria de biogás, muestreo y tratamiento del biogás, análisis de laboratorio y la simulación con el software Aspen Adsorption. Estos procesos son fundamentales para obtener el mejor rendimiento del biogás y optimizar su poder calorífico. Para ello, se definirán los parámetros necesarios, como la cantidad de materia prima orgánica que se introduce al biodigestor, el tiempo de retención y las condiciones operativas que influyen la producción de biogás.

Se explicará en detalle cómo se obtienen las muestras iniciales de biogás, un paso crítico que garantizará la calidad de los resultados. Las muestras se tomarán de manera controlada, asegurando que representen adecuadamente las condiciones del biodigestor en ese momento. A continuación, se implementarán filtros de carbón activado, zeolita y limaduras de hierro, los cuales deberán pasar el biogás para reducir las concentraciones de H₂S (sulfuro de hidrógeno) y CO₂ (dióxido de carbono). Estos contaminantes son perjudiciales tanto para el medio ambiente como para la salud, y su eliminación es crucial para mejorar la calidad del biogás.

Posteriormente, se tomarán muestras del biogás tratado que serán enviadas al laboratorio de cromatografía de IIDEPROQ, perteneciente a la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés. Este laboratorio, ubicado en la calle 30 de Cota Cota, en el campus universitario de la UMSA, está equipado con tecnología avanzada que permitirá realizar un análisis detallado de la composición del biogás.

Una vez que se obtengan los resultados de cromatografía del biogás, tanto de las muestras iniciales como de las finales, se procederá a calcular el poder calorífico de las muestras. Este cálculo es esencial para evaluar la eficiencia energética del biogás y su viabilidad como fuente de energía. Los resultados permitirán determinar el aumento en la concentración de metano (CH₄), que es el principal componente energético del biogás, así como la reducción de dióxido de carbono.

Finalmente, se utilizarán los datos de cromatografía de la muestra de biogás inicial para realizar una simulación con el software ASPEN ADSORPTION. Este programa es una herramienta poderosa para modelar procesos de adsorción y permitirá verificar el aumento en la concentración de CH₄ y la reducción del CO₂. La simulación ofrecerá una visión integral de cómo los diferentes materiales adsorbentes están afectando la composición del biogás y su rendimiento energético.

El presente proyecto llevó a cabo su parte experimental en la Estación Experimental de Choquenaira, que forma parte de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés. Esta estación, ubicada en el municipio de Viacha, cuenta con un biodigestor de geomembrana de PVC de 9 m³, diseñado como semicontinuo con carga diaria, lo que permite una gestión eficiente de los residuos orgánicos. El área de Bioinsumos y Fertilidad, donde se

desarrolla el experimento, está bajo la supervisión de la Ing. María Cari, quien aporta su experiencia y conocimientos al proceso.

Este procedimiento experimental comenzó el 31 de julio y se desarrolló de 8 a 12 AM, finalizando el 29 de agosto del presente año. Durante este período, se realizó un seguimiento exhaustivo de las condiciones operativas del biodigestor, así como de los parámetros relevantes para asegurar la calidad y representatividad de los datos obtenidos. Estos esfuerzos buscan contribuir al avance del conocimiento sobre la producción y tratamiento del biogás, promoviendo su uso sostenible y eficiente como fuente de energía renovable.

Figura 14 Estación Experimental Choquenaira, Municipio Viacha



Fuente: Foto satelital Google Earth

Ubicación Google Earth: 16°41'33"S 68°17'10"W, altura 3.873 m

3.2 Cálculo para la carga de materia orgánica al biodigestor.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 5% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso.

Por ejemplo, en el caso del estiércol de bovino fresco, suponiendo que tiene un 20% de sólidos totales y se quiere diluir esta carga a un 5% de sólidos totales, para saber cuánta agua se debe agregar por kilo de excretas frescas, se realiza el siguiente cálculo:

$$\%S.T. (carga\ diluida) = \frac{1Kg\ excreta * \%S.T.\ excreta\ fresca}{1Kg\ excreta\ fresca + agua\ agregada} \dots\dots\dots (9)$$

$$0.05 = \frac{1 * 0.20}{1 + W_{agua}}$$

$$0.05 + 0.05W_{agua} = 0.20$$

$$W_{agua} = \frac{0.15}{0.05} = 3 \frac{\text{Litros}}{\text{Kg excreta fresca}}$$

Es decir que por cada Kg de bovino excreta debemos agregar 3 L de agua, para realizar la carga al biodigestor.

En este caso se realizó una adición de 30 L de suero de leche y 1 L de melasa (chanca diluida). Por lo que la carga diaria que se realiza al biodigestor semicontinuo en la Estación Experimental de Choquenaira es la siguiente:

La densidad del estiércol bovino es 0.64 kg/L según (Barbazan, 2010)

$$\rho = \frac{m}{v} \dots\dots\dots (10)$$

$$\rho = \frac{40}{v}$$

$$v = \frac{40Kg}{0.64 \frac{kg}{L}}$$

$$v = 25.6L$$

La densidad del suero de la leche es 1.026 kg/L

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

$$\rho = \frac{m}{30}$$

$$m = \rho * v$$

$$m = 1.026 * 30$$

$$m = \mathbf{30.75Kg}$$

la densidad de la chanca o panela es 1.055 Kg/L

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

$$\rho = \frac{m}{1}$$

$$m = \rho * v$$

$$m = 1.055 * 1$$

$$m = \mathbf{1.055Kg}$$

La densidad del agua es 1 kg/L por lo tanto la masa del agua será igual a **120 Kg**

Tabla 9 Carga total al biodigestor

Materia orgánica y H2O	Volumen (Litros)	Peso (Kg)
Estiércol bovino	25.6	40
Agua	120	120
Melasa (chancaca diluida)	1	1.055
Suero	30	30.75
Total	176.6	191.805

Fuente: Elaboración propia

Esta es la carga diaria que se realiza al biodigestor en dicha estación experimental.

Para realizar el cálculo de la carga diaria, se multiplica por 3 el volumen de estiércol bovino, valor que es determinado por la relación solido-agua.

$$CD = (V * 3) + V \dots \dots \dots (11)$$

$$CD = (25.6 * 3) + 25.6$$

$$CD = \mathbf{102.4 L \approx 0.1024 m^3}$$

3.3 Cálculo para la producción del biogás.

Para realizar los cálculos de producción del biogás, según (Varnero M. T., 2011) menciona el factor de producción de 0.05 m³ por Kg fresco de estiércol bovino y 0.06 m³ por Kg fresco de estiércol porcino.

Tabla 10 Disponibilidad de estiércol para la producción de biogás

Estiércol	Disponibilidad Kg/día	Relación C/N	Volumen de gas	
			m ³ /Kg fresco	m ³ /día
Bovino	10.00	25:1	0.05	0.400
Porcino	2.25	13:1	0.06	0.135
Aves	0.18	19:1	0.08	0.014
Ovino	1.50	35:1	0.05	0.075
Caprino	2.00	40:	0.05	0.100
Equino	10.00	50:1	0.04	0.400
Conejo	0.35	13:1	0.06	0.021
humano	0.40	3:1	0.06	0.025

Fuente: (Varnero M. T., 2011)

Es decir que para la carga diaria que se realiza en la Estación Experimental de Choquenaira de 40 Kg de estiércol bovino fresco la producción de biogás diaria es la siguiente:

$$V_G = f_p * \frac{Kgexcremento}{dia} \dots \dots \dots (12)$$

Donde:

f_p = es el factor de producción por Kg de estiércol fresco

V_G = Volumen del biogás producido por día.

Calculamos el volumen de biogás producido por día.

$$V_G = f_p * \frac{Kgexcremento}{dia}$$

$$V_G = 0.05 \frac{m^3}{Kg} * 40 \frac{Kg}{Dia}$$

$$V_G = 2 \frac{m^3}{dia}$$

3.4 Muestra inicial de biogás

Una vez realizado las cargas diarias al biodigestor se procede a tomar la primera muestra de biogás, para luego realizar y comprobar que tipo de filtro fue el más eficiente en cuanto a aumentar la concentración de CH₄ (Metano) y la remoción de CO₂ (Dióxido De Carbono).

La muestra inicial de Biogás se captó en una bolsa de polietileno (PE) con cierre hermético, para luego ser trasladado al laboratorio de IIDEPROQ.

Figura 15 Muestra inicial de biogás



Fuente: Elaboración propia

El resultado obtenido mediante un *Cromatógrafo de gases, detector TCD, columna supelco-Carboxean*.

Tabla 11 *Cromatografía del biogás de muestra inicial*

RESULTADOS				
CÓDIGO	UNIDAD	CH₄	CO₂	MÉTODO
BIOGÁS ORIGINAL	%	56.99	38.89	<i>Cromatografía de gases, detector TCD, columna supelco-Carboxean.</i>

Fuente: Elaboración propia

Un proyecto de investigación realizado con base y monitoreo anual de producción de biogás a partir de estiércol porcino de la Unidad Experimental de Producción de Biogás (UEPB) de la Universidad Privada del Valle, Campus Tiquipaya. (Salazar Del Pozo Luis Fernando, 2023). Los cuales realizaron remoción de CO₂ y H₂S mediante el método de adsorción utilizando zeolita, carbón activado y limaduras de hierro.

3.5 Contenido de H₂S previo al tratamiento

Tabla 12 *Contenido de H₂S*

Prueba	H₂S (ppm)
1	1832.62

Fuente: (Salazar Del Pozo Luis Fernando, 2023).

La exposición prolongada a más de 100 ppm o 0.01% de sulfuro de hidrógeno puede producir desde dolor de cabeza hasta la pérdida de consciencia y valores de más de 10 ppm generan corrosión tanto en líneas de gas como en equipos por lo que este gas contaminante debe ser removido de 100 a 10 ppm para ser utilizado en la generación de energía (Varnero M. T., 2011).

3.6 Contenido de CO₂ previo al tratamiento

Tabla 13 *Contenido de CO₂ inicial*

Prueba	CO₂ (%)
1	30.8

Fuente: (Salazar Del Pozo Luis Fernando, 2023).

Al eliminarse el total o parcial del contenido de CO₂ del biogás, este alcanzará un mejor rendimiento ya que aumentará su capacidad calorífica.

Tabla 14 Contenido del biogás

RESULTADO					
CÓDIGO	UNIDAD	CH4	CO2	H2S	MÉTODO
BIOGÁS					Equipo medidor de gases portátil
ESTIÉRCOL	%	67.368	30.8	1.832	Kane para el CO2.
PORCINO (UEPB)					Equipo ToxiRAE Pro PGM-1860 para el H2S.

Fuente: (Salazar Del Pozo Luis Fernando, 2023).

3.7 Determinación del poder Calorífico del biogás original (previo al tratamiento), a partir de estiércol bovino.

El biogás generado en el digester, debido a su contenido de metano, tiene un poder calorífico que oscila entre 4,500 y 5,600 (Kcal/m³). Este poder calorífico está determinado por la concentración de metano, 8,500 (Kcal/m³), y puede incrementarse al eliminar completamente o en parte el CO₂ (Dióxido de Carbono) del biogás.

El poder calorífico del metano (CH₄) es aproximadamente 8,500 Kcal/m³ cuando se mide en condiciones normales. Este valor puede variar ligeramente dependiendo de la temperatura y la presión. En términos de energía, el metano es un combustible muy eficiente, lo que lo convierte en una fuente importante de energía en diversas aplicaciones

El poder calorífico de un compuesto gaseoso se determina multiplicando el poder calorífico del metano por la concentración de dicho compuesto en el biogás.

$$PC_{Original} = concentracion\% * PC_{Real} \dots \dots \dots (13)$$

$$PC_{Original} = 0.5699 * 8,500 \frac{Kcal}{m^3}$$

$$PC_{Original} = 4,844.15 \frac{Kcal}{m^3}$$

3.7.1. Determinación del poder Calorífico del biogás original (previo al tratamiento), a partir de estiércol porcino.

$$PC_{Original} = concentracion\% * PC_{Real}$$

$$PC_{Original} = 0.67368 * 8,500 \frac{Kcal}{m^3}$$

$$PC_{Original} = 5,726.28 \frac{Kcal}{m^3}$$

El poder calorífico es la energía que se libera cuando un material se quema (se oxida por el oxígeno). Como el CO₂ ya se ha oxidado hasta el límite de su capacidad, es imposible quemarlo, por lo tanto, el poder calorífico del CO₂ es nulo. Es decir que el poder calorífico del biogás depende netamente de la concentración de metano presente.

3.7.2. Adsorción con Carbón Activado

Tabla 15 *Biogás composición*

	Entrada	Salida
Presión en mbar	5	< 1
Contenido de H₂S (ppm)	1832.5	1-10 (caudal bajo) 20-100 (caudal alto)
Contenido de CO₂	30.8	25
Volumen de Saturacion		85-100

Fuente: (Salazar Del Pozo Luis Fernando, 2023).

Tabla 16 *Biogás obtenido por adsorción*

RESULTADO					
CODIGO	UNIDAD	CH₄	CO₂	H₂S	METODO
BIOGÁS					Equipo medidor de gases portátil
ESTIÉRCOL					Kane para el CO ₂ .
PORCINO	%	74.99	25	0.01	Equipo ToxiRAE Pro PGM-1860
(UEPB)					para el H ₂ S.

Fuente: (Salazar Del Pozo Luis Fernando, 2023).

Se puede observar tanto como el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrogeno han reducido significativamente y así dar paso al incremento de concentración del metano.

3.7.3. Determinación del poder Calorífico del biogás resultante, a partir de estiércol porcino.

$$PC_{Resultante} = \text{concentracion}\% * PC_{Real}$$

$$PC_{Resultante} = 0.7499 * 8,500 \frac{Kcal}{m^3}$$

$$PC_{Resultante} = 6,374.15 \frac{Kcal}{m^3}$$

3.8. Método de adsorción (implementación de filtros)

En esta etapa de la aplicación práctica se realizó un filtro de material de PVC para eliminar las impurezas presentes el biogás crudo, se usa material de PVC, por la presencia del sulfuro de hidrogeno que es altamente corrosivo.

Se utilizaron los siguientes materiales:

- Tubería de PVC de 2 pulgadas
- Unión universal de 2 pulgadas
- 3 unión universal de ½ pulgada
- 2 válvulas de PVC de ½ pulgada
- 2 codos de ½ pulgada
- Teflón
- Malla milimétrica de plástico
- Cierra mecánica
- Lija para PVC
- Llave crecen
- 1 Kg de carbon Activado
- 2 Kg de Zeolita
- Lana de Hierro
- 1 metros de tubería de PVC de ½ pulgada
- Bolsa de polietileno con cierre hermético para la toma de muestras

Figura 16 *Materiales*



Fuente: Elaboracion propia

3.9. Simulacion Aspen Adsorption

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica de investigaciones y estudios publicados con el objetivo de seleccionar el software adecuado. En la actualidad, resalta el software Aspen Adsorption, que ofrece un enfoque innovador para el modelado, maximizando la productividad en el diseño, simulación y optimización de tecnologías de adsorción cíclica para la separación de gases, es un simulador completo que permite el diseño, simulación, optimización y análisis de procesos de adsorción de líquidos y gases industriales.

Aspen Adsorption® es un software creado por Aspen Tech que se utiliza para simular procesos de adsorción, además de permitir simulaciones de flujo. Este programa es útil para diseñar y optimizar la calidad de los gases. Su objetivo principal es facilitar la selección de adsorbentes adecuados, dimensionar correctamente las unidades y columnas de adsorción, y

diseñar ciclos de adsorción más eficientes. Es apto para simular procesos de adsorción tanto de gases como de líquidos, incluyendo modelos de estado estacionario, adsorción dinámica de gases, intercambio iónico y adsorción de gases. El software ofrece varias plantillas y demostraciones que permiten crear modelos completos, así como avances simples para la separación de aire y modelos TSA, VSA y PSA para múltiples componentes, incluyendo un caso de adsorción reactiva.

El software incluye bases de datos de materiales adsorbentes, lo que facilita la selección de los más adecuados para un proceso específico, como carbón activado, zeolitas o sílice.

Aspen Adsorption ayuda a optimizar variables como la temperatura, la presión y el flujo, permitiendo a los usuarios evaluar cómo estos factores afectan la eficiencia del proceso.

Genera gráficos y reportes detallados que permiten analizar el rendimiento del sistema y la pureza del producto final.

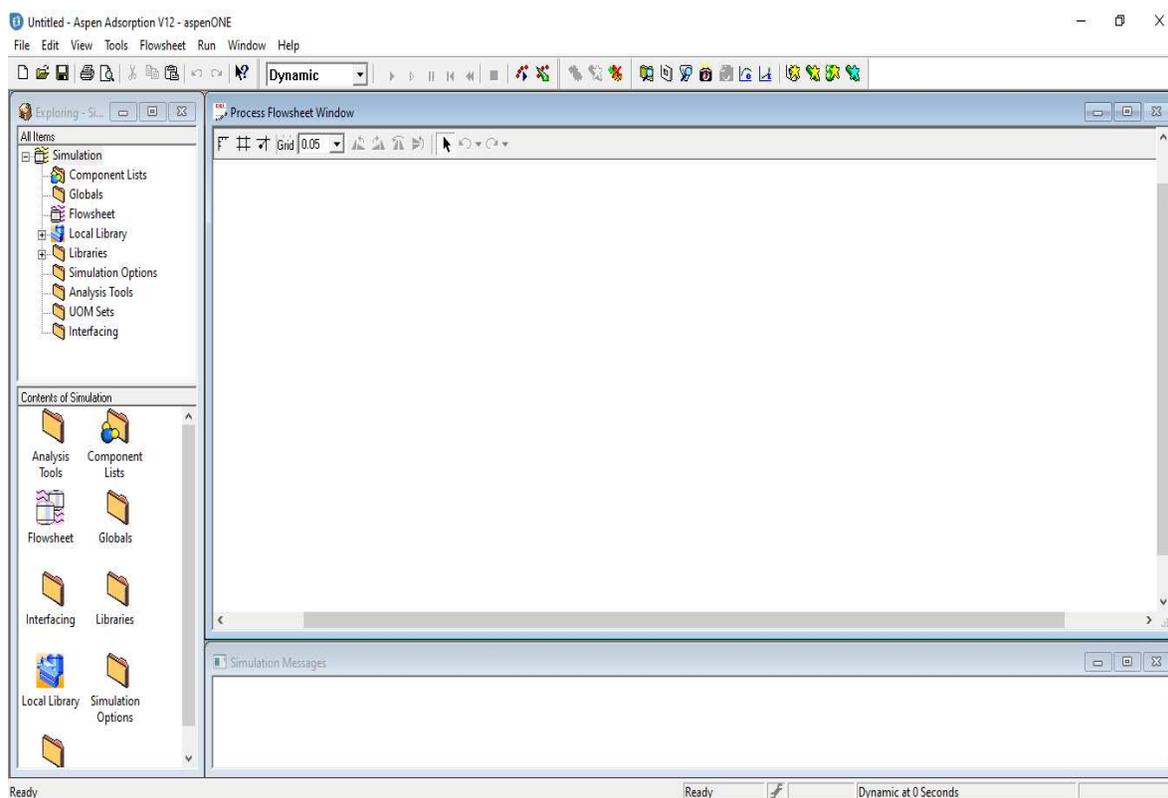
Aspen Adsorption ayuda a optimizar variables como la temperatura, la presión y el flujo, permitiendo a los usuarios evaluar cómo estos factores afectan la eficiencia del proceso

Además, se amplió la búsqueda sobre el entorno de modelado utilizando manuales y guías publicadas sobre el software (Wood, 2018), para entender sus requisitos y principales aplicaciones, seguida de una exploración práctica del simulador. El modelo de lecho dinámico en Aspen Adsorption se fundamenta en ecuaciones clave para una cama adsorbente compuesta por múltiples capas, que incluyen isothermas (termodinámica), balances de masa y energía para gas y sólido, así como transferencias de masa y calor y caída de presión. Finalmente, se eligió este software por su ventaja competitiva, ya que incluye una herramienta llamada "cycle organizer", que facilita el control de la duración de los diferentes pasos secuenciales, las variables manipuladas y el establecimiento de condiciones como caudal, composición, temperatura y presión.

3.9.1. Interfaces Aspen Adsorption

La Figura 17 muestra la interfaz inicial del software. El modo de ejecución, actualmente en dinámico, puede ser cambiado a otras cuatro configuraciones. Estas configuraciones incluyen inicialización, estado estacionario, estimación y mejoramiento.

Figura 17 *Interface inicial Aspen Adsorption*



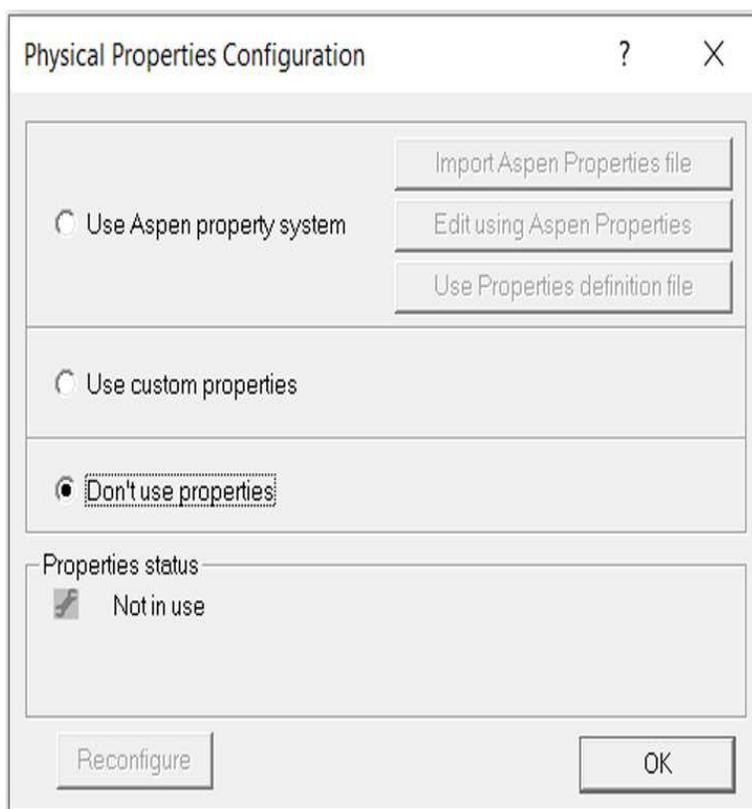
Fuente: Elaboracion propia

3.9.2. Selección de componentes

Lo primero que se requiere en el simulador es definir la lista de componentes, la mejor manera es importar estos componentes desde Aspen Properties, donde tanto los componentes como las propiedades se pueden seleccionar con métodos de propiedad física. Los siguientes pasos son pautas generales para agregar los componentes:

- En la ventana "all items" de la pestaña "Exploring-Simulation" de la interfaz principal, Haga clic en la carpeta "Component List".
- En la segunda ventana de la pestaña "Exploring-Simulation", ahora sera "Contents of components lists", habría tres opciones disponibles, doble clic en "Configure properties". Se abriría una ventana como se muestra en la Figura 18.

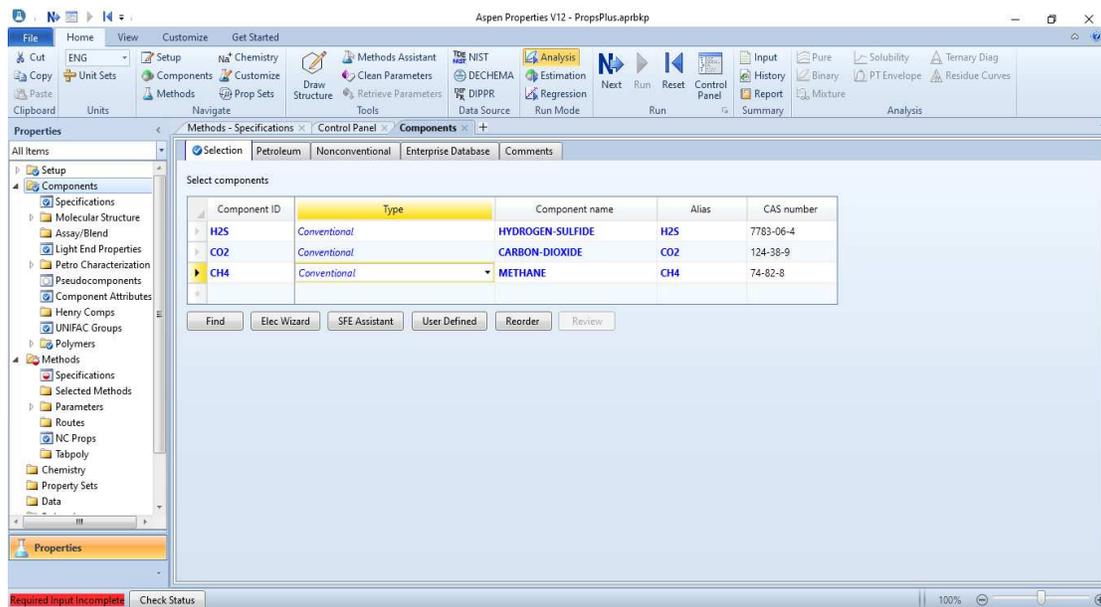
Figura 18 Configuración de componentes



Fuente: Elaboración propia

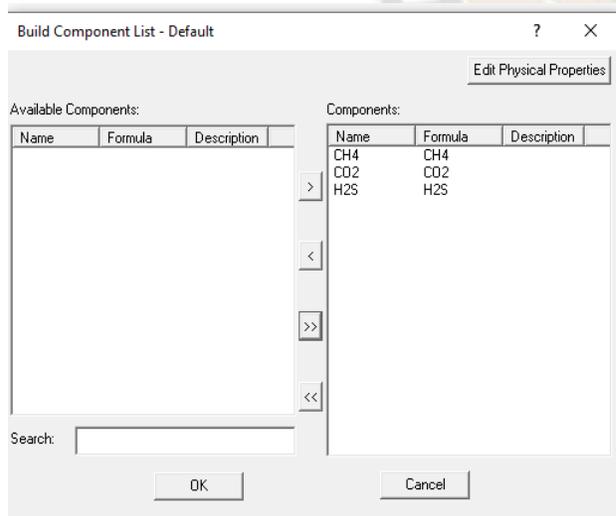
- Marque la opción " Use Aspen property system". Luego haga clic en "Edit using Aspen properties", esa es la segunda opción en la ventana.
- Aspen Plus se abriría para el método de selección de componentes y propiedades. La ventana se muestra en la Figura 19. Para este ejemplo, se muestran CH₄, H₂S y CO₂. Entonces Haga clic en la pestaña "Methods" y elija un método de propiedad adecuado. Para estos componentes, UNIQUAC funciona bien.
- Haga clic en el botón "Run" y luego regrese a la ventana de Adsorción de Aspen. Hacer clic en OK. Luego regrese a Propiedades de Aspen y haga clic en la opción Sí para guardar un archivo de respaldo.
- Ahora se abrirá una ventana "Crear lista de componentes", transfírela a los componentes de la derecha lado, debajo de la pestaña de componentes y haga clic en Aceptar. Esto se muestra en la Figura 20.

Figura 19 Selección de componentes y métodos con la ayuda de las propiedades de Aspen.



Fuente: Elaboracion propia

Figura 20b Crear ventana de lista de componentes

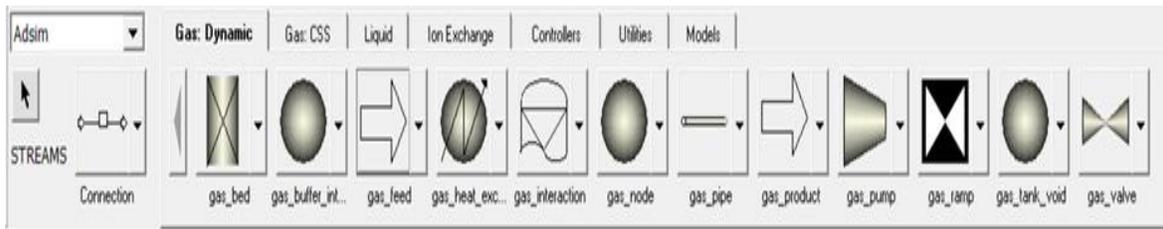


Fuente: Elaboracion propia

3.9.3. Configuración de lecho adsorbente

El alcance del simulador es la adsorción dinámica de diferentes gases sobre sólidos. Los modelos y las opciones disponibles se muestran en la Figura 21.

Figura 21 Opciones de modelo disponibles en Gas: ventana dinámica

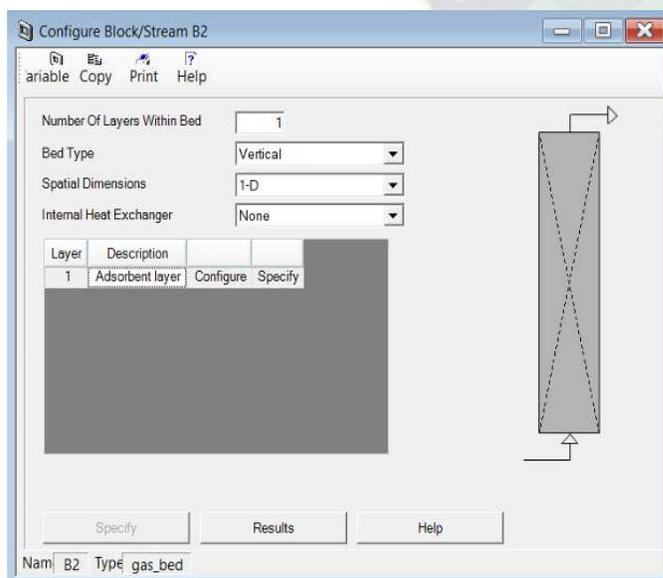


Fuente: Elaboracion propia

El componente principal que está ampliamente definido es el lecho de gas para la adsorción. Se pueden seguir los siguientes pasos para definir el **gas_bed**:

- Haga clic en el ícono **gas_bed** una vez y haga clic izquierdo en cualquier lugar del diagrama de flujo principal una vez. Luego haga clic derecho en cualquier lugar para dejar de colocar más camas de gas. Haga doble clic en **gas_bed** eso está ahora en el diagrama de flujo principal.
- La configuración del bloque se abriría como se muestra en la Figura 22. Las opciones predeterminadas son las más simple con una sola capa dentro del lecho vertical, sin calor interno intercambiador.

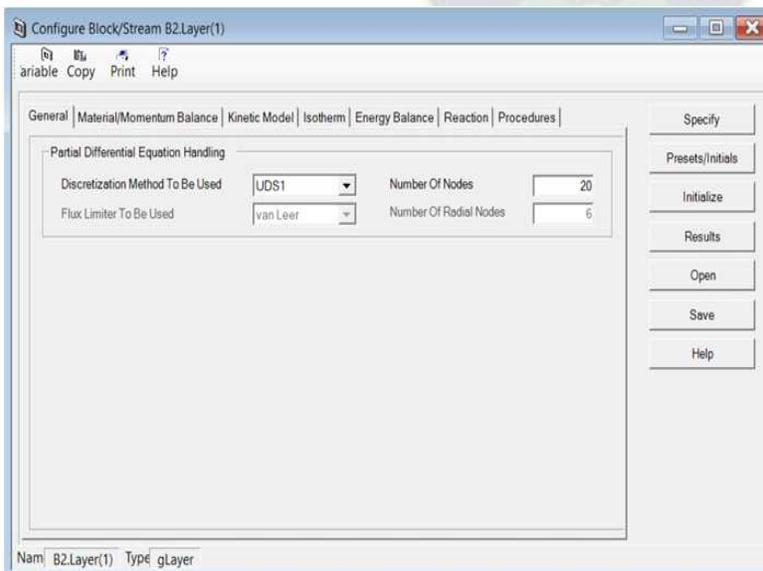
Figura 22 Ventana de configuración de la columna de adsorción.



Fuente: Elaboracion propia

- Haga clic en la opción “Configure”. Hay siete pestañas diferentes y la pestaña "General" es lo que se abre primero, como se muestra en la Figura 23. El esquema de diferenciación contra el viento 1 (UDS1) es la opción predeterminada para Discretización de ecuaciones diferenciales parciales (PDE) y es adecuado para la mayoría de los casos. La discretización es un método mediante el cual las PDE complejas se convertido a sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas. La solución de estas ecuaciones da un resultado aproximado, pero dificulta el procesamiento por computadora relativamente más fácil y rápido.
- Para el esquema de USD1, los resultados son bastante precisos y el tiempo de cálculo es rápido para los modelos dinámicos. Este esquema se basa en la expansión de Taylor de primer orden, y es estable para las ecuaciones de primer orden. Otros métodos disponibles son la diferenciación contra el viento, esquema 2 (UDS2), esquema de diferenciación central 1 y 2 (CDS1 y CDS2), sesgado esquema de diferenciación contra el viento (BUDS), limitador de flujo, esquema de Fromm, contra el viento cuadrático esquema (QDS), esquema de diferenciación Leonard (LDS) y esquema de diferenciación mixto. Las ecuaciones detalladas para estos esquemas se encuentran en la ayuda de Aspen.

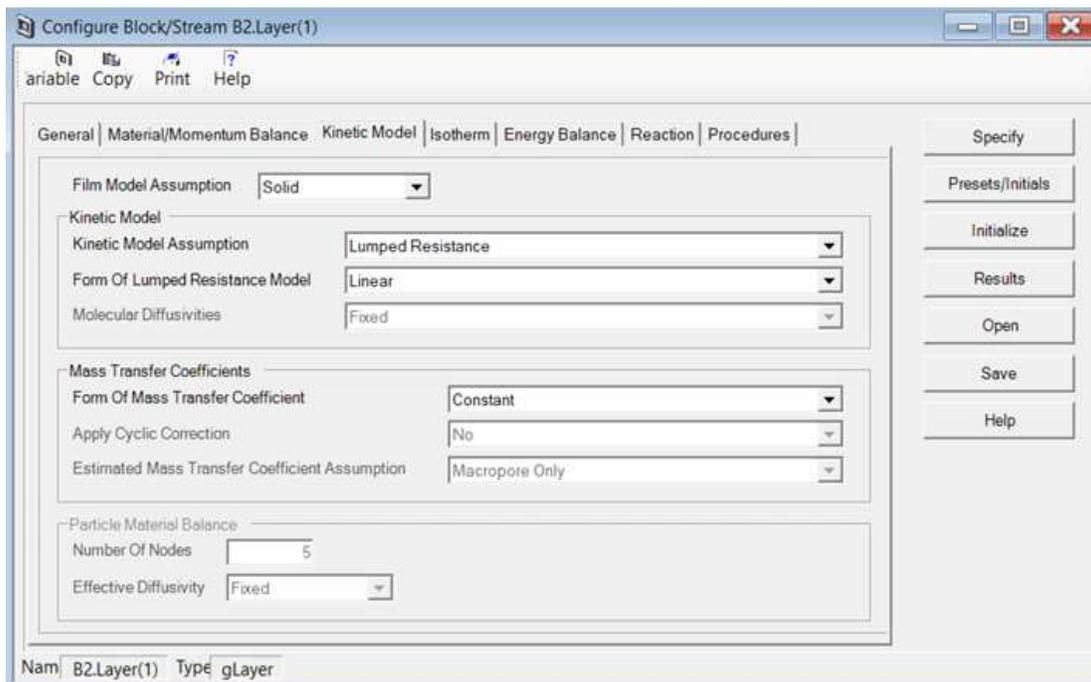
Figura 23 Pestaña general de la ventana de configuración



Fuente: Elaboracion propia

- Lo siguiente es la selección del modelo cinético. Las opciones predeterminadas se muestran en la Figura 24. El modelo de resistencia lineal concentrada (lumped Resistance) es análogo al LDF. La opción predeterminada es este modelo de resistencia lineal concentrada, y es la más simple opción de elegir.

Figura 24 Pestaña Kinetic Model de la ventana de configuración

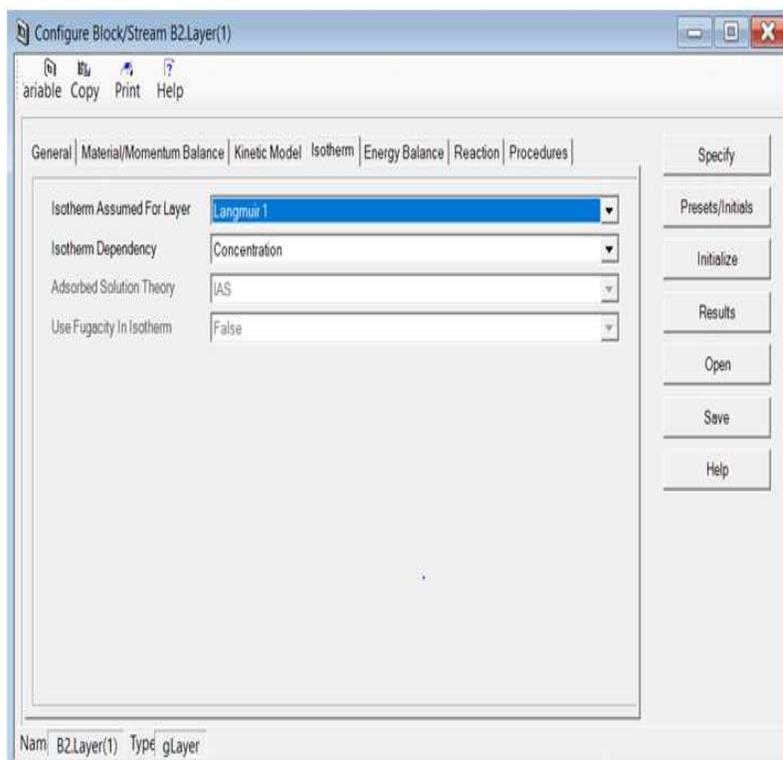


Fuente: Elaboración propia

- Para la ventana **Isotherm**, hay 38 opciones disponibles para la selección de Tipo isoterma. Estas isotermas son B.E.T, B.E.T multicapa, B.E.T de doble capa, Dual Sitio Langmuir, Sitio dual Langmuir 2, Sitio dual Langmuir 2 con I.A.S, Dubinin Astakov, Dubinin-Radushkevich con I.A.S, Langmuir ampliado 1, Langmuir ampliado 2, Langmuir ampliado 3, Langmuir-Freundlich ampliado, Freundlich 1, Freundlich 2, Henry 1, Henry 2, I.A.S B.E.T Multicapa, I.A.S Freundlich 1, I.A.S Freundlich 2, I.A.S. Henry 1, IAS Henry 2, IAS Langmuir 1, IAS Langmuir 2, IAS Langmuir 3, IAS Langmuir 3, IAS. Langmuir-Freundlich, Langmuir 1, Langmuir 2, Langmuir 3, Langmuir-Freundlich, Lineal, Myers, B.E.T de una sola capa, Toth, Procedimiento de usuario, Procedimiento de usuario con I.A.S, Submodelo de usuario, Submodelo de usuario con I.A.S y Volmer. Los detalles y ecuaciones de estas

isotermas se pueden encontrar en la sección de ayuda de Aspen Adsorber®. Dependencia de isoterma, se puede elegir entre concentración y presión parcial. Se muestra la ventana isotérmica en la Figura 25.

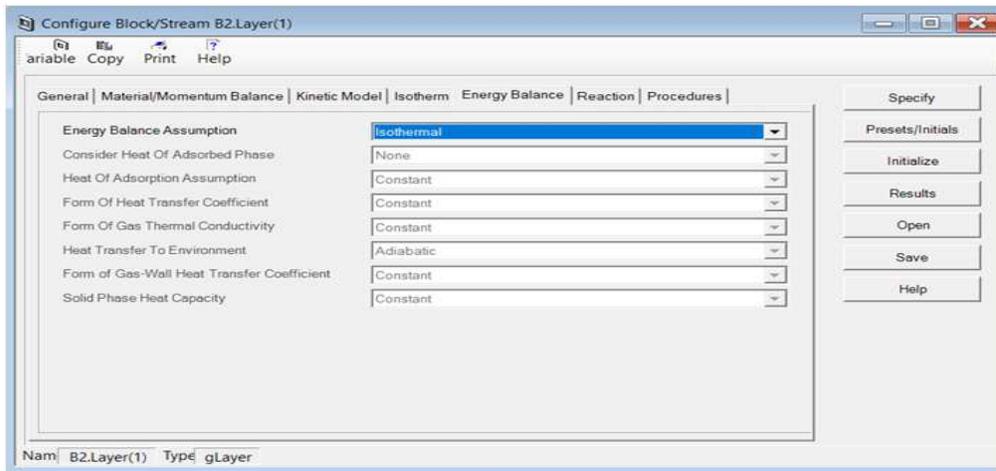
Figura 25 Pestaña Isotherm de la ventana de configuración



Fuente: Elaboración propia

- La opción predeterminada en la pestaña "Energy Balance" es la suposición isotérmica. Además de esto, existen cuatro opciones no isotérmicas. Para opciones no isotérmicas, es necesario especificar otras opciones, como el coeficiente de transferencia de calor y la conductividad térmica. Esto se muestra en la Figura 26. La siguiente pestaña "Reacción" es para especificar la reacción en caso de adsorción reactiva. La pestaña "Procedimientos" se utiliza para proporcionar al usuario procedimientos en caso de que no hubiéramos elegido componentes de Aspen Properties. Además, se puede utilizar para proporcionar una isoterma especificada por el usuario. El método común es proporcionando su propio código FORTRAN.

Figura 26 Pestaña Energy Balance de la ventana de configuración



Fuente: Elaboracion propia

3.9.4. Especificación del Gas_Bed

El siguiente paso es dar los valores específicos para la cama y luego asignar valores iniciales para algunos de los parámetros. Haga clic en el botón "Specify" debajo de la ventana "Configure block", esta ventana se muestra en la Figura 27. Estas especificaciones dependen de cómo esté configurada el lecho en primer lugar. Lo que se muestra es el mínimo que se necesita proporcionar. Luego, la Figura 28 muestra "Presets/Inicialize". Nuevamente, solo necesita hacer clic en este botón debajo de la misma ventana. Estos valores son la estimación inicial para el primer nodo. Después de dar los valores iniciales. Necesitamos hacer clic en el botón "Inicialize" para especificar los valores del nodo 1 para los nodos restantes.

Figura 27 Specify para el lecho

	Value	Units	Description
Hb	1,0	m	Height of adsorbent layer
Db	0,25	m	Internal diameter of adsorbent layer
Ei	0,42	m ³ void/m ³ bed	Inter-particle voidage
Ep	0,21	m ³ void/m ³ bead	Intra-particle voidage
RHOs	592,0	kg/m ³	Bulk solid density of adsorbent
Rp	1,e-003	m	Adsorbent particle radius
SFac	1,0	n/a	Adsorbent shape factor
Direction	0,0	n/a	Specified flow direction (self determined: 0, forward: 1)

Fuente: Elaboracion propia

Figura 28 Presets/Initials para el lecho

	Value	Units	Spec	Derivative	Description
ProfileType	Constant				Is the bed initially specified with constant or
Y_First_Node(*)					
Y_First_Node("NITROGEN")	0.5	kmol/kmol	Initial		Mole fraction within first element
Y_First_Node("WATER")	0.5	kmol/kmol	Initial		Mole fraction within first element
Vg_First_Node	3.55e-004	m/s	Initial		Gas velocity within first element
W_First_Node(*)					
W_First_Node("NITROGEN")	0.0	kmol/kg	RateInitial	0.0	Solid loading within first element
W_First_Node("WATER")	0.0	kmol/kg	RateInitial	0.0	Solid loading within first element

Fuente: Elaboracion propia

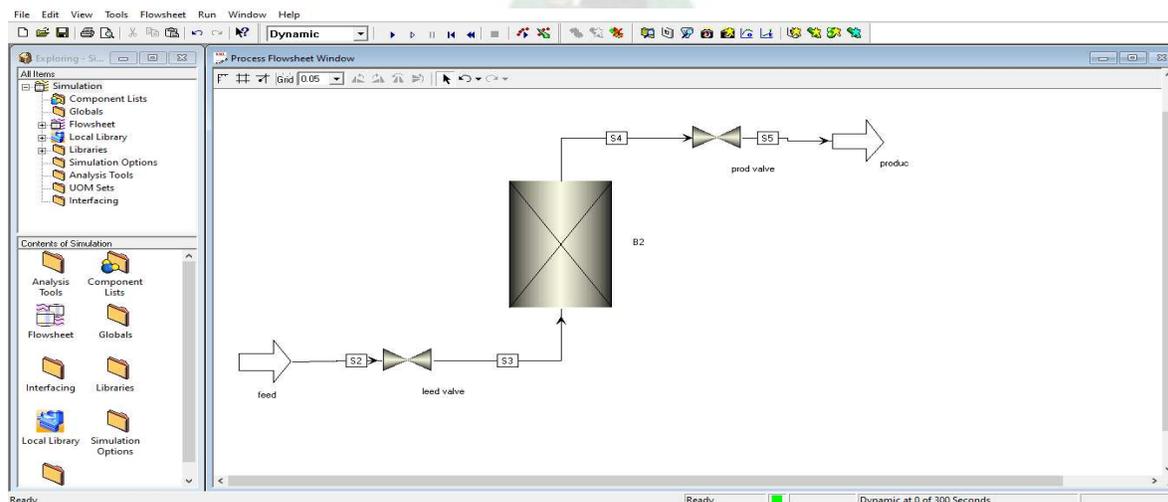
3.9.5. Organizador de ciclos

El organizador de ciclos es la herramienta utilizada para crear los pasos que definen un proceso cíclico como TSA o PSA. Se puede crear una cantidad de pasos diferentes para representar cada etapa del proceso. El paso puede basarse en un evento como que el lecho alcance una determinada temperatura o presión. También puede determinarse simplemente especificando un tiempo de fin de paso. Cada paso del ciclo se puede especificar con variables manipuladas como caudal, presión, y temperatura. Es mejor instalar válvulas para las corrientes cuyos caudales se van a determinar. manipulado.

3.10. Simulacion en Aspen Adsorption

Separacion de methano y dioxido de carbono, metodo de purificacion del biogás.

Figura 29 Circuito completo de simulación



Fuente: Elaboracion propia

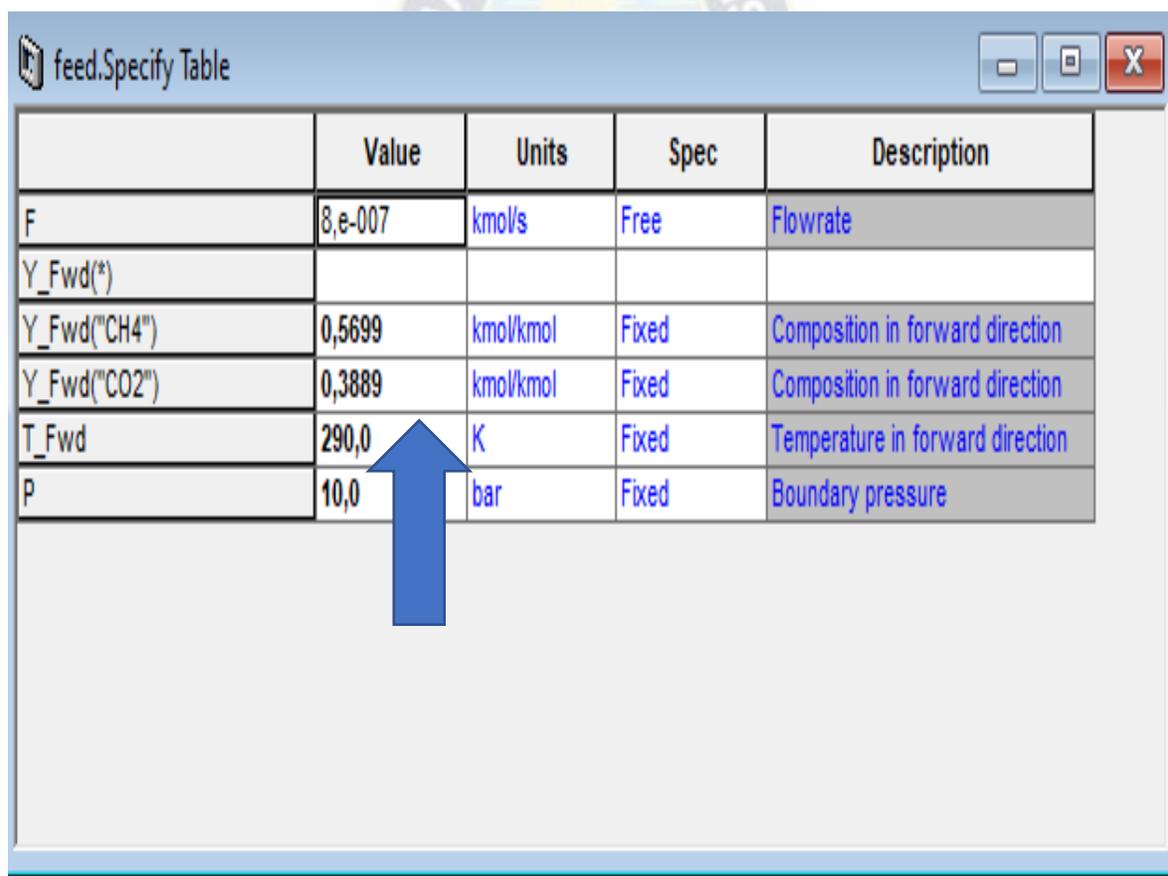
Tabla 17 Muestra inicial del biogás

RESULTADOS				
CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
BIOGÁS ORIGINAL	%	56.99	38.89	Cromatografía de gases, detector TCD, columna supelco-Carboxean.

Fuente: Elaboracion propia

Los datos de concentracion inicialmente obtenidos del biogás previo al tratamiento, tanto del metano como del dióxido de carbono, incorporados a la alimentacion en el software se muestran en el siguiente gráfico:

Figura 30 Especificaciones de la alimentación



	Value	Units	Spec	Description
F	8,e-007	kmol/s	Free	Flowrate
Y_Fwd(*)				
Y_Fwd("CH4")	0,5699	kmol/kmol	Fixed	Composition in forward direction
Y_Fwd("CO2")	0,3889	kmol/kmol	Fixed	Composition in forward direction
T_Fwd	290,0	K	Fixed	Temperature in forward direction
P	10,0	bar	Fixed	Boundary pressure

Fuente: Elaboracion propia

Las especificaciones del flujo de alimentaci3n se dan en la siguiente tabla:

Tabla 18 *Especificaciones del flujo de alimentación*

Description (Units)	Specification	Value/Type
Model type	Free	Reversible pressure setter
Flowrate (kmol/s)	Fixed	
Composition in forward direction, CH ₄ (kmol/kmol)	Fixed	0.62
Composition in forward direction, CO ₂ (kmol/kmol)	Fixed	0.38
Temperature in forward direction (K)	Fixed	290.0
Boundary pressure (bar)	Fixed	10

Fuente: Aspen Adsorption**Tabla 19** *Especificaciones para el lecho*

Specification type	Specification	Selected option
General	Discretization method to be used	UDS1
	Number of nodes	20
Material/momentum balance	Material balance assumption	Convection only
	Momentum balance assumption	Karman-Kozeny
	Film model assumption	solid
Kinetic model	Kinetic Model Assumption	Lumped resistance
	Form of lumped resistance model	linear
	Form of mass transfer coefficient	constant
Isotherm	Isotherm Assumed for Layer	Extended Langmuir 2
	Isotherm Dependency	Partial Pressure
Energy balance	Energy Balance Assumption	Non-isothermal with gas and solid conduction
	Heat transfer to environment	Adiabatic

Fuente: Aspen Adsorption

Para el balance energético se toma el caso no isotérmico. La conducción se considera entre sólido y fase gaseosa. Se supone una transferencia de calor adiabática al medio ambiente.

Las especificaciones del lecho se dan en la siguiente tabla, para este caso se elige un adsorbente de carbono activado. Se toman valores de transferencia de masa más altos solo para que la simulación alcance el equilibrio más rápido. El valor de CO₂ es mucho más alto en comparación con el CH₄ ya que el CO₂ se adsorbe fuertemente, esto ayuda con la simulación se ejecuta más rápido.

Tabla 20 Especificaciones del adsorbente (carbón activado)

Specification (units)	Value
Height of adsorbent layer (m)	0.163
Internal diameter of adsorbent layer (cm)	1.6
Inter-particle voidage (m ³ void/ m ³ bed)	0.52
Intra-particle voidage (m ³ void/ m ³ bead)	0.59
Bulk solid density of adsorbent (kg/m ³)	515.93
Adsorbent particle radius (mm)	0.4
Adsorbent shape factor	1.0
Constant mass transfer coefficients CH ₄ (1/s)	5.0
Constant mass transfer coefficients CO ₂ (1/s)	110
Adsorbent specific heat capacity (J/kg/K)	1000
Constant heat of adsorption for CH ₄ (J/kmol)	-1.8*10 ⁷
Constant heat of adsorption for CO ₂ (J/kmol)	-2.26*10 ⁷
Constant for the gas phase heat conductivity (W/m/K)	0.025
Adsorbent thermal conductivity (W/m/K)	0.6
Specific surface area of adsorbent (1/m)	2057.14

Fuente: Aspen Adsorption

Tabla 21 *Parámetros de la isoterma para el lecho*

Isotherm parameters (Units)	Value
IP1 CH4 (kmol/ kg bar)	$6.31 \cdot 10^{-6}$
IP1 CO2 (kmol/ kg bar)	$1.27 \cdot 10^{-5}$
IP2 CH4 (K)	1056
IP2 CO2 (K)	1187
IP3 CH4 (1/bar)	$4.7 \cdot 10^{-5}$
IP3 CO2 (1/bar)	$1.23 \cdot 10^{-4}$
IP4 CH4 (K)	1067
IP4 CO2 (K)	1210

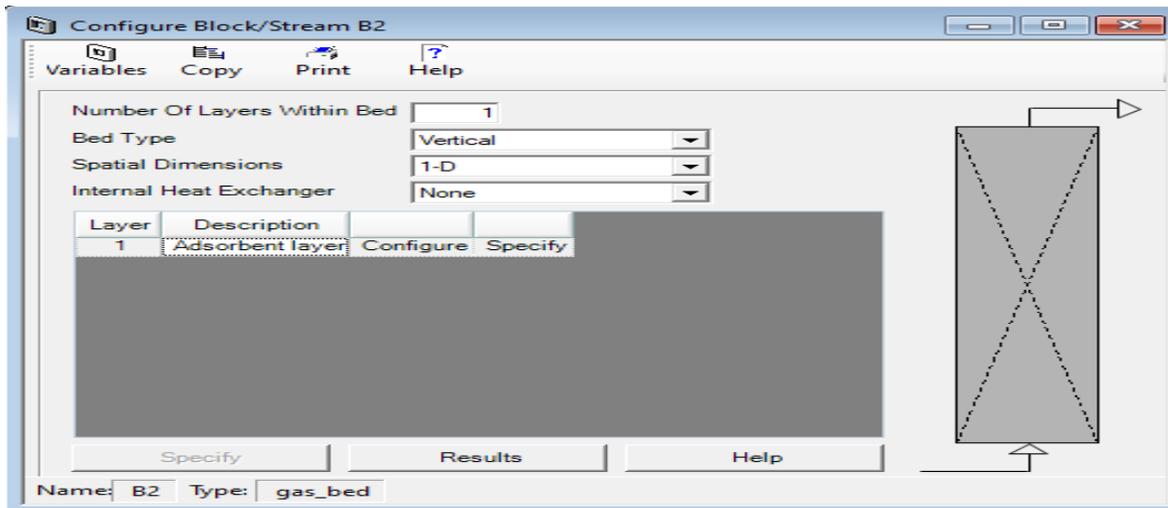
Fuente: Aspen Adsorption

Tabla 22 *Valores iniciales del primer nodo del lecho*

Node Description (Units)	Specification	Value
Mole fraction within first element, CH4 (kmol/kmol)	Initial	1.0
Mole fraction within first element, CO2 (kmol/kmol)	Initial	0.0
Solid loading within first element, CH4 (kmol/kg)	Rateinitial	0.0
Solid loading within first element, CO2 (kmol/kg)	Rateinitial	0.0

Fuente: Aspen Adsorption

Figura 31 Configuración del Lecho



Fuente: Elaboracion propia

Figura 32 Valores del lecho y adsorbente

	Value	Units	Description
Hb	0,163	m	Height of adsorbent layer
Db	1,6	cm	Internal diameter of adsorbent layer
Ei	0,52	m ³ void/m ³ bed	Inter-particle voidage
Ep	0,59	m ³ void/m ³ bead	Intra-particle voidage
RHOs	515,93	kg/m ³	Bulk solid density of adsorbent
Rp	0,7	mm	Adsorbent particle radius
SFac	1,0	n/a	Adsorbent shape factor
MTC(*)			
MTC("CH4")	5,0	1/s	Constant mass transfer coefficients
MTC("CO2")	110,0	1/s	Constant mass transfer coefficients
Dm(*)			
Dm("CH4")	2,206e-005	m ² /s	Molecular diffusivity
Dm("CO2")	2,206e-005	m ² /s	Molecular diffusivity
IP(*)			
IP(1,"CH4")	6,31e-006	n/a	Isotherm parameter
IP(1,"CO2")	1,27e-005	n/a	Isotherm parameter
IP(2,"CH4")	1056,0	n/a	Isotherm parameter
IP(2,"CO2")	1187,0	n/a	Isotherm parameter
IP(3,"CH4")	4,7e-005	n/a	Isotherm parameter
IP(3,"CO2")	1,23e-004	n/a	Isotherm parameter
IP(4,"CH4")	1067,0	n/a	Isotherm parameter
IP(4,"CO2")	1210,0	n/a	Isotherm parameter
Direction	0,0	n/a	Specified flow direction (self determined: 0, forward: 1)
Cps	1000,0	J/kg/K	Adsorbent specific heat capacity
DH(*)			
DH("CH4")	-1,8e+007	J/kmol	Constant for heat of adsorption
DH("CO2")	-2,26e+007	J/kmol	Constant for heat of adsorption
HTC	1,0	MW/m ² /K	Constant for the heat transfer coefficient
Kg	0,025	W/m/K	Constant for the gas phase heat conductivity
Ks	0,6	W/m/K	Adsorbent thermal conductivity
ap	2057,14	1/m	Specific surface area of adsorbent

Fuente: Elaboracion propia

Es importante tener en cuenta que los caudales no están especificados y más bien están controlados por las válvulas de control.

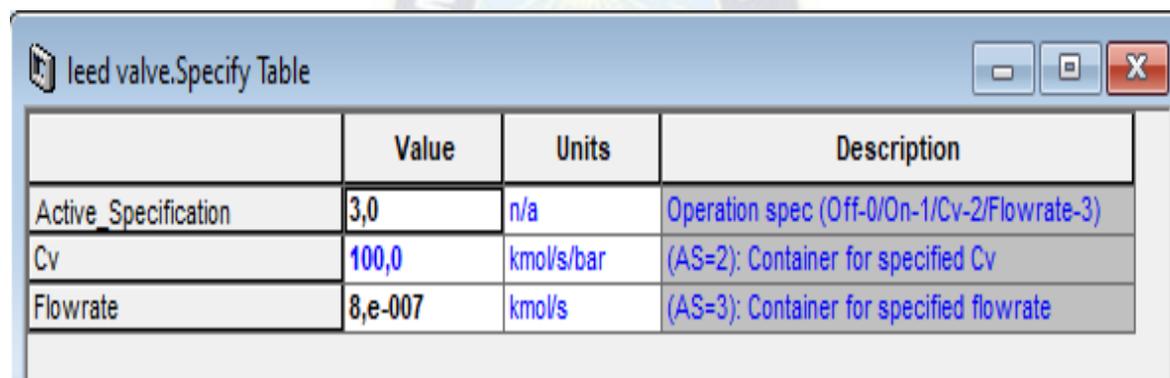
Especificaciones de salida y entrada de la valvula de control.

Tabla 23 *Valores de entrada y salido de válvula*

Specifications	Inlet Valve	Outlet Valve
Active specification	3.0	1.0
Cv (kmol/s/bar)	100.0	100.0
Flowrate (kmol/s)	$8 \cdot 10^{-7}$	0.05

Fuente: Elaboracion propia

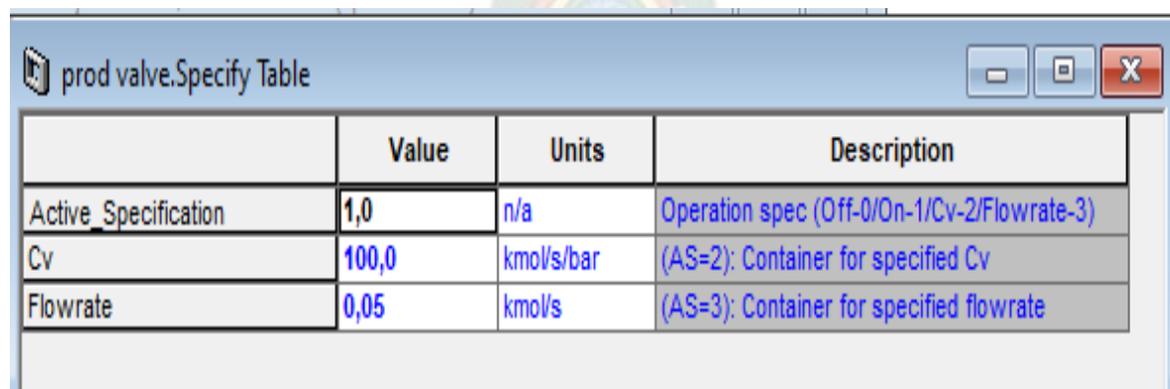
Figura 33 *Válvula de entrada*



	Value	Units	Description
Active_Specification	3,0	n/a	Operation spec (Off-0/On-1/Cv-2/Flowrate-3)
Cv	100,0	kmol/s/bar	(AS=2): Container for specified Cv
Flowrate	8,e-007	kmol/s	(AS=3): Container for specified flowrate

Fuente: Elaboracion propia

Figura 34 *Válvula de salida*



	Value	Units	Description
Active_Specification	1,0	n/a	Operation spec (Off-0/On-1/Cv-2/Flowrate-3)
Cv	100,0	kmol/s/bar	(AS=2): Container for specified Cv
Flowrate	0,05	kmol/s	(AS=3): Container for specified flowrate

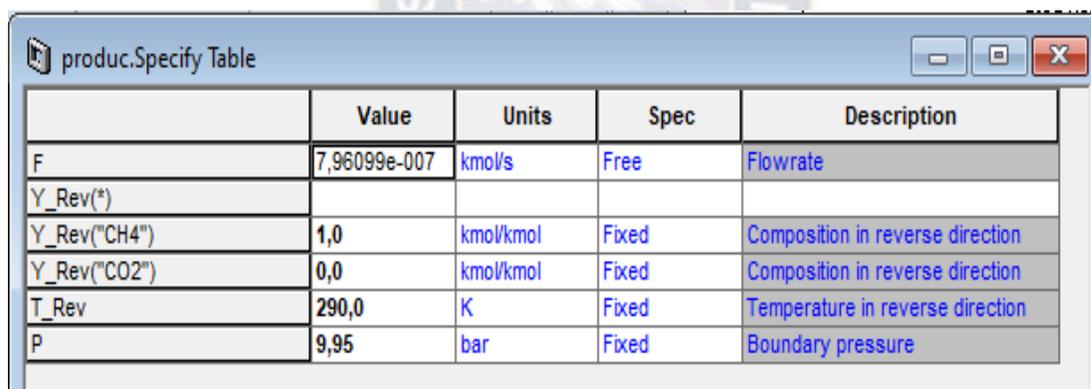
Fuente: Elaboracion propia

Tabla 24 Especificaciones y valores del producto

Description (Units)	Specification	Value/Type
Model type	Free	Reversible pressure setter
Flowrate (kmol/s)	Fixed	
Composition in forward direction, CH ₄ (kmol/kmol)	Fixed	1.0
Composition in forward direction, CO ₂ (kmol/kmol)	Fixed	0.30.08
Temperature in forward direction (K)	Fixed	290.0
Boundary pressure (bar)	Fixed	9.95

Fuente: Aspen Adsorption

Figura 35 Especificaciones del producto



	Value	Units	Spec	Description
F	7,96099e-007	kmol/s	Free	Flowrate
Y_Rev(*)				
Y_Rev("CH4")	1,0	kmol/kmol	Fixed	Composition in reverse direction
Y_Rev("CO2")	0,0	kmol/kmol	Fixed	Composition in reverse direction
T_Rev	290,0	K	Fixed	Temperature in reverse direction
P	9,95	bar	Fixed	Boundary pressure

Fuente: Elaboracion propia

Con los datos proporcionados, donde el inicio de la mezcla es 56.99% de CH₄ y 38.89% de CO₂, obteniendo un resultado de 63.44% de CH₄ y 36.56% de CO₂ tras la simulación en Aspen Adsorption, podemos tomar en cuenta los siguientes aspectos:

El aumento en la concentración de CH₄ de 56.99% a 63.44% indica que el proceso de adsorción fue efectivo en la separación del metano del dióxido de carbono. Esto sugiere que el sistema está logrando retener parte del CO₂, permitiendo que el CH₄ permanezca en mayor proporción.

La disminución de CO₂ de 38.89% a 36.56% implica que una parte del CO₂ fue removida o adsorbida durante el proceso. Aunque la reducción no es muy drástica, muestra que el sistema está funcionando como se espera en la captura de CO₂.

La capacidad del sistema para aumentar la proporción de CH₄ puede ser beneficiosa si el objetivo es enriquecer el metano para su uso como combustible o en otros procesos. Esto sugiere una separación efectiva, aunque sería útil conocer cuántas cantidades absolutas de cada gas se procesaron.

A pesar de los resultados positivos, la reducción de CO₂ podría ser mejorada. Podrías considerar ajustar condiciones operativas (presión, temperatura, flujo) o elegir un adsorbente diferente para maximizar la captura de CO₂.

Estos resultados indican que el proceso es favorable en términos de mejorar la calidad del metano. Sin embargo, es importante monitorear el balance entre la captura de CO₂ y la recuperación de CH₄, especialmente si hay metas específicas de reducción de emisiones.

Figura 36 Resultado de la simulación

	Value	Spec
Avg_Composition_Fwd("CH4")	0,634388	Free
Avg_Composition_Fwd("CO2")	0,365612	Free
Avg_Composition_Rev("CH4")	0,0	Free
Avg_Composition_Rev("CO2")	0,0	Free
ComponentList	Default	
F	7,96099e-007	Free
FlowBaseUnitType	Mole	
H_Fwd	-203,794	Free
H_Rev	-74,9984	Free
Model_Type	Reversible Pr	
P	9,95	Fixed
Process_In.ComponentList	Default	
Process_In.F	7,96099e-007	Free
Process_In.H	-203,794	Free
Process_In.H1	-74,9984	Free
Process_In.P	9,95	Free
Process_In.P1	9,95	Free
Process_In.T	295,322	Free
Process_In.T1	290,0	Free
Process_In.Y1("CH4")	1,0	Free
Process_In.Y1("CO2")	0,0	Free
Process_In.Y("CH4")	0,595868	Free
Process_In.Y("CO2")	0,404132	Free
Process_In.H1_GJ	-0,0749984	Free
Process_In.T1_C	16,85	Free

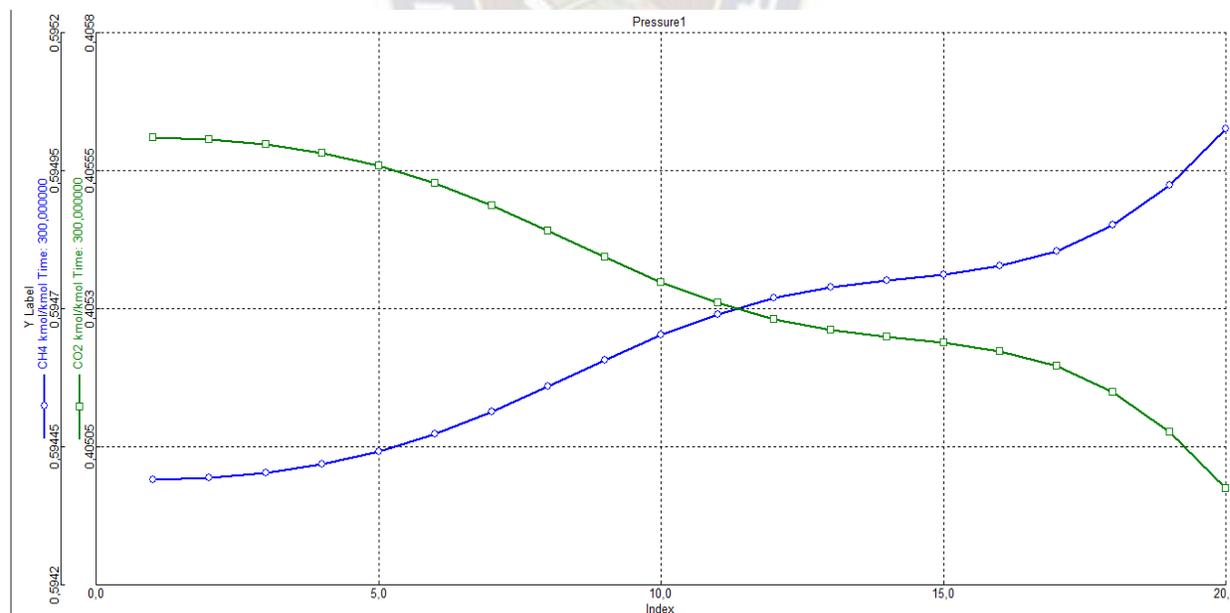
Fuente: Elaboracion propia

La curva verde representa el avance para el CO₂ se muestra en la Figura 34. Dado que se selecciona un valor bastante grande para el coeficiente de transferencia de masa de CO₂, el punto de ruptura es de alrededor de 15 segundos, lo cual es muy rápido para tal proceso. La curva tiene un comportamiento gradual ascilatorio en el que a los 15 segundos comienza la caída, indicando un descenso de la concentración del CO₂ y la capacidad utilizada del lecho, la curva va en descenso lo cual es indicativo para una correcta reducción de la concentración del CO₂.

La carga de CO₂ en diferentes posiciones de los nodos se compara con la carga del primer nodo de CH₄ como un espejismo que se muestra en el Figura 34. Hay una fuerte disminución en la concentración del CO₂ tan pronto como se alimenta el lecho.

La curva azul representa el comportamiento del CH₄ en el proceso de adsorción, el punto de inflexion se da a los 15 segundos, lo cual es bastante rapido para el proceso, es la razon para el incremento de la concentración del CH₄ y alcance un cierto equilibrio antes de las otras posiciones de los nodos, y la curva va en ascenso para un optimo incremento.

Figura 37 Comportamiento de los componentes



Fuente: Elaboracion propia

Tabla 25 Concentración del biogás simulado en Aspen Adsorption.

RESULTADOS				
CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
BIOGÁS-filtro				
Carbón activado o Zeolita	%	63.44	36.56	<i>Simulador Aspen Adsorption</i>

Fuente: Elaboracion propia

Para calcular el poder calorífico resultante por el simulador Aspen Adsorption, calculamos a partir de la ecuación dada:

$$PC_{Resultante} = \text{concentracion}\% * PC_{Real}$$

$$PC_{Resultante} = 0.6344 * 8,500 \frac{Kcal}{m^3}$$

$$PC_{Resultante} = 5,392.40 \frac{Kcal}{m^3}$$

El poder calorífico obtenido por la concentración resultante mediante el simulador Aspen Adsorption, se puede evidenciar el incremento considerable respecto al biogás original (4,844.15 kcal/m³) obtenido del biodigestor en la estación experimental.

Tabla 26 Poder calorífico iniciales y resultantes

	Estiércol Bovino		
	Kcal/m ³	KJ/m ³	BTU/m ³
Poder calorífico original	4,844.15	20267.92	19221.58
Poder calorífico resultante	5,392.40	22561.14	21397.04
	Estiércol porcino		
	Kcal/m ³	KJ/m ³	BTU/m ³
Poder calorífico original	5,726.28	23958.58	22721.88
Poder calorífico resultante	6,374.15	26669.44	25292.61

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior podemos observar que, con un mayor poder calorífico, el biogás proporciona más energía por unidad de volumen. Esto se traduce en un mayor rendimiento

en términos de energía útil generada, lo que demuestra que un mayor poder calorífico del biogás está directamente relacionado con un mayor rendimiento del sistema.

3.10 Cálculo de producción de electricidad por unidad de biogás

El cálculo de la producción de electricidad por unidad de biogás se puede hacer mediante un proceso que involucra varios factores, tales como el poder calorífico del biogás, la eficiencia del motor o generador, y las propiedades del sistema de conversión.

3.10.1. Cálculo para estiércol bovino

$$V_{biogas} = 10 \text{ m}^3$$

$$\text{Eficiencia} = 35\%$$

$$\text{Poder calorífico inicial} = 20267.92 \text{ KJ/m}^3$$

$$\text{Poder calorífico resultante} = 22561.14 \text{ KJ/m}^3$$

3.10.2. Energía térmica disponible del biogás inicial

$$E_{biogas} = V_{biogas} * PC$$
$$E_{biogas} = 2 \text{ m}^3 * 20267.92 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$$
$$E_{biogas} = 40535.84 \text{ KJ}$$

Energía eléctrica producida

$$E_{electrica} = E_{biogas} * \eta_{gen}$$
$$E_{electrica} = 40535.84 \text{ KJ} * 0.35$$
$$E_{electrica} = 14187.544 \text{ KJ}$$

Conversion a KWh

$$E_{kwh} = \frac{E_{electrica}}{3600 \frac{\text{KJ}}{\text{kWh}}}$$

$$E_{kWh} = \frac{14187.544 \text{ KJ}}{3600 \frac{\text{KJ}}{\text{kWh}}}$$

$$E_{kWh} = 3.94 \text{ kWh}$$

Finalmente, producción de electricidad por unidad de biogás

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = \frac{E_{kWh}}{V_{biogas}}$$

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = \frac{3.94 \text{ kWh}}{2 \text{ m}^3}$$

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = 1.971 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

3.10.3. Energía térmica disponible del biogás resultante

$$E_{biogas} = V_{biogas} * PC$$

$$E_{biogas} = 2 \text{ m}^3 * 22561.14 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$$

$$E_{biogas} = 45122.28 \text{ KJ}$$

Energía eléctrica producida

$$E_{electrica} = E_{biogas} * \eta_{gen}$$

$$E_{electrica} = 45122.28 \text{ KJ} * 0.35$$

$$E_{electrica} = 15792.798 \text{ KJ}$$

Conversion a kWh

$$E_{kWh} = \frac{E_{electrica}}{3600 \frac{\text{KJ}}{\text{kWh}}}$$

$$E_{kWh} = \frac{15792.798 \text{ KJ}}{3600 \frac{\text{KJ}}{\text{kWh}}}$$

$$E_{kWh} = 4.387 \text{ kWh}$$

Finalmente, producción de electricidad por unidad de biogás

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = \frac{E_{kWh}}{V_{biogas}}$$

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = \frac{4.387 \text{ kWh}}{10 \text{ m}^3}$$

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = 2.193 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

3.10.4. Cálculo para estiércol porcino

$$V_{biogas} = 2 \text{ m}^3$$

$$\text{Eficiencia} = 35\%$$

$$\text{Poder calorífico inicial} = 23958.58 \text{ KJ/m}^3$$

$$\text{Poder calorífico resultante} = 2669.44 \text{ KJ/m}^3$$

Energía térmica disponible del biogás resultante

$$E_{biogas} = V_{biogas} * PC$$

$$E_{biogas} = 2 \text{ m}^3 * 23958.58 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$$

$$E_{biogas} = 47917.16 \text{ KJ}$$

Energía eléctrica producida

$$E_{electrica} = E_{biogas} * \eta_{gen}$$

$$E_{electrica} = 47917.16 \text{ KJ} * 0.35$$

$$E_{electrica} = 16771.006 \text{ KJ}$$

Conversion a KWh

$$E_{kWh} = \frac{E_{electrica}}{3600 \frac{KJ}{kWh}}$$

$$E_{kWh} = \frac{16771.006 KJ}{3600 \frac{KJ}{kWh}}$$

$$E_{kWh} = 4.659 kWh$$

Finalmente, producción de electricidad por unidad de biogás

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = \frac{E_{kWh}}{V_{biogas}}$$

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = \frac{4.659 kWh}{2 m^3}$$

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = 2.329 \frac{kWh}{m^3}$$

3.10.5. Energía térmica disponible del biogás resultante

$$E_{biogas} = V_{biogas} * PC$$

$$E_{biogas} = 2 m^3 * 26669.44 \frac{KJ}{m^3}$$

$$E_{biogas} = 53338.88 KJ$$

Energía eléctrica producida

$$E_{electrica} = E_{biogas} * \eta_{gen}$$

$$E_{electrica} = 53338.88 KJ * 0.35$$

$$E_{electrica} = 18668.608 KJ$$

Conversion a KWh

$$E_{kWh} = \frac{E_{\text{electrica}}}{3600 \frac{KJ}{kWh}}$$

$$E_{kWh} = \frac{18668.608 KJ}{3600 \frac{KJ}{kWh}}$$

$$E_{kWh} = 5.186 kWh$$

Finalmente, producción de electricidad por unidad de biogás

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = \frac{E_{kWh}}{V_{\text{biogas}}}$$

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = \frac{5.186 kWh}{2 m^3}$$

$$\text{Producción de electricidad por unidad de biogás} = 2.593 \frac{kWh}{m^3}$$

Este cálculo nos da una idea aproximada de cuánta electricidad se puede generar a partir de una cantidad determinada de biogás.

Tabla 27 Producción de electricidad por unidad de biogás

	Estiércol Bovino		
	Kcal/m ³	KJ/m ³	kWh/m ³
Poder calorífico original	4,844.15	20267.92	1.971
Poder calorífico resultante	5,392.40	22561.14	2.193
	Estiércol porcino		
Poder calorífico original	5,726.28	23958.58	2.329
Poder calorífico resultante	6,374.15	26669.44	2.593

Fuente: *Elaboracion propia*

CAPÍTULO IV – ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO

4.1 ANÁLISIS TÉCNICO

4.1.1. Descripción del proyecto

El objetivo del proyecto nos indica, evaluar el poder calorífico del Biogás que se obtiene de biodigestores, empleando métodos de adsorción, utilizando agentes adsorbentes como la zeolita y el carbón activado para la respectiva remoción del CO₂ y H₂S.

El método aplicado para la remoción de dióxido de carbono, sulfuro de hidrogeno y demás impurezas presentes en el biogás es el proceso de adsorción, con carbón activado, zeolita y limaduras de hierro.

La producción final del biogás tratado, es netamente la remoción del dióxido de carbono, sulfuro de hidrogeno para poder incrementar la concentración del metano, en el que se traduce en el poder calorífico final para un uso del biogás con un mejor rendimiento.

4.1.2. Estudio de viabilidad técnica

- Recursos Necesarios: Para realizar una correcta remoción de CO₂ y H₂S, los materiales a emplearse son de fácil acceso tanto económico como logístico, los materiales para la fabricación del filtro de remoción se encuentran fácilmente en las ferreterías, en cambio, los agentes adsorbentes como el carbón activado y la zeolita se pueden adquirir de empresas importadoras de insumos químicos, las cuales son económicamente accesibles, mientras, que la limadura de hierro o viruta, es de uso doméstico y también son económicos.

4.1.3. Impacto ambiental

El impacto ambiental se refiere generalmente a las modificaciones que el ser humano provoca en el medio ambiente. Sin embargo, también puede ser causado por fenómenos naturales, como erupciones volcánicas o terremotos.

Cuando las condiciones ambientales cambian o surgen nuevas situaciones, esto influye en los ecosistemas relacionados, así como en la humanidad misma.

Dependiendo del grado de alteración que se genere, el impacto ambiental puede tener consecuencias negativas (como contaminación, pérdida de biodiversidad y enfermedades) o

positivas (como la protección de especies, la creación de áreas protegidas, la gestión de recursos y la generación de empleo).

Asimismo, el impacto ambiental puede clasificarse como directo, indirecto (secundario), acumulativo, inducido a corto o largo plazo.

Con esto en mente, es evidente que la instalación y operación de un biodigestor o una planta de biogás conlleva un impacto ambiental que debe ser analizado y evaluado.

El proceso de digestión anaerobia utilizado en estas instalaciones para convertir residuos orgánicos en biogás se considera una de las mejores formas de gestionar estos desechos, ya que ayuda a reducir la huella de carbono.

Por ejemplo, en España, la producción ganadera es responsable del 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La gestión de sus residuos a través de la digestión anaerobia generará un impacto positivo.

Además, la producción de biogás o biometano como fuentes de energía es esencial para alcanzar el objetivo de neutralidad en las emisiones de carbono que la Unión Europea ha establecido para 2050.

Para lograr este objetivo, es fundamental contar con un mix energético en el que los gases renovables, como el biogás y el biometano, desempeñen un papel clave en el suministro de combustible para el transporte y en ciertos procesos industriales que son difíciles de electrificar.

Sin embargo, aunque el impacto ambiental de estas instalaciones es en términos generales positivo, siempre es necesario evaluar y analizar diversas cuestiones ambientales relacionadas con la instalación y operación de la planta de biogás para mitigar los posibles efectos negativos.

Para valorar estos impactos, se realiza un estudio de impacto ambiental, que permite tomar decisiones adecuadas para prevenir y minimizar cualquier efecto adverso.

Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, la producción de biogás a partir de residuos orgánicos ayuda a reducir la emisión de metano (CH_4) a la atmósfera, un potente

gas de efecto invernadero que se genera durante la descomposición anaeróbica de materia orgánica en vertederos.

El biogás permite una gestión adecuada de residuos orgánicos, reduciendo la cantidad de basura que termina en vertederos. Esto contribuye a disminuir la contaminación del suelo y el agua.

4.1.4. Ventajas de la producción de biogás

- **Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero:** El uso de biodigestores para producir biogás ayuda a reducir las emisiones de metano, que es un potente gas de efecto invernadero. En lugar de liberar el metano a la atmósfera desde residuos orgánicos en descomposición, el biodigestor captura y utiliza este gas para generar energía.
- **Energía Renovable:** El biogás es una fuente de energía renovable que puede sustituir el uso de combustibles fósiles. Su producción y uso no dependen de recursos finitos como el carbón o el petróleo, lo que contribuye a la diversificación de la matriz energética.
- **Reducción de Residuos:** Los biodigestores ayudan a gestionar los residuos orgánicos de manera más eficiente, reduciendo la necesidad de vertederos y la contaminación ambiental asociada con ellos. Esto incluye residuos agrícolas, residuos sólidos urbanos y aguas residuales.
- **Reducción de Riesgos Sanitarios:** Al procesar residuos orgánicos, los biodigestores ayudan a reducir la proliferación de patógenos y enfermedades asociadas con la gestión inadecuada de estos residuos. Esto mejora la salud pública, especialmente en áreas rurales.

4.1.5. Desventajas de la producción de biogás

- **Emisiones Fugaces de Metano:** Aunque los biodigestores están diseñados para capturar el metano producido, existe la posibilidad de que se produzcan fugas durante el almacenamiento o transporte del biogás, lo que podría contrarrestar algunos de los beneficios ambientales del sistema.
- **Contaminación del Agua:** Si el digestato (subproducto líquido) no se maneja adecuadamente, puede contaminar fuentes de

agua cercanas. Esto es especialmente preocupante en sistemas mal diseñados o mal mantenidos.

- Disponibilidad de residuos: la producción de biogás depende de la disponibilidad constante de residuos orgánicos. En áreas donde estos recursos son limitados o estacionales, la producción de biogás puede no ser suficiente para garantizar un suministro continuo de energía.
- En algunas áreas los residuos orgánicos que se podrían utilizar en biodigestores también pueden tener usos, como alimento para ganado o compostaje. Esto podría generar competencia por los recursos y limitar la cantidad disponible para la producción de biogás.

4.1.6. Análisis económico

El análisis económico del biogás producido más la implementación de los filtros para la adsorción del CO₂ y H₂S, implican evaluar diversos factores para su viabilidad y rentabilidad.

Se llevará a cabo un análisis exhaustivo de la viabilidad económica del proyecto, enfocado en evaluar su capacidad para generar flujos de ingresos suficientes que justifiquen la inversión inicial. Este estudio no solo incluirá la proyección de beneficios económicos directos, sino también una valoración detallada de la sostenibilidad financiera a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto.

El análisis será fundamental para determinar si los retornos previstos superan los costos involucrados, y para evaluar si el proyecto presenta una tasa interna de retorno (TIR) y un valor actual neto (VAN) favorables, los cuales son parámetros clave en la toma de decisiones financieras. Además, se considerarán aspectos como la gestión del riesgo financiero, los posibles impactos en el flujo de caja y la capacidad del proyecto para mantenerse rentable a largo plazo bajo distintos escenarios económicos.

Es esencial garantizar que el proyecto no solo sea económicamente viable a corto plazo, sino también que ofrezca una rentabilidad sostenible a lo largo del tiempo. Solo así se podrá justificar la asignación de recursos y asegurar que el proyecto sea financieramente sólido y capaz de generar beneficios en el futuro.

4.1.6.1. CAPEX

Se refiere a los gastos de capital o inversiones de capital que una empresa realiza para adquirir, mejorar o mantener activos fijos o propiedades. Estos activos pueden ser físicos, como maquinaria, equipos, edificios, terrenos, o activos intangibles, como patentes o licencias.

Costo del filtro de adsorción de PVC

Tabla 28 Costo de un filtro de adsorción con carbón activado y lana de hierro.

DETALLE	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO (BS)	TOTAL (BS)
Materiales				
Tubo PVC 1 m 2"	1	-	50	50
Unión universal ½"	4	-	6	24
Válvula de seguridad PVC ½"	2	-	25	50
Reducción de 2" a ½"	2	-	25	50
Unión universal de 2"	1	-	75	75
Malla milimétrica de plástico	1	m	25	25
Pegamento PVC	1	-	50	50
Tubo PVC ½"	1	m	10	10
Insumos				
Lana de hierro	4	Bolsas de 60 g	5	20
Carbón activado	1	Kg	50	50
Total (Bs)				404

Fuente: *Elaboración propia*

4.1.6.2. Costo del biodigestor sin el filtro de PVC

Tabla 29 CAPEX inicial

Inversión total Bs	
Subtotal material	5500
Subtotal mano de obra	2100
Subtotal obras civiles	3550
Total (Bs) CAPEX	11150 Bs ≈ 1602 \$us

Fuente: *Elaboracion propia*

$$\text{Costo Total CAPEX inicial} = 11150 \text{ Bs} * \frac{1\$us}{6.96 \text{ bs}}$$

$$\text{Costo Total CAPEX inicial} = 1602 \$us$$

4.1.6.3. Costo del biodigestor incluido el filtro de PVC

El costo de un filtro de adsorción de material PVC tiene un costo de 334 Bs.

$$\text{Costo filtro} = 334 \text{ Bs} * \frac{1\$us}{6.96 \text{ bs}}$$

$$\text{Costo filtro} = 48 \$us$$

Costo final de un biodigestor de 9 m³ de capacidad instalado en la Estación Experimental Choquenaira. La generación de biogás diaria calculada es de 2 m³ /día.

Tabla 30 Costo de un biodigestor finalizado

Inversión total Bs	
Subtotal material	5500
Subtotal mano de obra	2100
Subtotal obras civiles	3550
Filtro de PVC	334
Total (Bs) CAPEX	11484 Bs ≈ 1650 \$us

Fuente: *Elaboracion propia*

$$\text{Costo Total CAPEX} = 11484 \text{ Bs} * \frac{1\$us}{6.96 \text{ bs}}$$

$$\text{Costo Total CAPEX final} = 1650 \$us$$

Estos biodigestores tienen una vida útil estimada de entre 10 a 15 años, lo que los convierte en una solución duradera y confiable para la producción de biogás. Durante este período, el mantenimiento requerido es mínimo, lo que contribuye a su eficiencia operativa y su rentabilidad a largo plazo. El principal componente que podría necesitar reemplazo en este tiempo es la geomembrana tubular, que actúa como el revestimiento principal del biodigestor y asegura su estanqueidad. Esta geomembrana, fabricada con materiales resistentes y duraderos, es capaz de soportar las condiciones ambientales y los procesos de digestión anaeróbica. Sin embargo, en caso de que se detecte algún daño o desgaste en la membrana, este puede ser fácilmente reparado o reemplazado sin necesidad de realizar intervenciones más costosas o complejas en el sistema. Es importante realizar inspecciones periódicas para garantizar la integridad de la geomembrana y prevenir posibles fugas de biogás. Además, la vida útil del biodigestor puede depender de factores como el tipo de material utilizado en su construcción, las condiciones climáticas de la zona, y la frecuencia y calidad del mantenimiento preventivo realizado durante su operación.

4.1.7. OPEX

Se refiere a los gastos operativos o gastos de operación que una empresa incurre en el curso normal de su actividad para mantener y administrar su negocio. A diferencia de los gastos de capital (CAPEX), que están relacionados con la compra o mejora de activos a largo plazo, los OPEX son gastos recurrentes y necesarios para el funcionamiento diario de la empresa.

Consumo de agua (costo directo)

El agua que se utiliza para la carga al biodigestor es 3:1 es decir 3 litros de agua por cada kilogramo de estiércol bovino, es decir para el biodigestor se necesitan 120 litros de agua por día. El costo del agua es de 2.59 Bs/m³

$$\text{Costo } H_2O = 120 \frac{l}{\text{dia}} * \frac{1m^3}{1000 l} * \frac{365 \text{ dias}}{1 \text{ año}} * 2.59 \frac{Bs}{m^3}$$

$$\text{Costo } H_2O = 113.442 \frac{Bs}{\text{Año}}$$

$$\text{Costo } H_2O = 113.442 \frac{Bs}{\text{Año}} * \frac{1\$us}{6.96 Bs}$$

$$\text{Costo } H_2O = 16.29 \frac{\$us}{\text{año}}$$

Melasa diluida de 1 bloque de 10 kg tiene un costo de 50 bs lo que abastece para un mes (30días)

$$\text{Costo melasa} = 50 \frac{Bs}{\text{mes}} * \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} * \frac{1\$us}{6.96 Bs}$$

$$\text{Costo melasa} = 86.21 \frac{\$us}{\text{año}}$$

4.1.7.1.Costo del filtro de adsorción

El cambio del material adsorbente (carbón activado y limaduras de hierro) se debe realizar cada 2 meses es decir que en año se realizan 6 cambios.

$$\text{Costo material adsorbente} = 70 bs * \frac{\$us}{6.96bs} * 6 \frac{\text{cambios}}{\text{año}}$$

$$\text{Costo material adsorbente} = 60.34 \frac{\$us}{\text{año}}$$

Figura 38 *Filtro de remoción de PVC*



Fuente: *Elaboración Propia*

La limadura después de su uso en la remoción, es inutilizable, en cambio el carbon activado se puede reutilizar calentándolo en un horno a una temperatura de 150 °C.

Una vez realizado el filtro, para los siguientes cambios, solo se hará con los agentes adsorbentes, lo que aminora los costos de producción de biogás, es decir asumiendo los precios actuales, solo se debe incrementar 70 bs más por cada cambio.

El cambio de los agentes adsorbentes, primero, de la limadura de hierro, se lo debe realizar en cuanto se sienta el olor a sulfuro de hidrogeno (huevo podrido), en cambio para el carbón activado se lo debe realizar entre 60 a 90 días (2-3 meses). Revisar periódicamente el filtro de remoción, la saturación del carbón activado, para que no afecte la eficiencia del biogás.

Tabla de OPEX previo a la purificación de biogás

Tabla 31 *OPEX inicial*

Ítem	Costo \$us/año
Agua	16.29
Melasa	82.21
Total, OPEX inicial	102.5

Fuente: *Elaboración Propia*

Tabla de OPEX incluido los materiales de adsorción para la purificación de biogás

Tabla 32 *OPEX final*

Ítem	Costo \$us/año
Agua	16.29
Melasa	86.21
Mantenimiento	60.34
Total, OPEX final	162.84

Fuente: *Elaboración Propia*

4.1.7.2. Flujo de caja operativo (ingresos esperados)

Es una medida financiera que indica la cantidad de dinero efectivo generado o utilizado por una empresa a partir de sus actividades operativas principales, es decir, aquellas actividades directamente relacionadas con la producción y venta de bienes o servicios. Este flujo de caja

refleja la capacidad de la empresa para generar efectivo de su actividad operativa regular, antes de tener en cuenta actividades de inversión o financiamiento (como la compra de activos o el pago de deudas).

En los siguientes cálculos de flujo de caja operativo, se realizará cálculos para el proceso inicial como para el final con el biogás purificado.

Cálculo de ingreso anual y flujo de caja neto para el biodigestor inicial sin el filtro de PVC, con una energía generada de 1.971 kWh/m³ para un costo de 0.5 bs/kWh de consumo energía eléctrica.

$$1.971 \frac{kWh}{m^3} * 0.5 \frac{bs}{kWh} = 0.986 \frac{bs}{h} * \frac{24 hrs}{1 dia} * \frac{365 dias}{año}$$

$$Ingreso\ anual = 8632.98 \frac{bs}{año} * \frac{1 \$us}{6.96 bs}$$

$$**Ingreso\ anual\ biogas = 1240.37 \frac{\$us}{año}**$$

Para el biol, se produce un total de 120 litros de biol por día, y su venta en el mercado es de 5 bs por litro.

$$120 \frac{l}{dia} * 5 \frac{bs}{l} * \frac{365 dias}{1 año} * \frac{1 \$us}{6.96 bs}$$

$$**Ingreso\ anual\ neto\ biol = 31465.51 \frac{\$us}{año}**$$

Ahora realizamos los cálculos para el flujo de caja neto anual

$$Flujo\ de\ Caja\ Operativo = (Ingresos\ Anual\ biogas + biol) - OPEX\ inicial$$

$$Flujo\ de\ Caja\ Operativo = (1240.37 + 31465.51) \frac{\$us}{año} - 102.5 \frac{\$us}{año}$$

$$**Flujo\ de\ Caja\ Operativo = 32603.38 \frac{\$us}{año}**$$

$$Flujo\ de\ Caja\ Neto = Flujo\ de\ Caja\ Operativo - CAPEX\ inicial$$

$$\text{Flujo de Caja Neto} = 32603.38 \text{ \$us} - 1602 \text{ \$us}$$

$$\text{Flujo de Caja Neto} = 31001.39 \text{ \$us}$$

4.1.8. Cálculo del VAN (Valor Actual Neto)

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - CAPEX \text{ Inicial}$$

Donde: F_t : Flujo de Caja Neto; n : Periodo de Flujo de Caja; r : Tasa de descuento

Considerando una tasa de descuento del 10% obtenemos lo siguiente:

$$VAN = \left(\sum \frac{31001.39}{(1+0.1)} + \frac{31001.39}{(1+0.1)^2} + \frac{31001.39}{(1+0.1)^3} + \frac{31001.39}{(1+0.1)^4} + \frac{31001.39}{(1+0.1)^5} \right) - 1602$$

$$VAN = 115917.66 \text{ \$us}$$

Con los siguientes parámetros para verificar que el proyecto es o no viable:

- $VAN > 0$ es rentable, genera beneficios
- $VAN = 0$ es indiferente, no genera ni gastos ni beneficios
- $VAN < 0$ no es rentable, genera pérdidas

Con este resultado $VAN = 115917.66 \text{ \$us}$ el proyecto es rentable.

4.1.9. Calculo TIR (Tasa Interna de Retorno)

$$\sum \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - CAPEX \text{ inicial} = 0$$

Donde:

F_t = Flujo de caja neto (positivo o negativo) en el período

t = El año o periodo específico en el que ocurre el flujo de caja.

TIR = Tasa Interna de Retorno (la tasa que estamos buscando).

$$\left(\sum \frac{31001.39}{(1 + TIR)} + \frac{31001.39}{(1 + TIR)^2} + \frac{31001.39}{(1 + TIR)^3} + \frac{31001.39}{(1 + TIR)^4} + \frac{31001.39}{(1 + TIR)^5} \right) - 1602 = 0$$

Realizando cálculos de interpolación obtenemos **TIR = 19.3517 %**

Cálculo de ingreso anual y flujo de caja neto para el biodigestor incluido el filtro de PVC, con una energía generada de 1.971 kWh/m³ para un costo de 0.5 bs/kWh de consumo energía eléctrica.

$$2.193 \frac{kWh}{m^3} * 0.5 \frac{bs}{kWh} = 1.097 \frac{bs}{h} * \frac{24 hrs}{1 dia} * \frac{365 dias}{año}$$

$$Ingreso\ anual = 9605.34 \frac{bs}{año} * \frac{1 \$us}{6.96 bs}$$

$$Ingreso\ anual\ biogas = 1380.08 \frac{\$us}{año}$$

Para el biol, se produce un total de 120 litros de biol por día, y su venta en el mercado es de 5 bs por litro.

$$120 \frac{l}{dia} * 5 \frac{bs}{l} * \frac{365 dias}{1 año} * \frac{1 \$us}{6.96 bs}$$

$$Ingreso\ anual\ neto\ biol = 31465.51 \frac{\$us}{año}$$

Ahora realizamos los cálculos para el flujo de caja neto anual

$$Flujo\ de\ Caja\ Operativo = (Ingresos\ Anual\ biogas + biol) - OPEX\ final$$

$$Flujo\ de\ Caja\ Operativo = (1380.08 + 31465.51) \frac{\$us}{año} - 162.84 \frac{\$us}{año}$$

$$Flujo\ de\ Caja\ Operativo = 32682.74 \frac{\$us}{año}$$

Flujo de Caja Neto = Flujo de Caja Operativo – CAPEX final

Flujo de Caja Neto = 32682.74 \$us – 1650 \$us

Flujo de Caja Neto = 31032.75 \$us

Cálculo del VAN (Valor Actual Neto)

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - CAPEX \text{ final}$$

Donde: F_t : Flujo de Caja Neto; n : Periodo de Flujo de Caja; r : Tasa de descuento

Considerando una tasa de descuento del 10% obtenemos lo siguiente:

$$VAN = \left(\sum \frac{31032.75}{(1+0.1)} + \frac{31032.75}{(1+0.1)^2} + \frac{31032.75}{(1+0.1)^3} + \frac{31032.75}{(1+0.1)^4} + \frac{31032.75}{(1+0.1)^5} \right) - 1650$$

VAN = 115988.54 \$us

Con los siguientes parámetros para verificar que el proyecto es o no viable:

- VAN > 0 es rentable, genera beneficios
- VAN = 0 es indiferente, no genera ni gastos ni beneficios
- VAN < 0 no es rentable, genera pérdidas

Con este resultado ***VAN = 115917.66 \$us*** el proyecto es rentable.

Calculo TIR (Tasa Interna de Retorno)

$$\sum \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - CAPEX \text{ final} = 0$$

Donde:

F_t = Flujo de caja neto (positivo o negativo) en el período

t = El año o periodo específico en el que ocurre el flujo de caja.

TIR = Tasa Interna de Retorno (la tasa que estamos buscando).

$$\left(\sum \frac{31032.75}{(1 + TIR)} + \frac{31032.75}{(1 + TIR)^2} + \frac{31032.75}{(1 + TIR)^3} + \frac{31032.75}{(1 + TIR)^4} + \frac{31032.75}{(1 + TIR)^5} \right) - 1650 = 0$$

Realizando cálculos de interpolación obtenemos **TIR = 18.8077 %**



CAPÍTULO – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La evaluación del poder calorífico del biogás, demuestra ser una estrategia efectiva para mejorar la calidad del biogás. En relación al aumento del poder calorífico, cabe mencionar que la eliminación de impurezas como el CO₂ y H₂S mediante adsorción ha mostrado un aumento significativo en la concentración de metano (CH₄) en el biogás. Lo que resulta en un biogás más adecuado para un mejor rendimiento energético.

Tanto el carbón activado como las limaduras de hierro han demostrado ser efectivos en la captura de estos compuestos indeseables. La limadura de hierro o viruta es un material fibroso y esponjoso que atrapa el sulfuro de hidrogeno evitando así la corrosión de metales y logrando un biogás mejor tratado, y el carbón activado, conocido por su alta superficie específica, ofrecen capacidades de adsorción competitivas, lo que permite seleccionar el material más adecuado, para la remoción de impurezas presentes en el biogás.

En conclusión, la adsorción con limaduras de hierro y carbón activado es una técnica prometedora para mejorar el poder calorífico del biogás, en la siguiente tabla se demuestra el incremento significativo del poder calorífico, luego de aplicar el método de adsorción.

Tabla 33 Poder calorífico final

Estiércol Bovino			
	Kcal/m ³	KJ/m ³	BTU/m ³
Poder calorífico original	4,844.15	20267.92	19221.58
Poder calorífico resultante	5,392.40	22561.14	21397.04
Estiércol porcino			
Poder calorífico original	5,726.28	23958.58	22721.88
Poder calorífico resultante	6,374.15	26669.44	25292.61

Fuente: Elaboracion propia

El uso de el simulador Aspen Adsorption, en la purificación del biogás es fundamental para optimizar el proceso de eliminación de impurezas, mejorar la calidad del biogás el cual permite simular la eliminación de impurezas como CO₂ y H₂S, utilizando diferentes adsorbentes (por ejemplo, zeolitas y carbón activado), facilita el diseño de columnas de

adsorción y la configuración de flujos del biogás, proporciona datos sobre la capacidad de adsorción y la dinámica del proceso, ayudando a predecir el comportamiento del sistema en diferentes escenarios. Los datos obtenidos se muestran a continuación, en el cual se demuestra el incremento de la concentración de metano, por lo tanto, el incremento del poder calorífico.

Tabla 34 *Valores obtenidos del simulador aspen adsorption*

	ENTRADA	SALIDA
CH4	56.99	63.43
CO2	38.89	36.57

Fuente: Elaboración propia

5.2 RECOMENDACIONES

Implementar un sistema de monitoreo continuo para las concentraciones de CO₂ y H₂S en el biogás, lo que permitirá ajustes en tiempo real en los procesos de adsorción.

Capacitar al personal en el manejo seguro del biogás, enfocándose en la identificación de riesgos asociados con el H₂S.

Realizar estudios adicionales sobre el costo-efectividad de diferentes materiales adsorbentes para optimizar la remoción de impurezas en condiciones industriales.

BIBLIOGRAFÍA

(MD-12), C. A. (01 de 01 de 1999). *CATC*. Obtenido de

<https://www3.epa.gov/ttnecatc1/cica/files/zeolits2.pdf>

Angelidaki, T. T. (05 de 06 de 2018). *ELSEVIER*. Obtenido de Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives:

10.1016/j.biotechadv.2018.01.011

Arellano, V. y. (01 de 01 de 2024). *ELSEVIER*. Obtenido de

[https://www.researchgate.net/profile/Diana-Arellano-](https://www.researchgate.net/profile/Diana-Arellano-Yasaca/publication/379468812_Harnessing_sustainable_opportunities_for_nutrient_removal_and_recovery_from_liquid_digestate_in_a_modern_municipal_food_waste_biogas_power_plant/links/66278e8b43f8df018d21e4a)

[Yasaca/publication/379468812_Harnessing_sustainable_opportunities_for_nutrient_removal_and_recovery_from_liquid_digestate_in_a_modern_municipal_food_waste_biogas_power_plant/links/66278e8b43f8df018d21e4a](https://www.researchgate.net/profile/Diana-Arellano-Yasaca/publication/379468812_Harnessing_sustainable_opportunities_for_nutrient_removal_and_recovery_from_liquid_digestate_in_a_modern_municipal_food_waste_biogas_power_plant/links/66278e8b43f8df018d21e4a)

Babu Nallamothe, R. (2013). *BIOGAS PURIFICATION, COMPRESSION AND BOTTLING*. Hyderabad.

Barbazan. (16 de 03 de 2010). *Scielo*. Obtenido de

[http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-](http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482011000100010)

[15482011000100010](http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482011000100010)

Bernal, J. C. (24 de 04 de 2001). *Books*. Obtenido de

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8JfGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8JfGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=BIOGAS+definicion&ots=uD3Ob_6dwu&sig=sf-IGIGNMDY71QTRlaQcuzNEgFM#v=onepage&q&f=false)

[PA2&dq=BIOGAS+definicion&ots=uD3Ob_6dwu&sig=sf-](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8JfGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=BIOGAS+definicion&ots=uD3Ob_6dwu&sig=sf-IGIGNMDY71QTRlaQcuzNEgFM#v=onepage&q&f=false)

[IGIGNMDY71QTRlaQcuzNEgFM#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8JfGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=BIOGAS+definicion&ots=uD3Ob_6dwu&sig=sf-IGIGNMDY71QTRlaQcuzNEgFM#v=onepage&q&f=false)

Boivin, S., & Abatzoglou, N. (2008). *A review of biogas purification processes*.

Quebec.

- BOMGEAM. (01 de 01 de 2017). *GMGA*. Obtenido de <https://gmga.com.br/zeolitas-naturales-en-bolivia/>
- Bustamante. (01 de 01 de 2007). *Scielo*. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v7n38/2007-1132-remcf-7-38-00005-en.pdf>
- Changaro. (2010). *SurColombia*. Obtenido de <http://portal.amelica.org/ameli/journal/238/2382461008/>
- CONCYTEG. (2006). *concyteg.gob.mx*. Obtenido de concyteg.gob.mx.
- Ecoguz. (06 de 05 de 2023). *Ecoguz*. Obtenido de <https://www.ecoguz.com/>
- Elizabeth Tilley, L. U. (2018). *Combustion del Biogas*. Obtenido de <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/uso-yo-disposicion-final/combusti%C3%B3n-de-biog%C3%A1s>
- EnDev. (2011). *Biodigestores*. Viacha: EnDev.
- Fernandez, J. (01 de 01 de 2010). *IBERDROLA*. Obtenido de <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2007/04/Cuadernos-energias-renovables-para-todos-biomasa-fenercom.pdf>
- Fernandez, J. (06 de 05 de 2015). *Edutecne*. Obtenido de https://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf
- Garfi. (01 de 01 de 2016). *ELSEVIER*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>

GEOTECSIM. (2019). *GEOTECSIM*. Obtenido de

<https://geotecsim.com/servicios/fabricacion-de-biodigestores-tubulares/>

GUABIRA. (06 de 10 de 2007). *GUABIRA*. Obtenido de

[https://www.guabira.com/guabira/guabira-energia-](https://www.guabira.com/guabira/guabira-energia-sa.html#:~:text=El%20bagazo%20es%20un%20residuo,para%20sus%20procesos%20de%20producci%C3%B3n.)

[sa.html#:~:text=El%20bagazo%20es%20un%20residuo,para%20sus%20procesos%20de%20producci%C3%B3n.](https://www.guabira.com/guabira/guabira-energia-sa.html#:~:text=El%20bagazo%20es%20un%20residuo,para%20sus%20procesos%20de%20producci%C3%B3n.)

Hilbert, J., & Eppel, J. (2007). *Desafíos y Estrategias para Implementar la*

Digestión Anaeróbica. Buenos Aires.

Hivos People Unlimited. (2013). *Plan del Programa Nacional de Biodigestores de*

Bolivia. Obtenido de <https://www.bivica.org/files/biodigestores-plan-programa.pdf>.

Inglese. (2018). Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/349213288_Gestion_ambiental_para_la_implementacion_de_Biodigestores_Anaerobicos_reductores_de_residuos_contaminantes_en_el_medioambiente_de_los_departamentos_de_la_Region_Norte_y_Central_de_Colombia

International Journal of Environmental Science And Development. (2018).

Assessment of Calorific Value of Biogas after Carbon Dioxide Adsorption Process Using Natural Zeolite and Biochar. *International Journal of Environmental Science And Development*.

Kennet, W. (2003). *Termodinámica*. España: McGraw-Hill.

- Maccabe, J. (2005). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Mexico: McGraw-Hill.
- Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. A. (01 de Enero de 2010). *Repositorio Universidad de Palermo*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10226/1377>
- Noguera, L. J. (09 de 05 de 2004). *Scielo*. Obtenido de https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182004000400001
- Perry. (2001). *Manual del Ingeniero Químico* . Madrid: McGraw-Hill.
- Quimica, R. B. (01 de 01 de 2019). *SciELO*. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602019000300003
- RIIARn. (2014). *Biofilm de bajo costo para mejorar la digestión anaeróbica en regiones de clima frío*. Viacha.
- Rodriguez Alvarez, E. (2012). *Biodigestores una Alternativa Tecnológica para el Futuro*. Lima, Lima, Perú.
- Salas, J. J. (16 de 11 de 2020). *El modesto tanque Imhoff: Fundamentos y diseño*. Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/modesto-tanque-imhoff-fundamentos-y-diseno>.
- Salazar Del Pozo Luis Fernando, A. R. (01 de 07 de 2023). *Journal Boliviano De las Ciencias*. Obtenido de <https://doi.org/10.52428/20758944.v19iEspecial.947>

Steinhauser, D. y. (01 de 01 de 2008). Obtenido de

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=CJiMmmxu2tcC&oi=fnd&pg=PT13&dq=deublein+y+steinhauser+biogas&ots=InjzfRbTMe&sig=OgFk-5qwmUmu1Zjr5AF-jmeQzxs#v=onepage&q=deublein%20y%20steinhauser%20biogas&f=false>

Treybal. (1993). *Operaciones de transferencia de masa*. Mexico: McGraw-Hill.

Varnero. (01 de 01 de 1991). Obtenido de

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151128>

Varnero, M. T. (05 de 06 de 2011). *Organizacion de las naciones unidas para la alimentacion y agricultura FAO*. Obtenido de

<http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

Wood, K. (01 de 01 de 2018). *Design, Simulation, and Optimization of Adsorptive and Chromatographic Separations*. Obtenido de [https://application.wiley-](https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527344691_c01.pdf)

[vch.de/books/sample/3527344691_c01.pdf](https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527344691_c01.pdf)

ANEXOS

BIODIGESTOR SEMICONTINUO

ESTACIÓN EXPERIMENTAL CHOQUENAIRA VIACHA





MATERIA ORGANICA (ESTIÉRCOL BOVINO)



FILTRO DE REMOCION DE PVC



CROMATOGRAFIA OBTENIDA DE IIDEPROQ

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS
Acreditado al ARCU SUR - MERCOSUR

N° IIDEPROQ 030-2024

INFORME DE ANÁLISIS

Atención	Univ. Ronald Huanca Machaca
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Responsable de análisis	Ing. Ph.D. René Álvarez Apaza
Tipo de muestra	1 Muestra de Biogás
Responsable del muestreo	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de Recepción de muestra	28/08/2024
Fecha de emisión de informe	2/09/2024

RESULTADOS

CÓDIGO	UNIDAD	CH ₄	CO ₂	MÉTODO
BIOGÁS ORIGINAL	%	56,99	38,89	Cromatografía de Gases, Detector TCD, Columna Supelco- Carboxen.

OBSERVACIONES:

Ninguna.


M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado
TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN I
RESPONSABLE DE LABORATORIO
IIDEPROQ - UNISA



NOMBRE: Ronald Huanca Machaca

CORREO GMAIL: ronaldhm1987b21@gmail.com

DIRECCION Y TELEFONO/CELULAR: Zona Villa Salomé, Av. Álamos, Nro. 26

Cel. 72516463

DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR

Y DERECHOS CONEXOS



2024-TTES-1806-D-1

RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-3631/2024

La Paz, 04 de noviembre de 2024

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **01 de noviembre de 2024**, por **RONALD HUANCA MACHACA** con C.I. N° **6127918 LP**, con número de trámite **DA 2082/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"INCREMENTO DEL PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS OBTENIDO EN BIODIGESTORES MEDIANTE ADSORCIÓN"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO:

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusividad referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los"*



NR/ISO
9001
IGNORCA

afaq
ISO 9001
Quality
AFOR CERTIFICATION

ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO:

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"INCREMENTO DEL PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS OBTENIDO EN BIODIGESTORES MEDIANTE ADSORCIÓN"** a favor del autor y titular: **RONALD HUANCA MACHACA** con **C.I. N° 6127918 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/Im

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI
CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO
DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS
LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



FxxCn8NI4Km63G

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB www.senapi.gob.bo/verificacion Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.

