

**ANÁLISIS EXERGÉTICO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASA
RESIDUAL EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA.**



PRESENTADO POR:

ERNESTO TERCERO GUEVARA PACHECO

RUBÉN DAVID MORA OSPINO

**ÁREA:
ENERGÍA**

DIRECTOR:

Ing. SAMUEL IVÁN BONILLA GRACIA

CODIRECTOR:

Ing. MIGUEL EMIGDIO DORIA OVIEDO

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA – CÓRDOBA
2021.**

AGRADECIMIENTOS.

Los autores de este documento, primeramente, agradecen a Dios por mantenernos con vida y salud, de igual manera a la universidad de Córdoba por el servicio prestado para lograr nuestra formación académica.

Agradecemos a nuestros padres, familiares y amigos, por el apoyo brindado durante nuestro proceso de estudiantes de pregrado, aunque muchas veces dejamos de compartir en fechas especiales, siempre fueron comprensivos y nos motivaban a seguir adelante. De igual manera, se le agradece al grupo de docentes del programa de Ingeniería Mecánica, por su aporte al conocimiento adquirido durante nuestro tiempo en la universidad, no solo nos brindaron conocimiento técnico, sino también, íntegro. Han sido personas que nos exigían para que pudiéramos dar lo mejor.

Finalmente, hoy podemos valorar la importancia de las contribuciones de aquellas personas que conocimos en el camino, ya que han sido pieza fundamental para el cumplimiento de nuestros sueños de formarnos como ingenieros, pulcros, íntegros y llenos de valores.

TABLA DE CONTENIDO.

AGRADECIMIENTOS.....	I
LISTA DE FIGURAS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
3. DESARROLLO DE LA TEMÁTICA	3
3.1. MARCO TEORICO.....	3
3.2 ESTADO DEL ARTE.....	10
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA.....	16
3.4 DESARROLLO.....	17
3.4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	17
3.5 ANÁLISIS DE EXERGÍA.....	26
4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	30
BIBLIOGRAFÍA.....	33

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.

Tabla 1: Composición química del biogás.....	5
Tabla 2. Composición química de diversos residuos de origen animal y vegetal	7
Tabla 3. Relación C/N de los sustratos empleados comúnmente para la producción de biogás ...	9
Tabla 4. Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica.....	10
Tabla 5. Caracterización de la biomasa.....	16
Figura 1. Esquema general del proceso de simulación	17
Tabla 6. Reacciones estequiométricas de la hidrólisis	18
Tabla 7. Reacciones cinéticas de la degradación de aminoácidos y las etapas acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas.....	20
Figura 2. Bloques de calculo.....	22
Figura 3. Especificación composición química del estiércol.....	23
Figura 4. Esquema del modelo en ASPEN PLUS.....	24
Figura 5-6. Resumen de resultados de las corrientes del diagrama de flujo.....	25
Tabla 7. Comparación de resultados	26
Tabla 8. Exergía química estándar de algunos componentes.....	29
Tabla 9. Composición del biogás estiércol bovino.....	31
Tabla 10. Fracciones molares del biogás obtenido en la simulación.....	31
Tabla 11. Fracciones molares biofertilizante.....	32
Tabla 12. Exergías entrada y salida biodigestor.....	32

RESUMEN.

El objetivo de este trabajo era proporcionar un análisis de exergía de la producción de biogás a partir de biomasa, por medio de una simulación del proceso de digestión anaeróbica a través del programa Aspen Plus se pudo obtener datos teóricos de la producción de biogás a través del proceso de digestión. Se selecciono un modelo termodinámico que ya viene incluido en el programa llamado NRTL (Non-Random Two-Liquid model). Dicho método correlaciona y calcula sobre la base de fracciones molares y coeficientes de actividad para diferentes componentes, facilitando el equilibrio vapor líquido. (Serrano, 2011). La producción biogás representa un proceso clave para la variedad energética del país, ya que permite reutilizar / reconvertir subproductos industriales o residuos agroindustriales en un producto que puede ser utilizado en diferentes sectores demandantes de energía, luego de una adecuada limpieza y acondicionamiento. Por medio del análisis exergetico se obtuvo una eficiencia de 55,2% en el proceso con una destrucción de exergía de 3749,72034 kW

Palabras claves: Exergía, biomasa, biogás, Aspen Plus.

ABSTRACT.

The objective of this work was to provide an exergy analysis of biogas production from biomass, through a simulation of the anaerobic digestion process through the Aspen Plus program, theoretical data on biogas production could be obtained through the digestion process. A thermodynamic model was selected that is already included in the program called NRTL (Non-Random Two-Liquid model). Said method correlates and calculates on the basis of molar fractions and activity coefficients for different components, facilitating liquid vapor equilibrium. (Serrano, 2011). Biogas production represents a key process for the country's energetic variety, since it allows to reuse / reconvert industrial by-products or agro-industrial waste into a product that can be used in different energy-demanding sectors, after adequate cleaning and conditioning. Through the exergetic analysis, an efficiency of 55.2% was obtained in the process with a destruction of exergy of 3749.72034 kW

Keywords: Exergy, biomass, biogas, Aspen plus.

1. INTRODUCCIÓN.

Actualmente, muchos países están interesados en los objetivos de desarrollo sostenible, que requieren una estrecha coordinación de tres dimensiones: económica, social y ambiental. En este sentido, la protección del medio ambiente se está convirtiendo en una de las principales preocupaciones. Los problemas ambientales como el calentamiento global, el cambio climático y la contaminación del aire afectan negativamente a las personas que viven en todos los países y territorios. (Kahia & Charfeddine, 2019). Por lo tanto, se necesitan acciones y soluciones urgentes para combatir el cambio climático, prevenir el calentamiento global y reducir la contaminación del aire.

La población bovina en el país está distribuida en 623.794 predios y constituida aproximadamente por 27.234.027 animales, ubicados principalmente en los departamentos de Antioquia (11,35%), Casanare (7,84%), Córdoba (7,84%), Meta (7,51%), Caquetá (6,97%), Santander (5,94%), Cesar (5,45%), Cundinamarca (5,32%), Magdalena (4,93%) y Bolívar (4,49%), indicando que el 67,63% de la población total nacional está distribuida para el 2019 en estos 10 departamentos. (ICA, 2019). Como podemos ver, el departamento de Córdoba es uno de los mayores productores de ganado bovino en el país, lo que produce una gran cantidad de estiércol bovino, los cuales no son aprovechados.

El presente documento se enfocará de manera principal en el análisis del estado del arte en distintas fuentes, libros, artículos de publicación científica y normas, con la finalidad de afianzar el conocimiento sobre la producción de biogás proveniente de desechos bovinos y de esta manera conocer el rendimiento a través de un análisis exergético y un modelo termodinámico del biogás que se puede producir para su aprovechamiento en el departamento de Córdoba.

2. OBJETIVOS.

2.1. OBJETIVO GENERAL.

- Analizar exergéticamente la generación de biogás implementando biomasa residual del departamento de Córdoba.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Caracterizar químicamente la biomasa de estiércol bovino.
- Desarrollar un modelo de simulación a computadora con el fin de determinar el comportamiento de la producción de biogás.
- Realizar un análisis de sensibilidad del modelo.

3. DESARROLLO DE LA TEMÁTICA.

En esta sección se presenta el estado del arte de los estudios realizados con el problema de investigación (Análisis exergetico de la generación de biogás a partir de biomasa residual en el departamento de Córdoba). Posteriormente, se define la generación de biogás a partir de biomasa residual desde el punto de vista de diferentes autores y metodologías empleadas en el mundo, continente, Colombia y enfocándonos en el departamento de Córdoba. Finalmente se hace cumplimiento de los diferentes objetivos planteados en el documento.

3.1 MARCO TEORICO:

Exergía: La exergía es definida por Szargut como la máxima cantidad de trabajo obtenible cuando un flujo de energía es llevado de su estado inicial a un estado de equilibrio termodinámico a condiciones ideales a través de un proceso reversible (SZARGUT, J. et al, 2015) Es decir, la exergía es la máxima cantidad de trabajo que puede ser extraído por un consumidor de energía externo durante una interacción entre el sistema y sus alrededores hasta que se ha alcanzado el equilibrio. La exergía es una propiedad que determina el potencial de trabajo útil de una cantidad de energía determinada en cierto estado especificado.

Balance Exergético: El análisis exergético es un método que permite estudiar la eficiencia energética real de cualquier sistema, mediante la aplicación de las leyes de la termodinámica. Por ello, es considerada una herramienta de análisis y diagnóstico de sistemas, útil en el diseño de soluciones que busquen reducir el uso innecesario de recursos, y por ende los impactos generados, orientando así hacia la búsqueda del desarrollo sostenible (SZARGUT, J. et al, 2015). El análisis exergético, calcula la magnitud de la destrucción de exergía en cada componente durante el proceso.

Biomasa: Considerada una de las fuentes de energía renovables e inagotable, conformada por los residuos forestales, agrícolas, industriales, domésticos y urbanos. Estos residuos conservan energía química generada en la transformación energética de la radiación solar, siendo liberada por medio de una combustión directa o con ayuda de procesos auxiliares en otras fuentes energéticas (Vega & Bolaños, 2015). La utilización de la biomasa contribuye beneficios tanto como energético, sino que su transformación es beneficiosa e indispensable para el entorno.

Biogás: El biogás es un gas combustible que se logra obtener de la biomasa, es más liviano que el aire. El mecanismo predominante para la transformación de biomasa en biogás es la conversión bioquímica en donde se involucran unas fases de procesos bacterianos y enzimáticos de manera simultánea. Unos de los métodos más empleados para la producción de biogás son por medio de la digestión anaerobia que consiste en un tanque completamente cerrado conocido con el nombre de biodigestor, la mezcla debe ser completamente homogénea (Moreno, 2018).

El poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano (8,500 kcal/m³). La biodigestión se da en ausencia de oxígeno, para estabilizar la materia orgánica por conversión en metano y otros productos inorgánicos incluyendo dióxido de carbono. $M.O. + H_2O \rightarrow CH_4 + CO_2 +$ nueva masa + $NH_3 + H_2S +$ calor (Eva Patricia Tavizón Alvarado 2010), una de la principal reacción durante el proceso es la fermentación anaeróbica de la materia a causa de las bacterias metanogénicas $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4 + 34.4$ calorías (Alejandro Bautista Buhigas 2010).

Componente	Composición aproximada en %
Metano (CH_4)	60-70
dióxido de carbono (CO_2)	30-40
Hidrógeno (H_2)	1.0
Nitrógeno (N_2)	0.1
Monóxido de carbono (CO)	0.1
Oxígeno (O_2)	0.1
Ácido sulfúrico (H_2S)	0.1

Tabla 1: Composición química del biogás
Fuente: (Botero & Preston 1986)

Digestión anaerobia

La digestión anaeróbica (DA) es un proceso bioquímico para el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de biogás, por medio de este proceso es posible convertir en subproductos útiles gran cantidad de residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico y como producto final se obtiene un bioabono inocuo más estable. (Hamed M.El-Mashadab, 2017)

La digestión anaeróbica consta de cuatro etapas, que son realizadas por un grupo de bacterias específicas, pasando por las siguientes fases: hidrólisis por bacterias fermentativas, acidogénesis y acetogénesis, para finalmente formarse el metano en la etapa de metanogénesis. (Iván, José, Melitón, & Agustina, 2014).

Modelo de simulación PSM:

El PSM es un modelo de biblioteca de digestión anaeróbica, que predice la producción de biogás a partir de cualquier sustrato en cualquier condición de proceso dada. Se utilizan un total de 46 reacciones en el modelo, que incluyen inhibiciones, cinética de velocidad, pH, amoníaco, volumen, velocidad de carga y tiempo de retención. Las reacciones de hidrólisis se basan en la extensión de la reacción, mientras que las reacciones acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas se basan en la cinética. (Rajendran et al, 2014).

El PSM es un modelo de referencia para la digestión anaerobia, que incluye reacciones intermedias, inhibiciones y cinéticas. El modelo fue examinado y validado con resultados experimentales para reactores que operan en condiciones termófilas (55°C) de trabajos previos y plantas industriales.

Parámetros de funcionamiento de la digestión anaerobia

La producción de biogás en el proceso metanogénico depende de los siguientes parámetros: (Varnero, 2011)

Naturaleza y composición bioquímica de materias primas.

Las diversas materias primas que se pueden utilizar en la fermentación metanogénica, pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico u otros.

Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores). Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas.

Materia Prima	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Celulosa Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceniza (%)
Paja de Trigo	1,10	2,10	65,45	21,60	3,53
Paja de arroz	2,35	12,26	30,51	10,61	12,55
Pasto verde	8,05	4,94	57,22	9,80	19,99
Bovino	3,23	9,05	32,49	35,57	19,66
Porcino	11,50	10,95	32,39	21,49	23,67
Aves	2,84	9,56	50,55	19,82	17,23
Ovino	6,30	3,75	32,00	32,00	25,95

Tabla 2. Composición química de diversos residuos de origen animal y vegetal (valores promedios, base seca).

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

Rangos de pH y alcalinidad

Esta variable es de gran importancia pues ayuda a determinar la fase del proceso. Los organismos que intervienen en cada fase son diferentes, y debe establecerse un equilibrio entre la producción de ácidos y su regresión, para que ambos tipos de organismos puedan coexistir dentro del digestor y encuentren las posibilidades ambientales para su desarrollo. Concretamente, los organismos productores de ácidos y, por consiguiente, el proceso de digestión suele interrumpirse por el decaimiento de los organismos productores de metano debido a algún cambio ambiental que les hace menos viables. Las bacterias que intervienen en la digestión anaerobia se encuentran en un rango de pH de entre 6 y 8, con un valor próximo a 7 para la actividad óptima. Es importante cuidar que el pH se encuentre dentro del rango mencionado, y que este no disminuya en el sistema, ya que las bacterias formadoras de metano no pueden trabajar en valores de pH debajo de 6, provocando una producción baja de metano. A valores de pH menores que 6.3 y mayores de 7.8, la cinética de la metanogénesis disminuye notablemente. Este

proceso de inhibición es originado por la disminución del pH (menor que 6), obteniendo una insuficiente capacidad buffer dentro del reactor.

Relación C/N

Existe una amplia diversidad de criterios acerca de cuál es la relación óptima que debe existir entre la materia orgánica a degradar (carbono) y la cantidad de los principales macronutrientes en un proceso anaerobio, dependiendo ésta en gran medida del tipo de sustancias de que esté compuesto el residuo. Como regla general, se plantea que el contenido C:N:P debe ser cercano a 100:1.75:0.25 en base a la Demanda Química de Oxígeno (DQO). En muchas ocasiones, se puede lograr un buen balance mezclando diferentes residuos. Si el nitrógeno está en exceso puede producirse mucho amoníaco lo cual puede inhibir el proceso anaerobio por encima de ciertos niveles (3 kg/m^3). Sin embargo, existen algunos trabajos donde se reportan algunas concentraciones tolerantes de 4 a 9 kg/m^3 de nitrógeno en procesos anaerobios (Ruiz I., 2002) Los microorganismos siempre consumen estos elementos, debe haber una relación adecuada entre nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana. La relación C/N debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 20-30/1. Así como además requiere algunos minerales como nutrientes.

En la Tabla 3 se presenta la caracterización teórica de diferentes sustratos, en donde se observa a los sustratos que se encuentran dentro de la proporción C/N recomendada, son el estiércol de vaca y estiércol de oveja.

Sustrato	Contenido de carbono por peso (%)	Contenido de nitrógeno por peso (%)	Relación carbono a nitrógeno (C/N)
Lodos anaerobios	40	4	10/1
Estiércol de aves	41	1.3	32/1
Suero de leche	10	11.7	0.85/1
Estiércol fresco de oveja	16	0.55	29/1
Estiércol fresco de vaca	7.3	0.29	25/1
Estiércol fresco de cerdo	7.8	0.6	13/1

Tabla 3. Relación C/N de los sustratos empleados comúnmente para la producción de biogás

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

Efecto de la temperatura

Este parámetro influye de manera decisiva en el proceso anaerobio, ya que de él depende mucho las velocidades de reacción con las que se lleva a cabo cualquier proceso biológico, la composición del biogás debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura y el daño que pueda causar a los microorganismos presentes en el medio después de ciertos valores de ésta. Se han definido dos rangos de trabajo donde puede efectuarse satisfactoriamente la anaerobiosis de biomasas. Ellos son los siguientes (Montalvo M. 2011):

- Mesofílico entre 20 y 45 °C.
- Termofílico entre 45 y 60 °C

La temperatura óptima en cada uno de estos rangos es difícil de predecir, ya que depende del tipo de residual, de las condiciones ambientales, etc. No obstante, se reconocen en general como temperaturas óptimas las de 35 y 55 °C para los tratamientos mesófilos y termófilos, respectivamente.

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura, su velocidad de reacción depende de la velocidad de crecimiento de los

microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaerobios (Tabla 4).

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrofílica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesofílica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Termofílica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Tabla 4. Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica (Langrange, 1979)

El régimen mesofílico de operación es el más utilizado, a pesar de que en la actualidad se está implementando cada vez más el rango termofílico, para conseguir una mayor velocidad del proceso, lo que implica, a la vez, un aumento en la eliminación de organismos patógenos. Sin embargo, el régimen termofílico suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga. Como regla general, la actividad biológica se duplica cada incremento en 10°C dentro del rango de temperatura óptima. Para un óptimo funcionamiento del digestor, se recomienda que el tratamiento anaeróbico se diseñe para que opere con variaciones de temperatura que no excedan los 0.6 – 1.2 °C /día.

3.2 ESTADO DEL ARTE.

En estudios similares de generación de biogás a partir de biomasa, encontramos a JL Ramos-Suárez en 2018 con su estudio nos muestra cómo la producción de biogás a partir de estiércol animal producido en granjas en las Islas Canarias puede representar una fuente de energía adicional para producir calor y / o electricidad. Los resultados muestran que el estiércol animal como fuente de biogás puede estar asociado con un potencial general de biogás de 27,1 Mm. 3 año -1 con una capacidad de potencia

instalada equivalente de 6,8 MWe. Considerando 0,5 t día⁻¹ estiércol como límite mínimo para la implementación de proyectos de biogás, 546 granjas que crían diferentes tipos de animales (aves, ovejas, cerdos, vacas o cabras) tienen potencial para producir y utilizar su propio biogás para generar calor y / o electricidad con potencias eléctricas que van de 3 a 185 kWe. Los ahorros potenciales de emisiones de GEI debido a la producción de biogás a partir de estiércol animal podrían alcanzar las 55.745,1 toneladas anuales de dióxido de carbono equivalentes, incluida la sustitución de combustibles fósiles y el manejo adecuado del estiércol animal (JL Ramos-Suárez, A. Ritter, J. Mata González, A. Camacho Pérez, 2018)

De igual forma, Shubhra Singh en 2021 en su estudio, evalúa comparativamente la producción de biogás a partir de la co-digestión de heces humanas con cama de aves y estiércol de vaca. Este es el primer intento documentado a escala piloto de utilizar heces humanas para la producción de biogás en la India.

Aquí se encontró que la co-digestión de heces humanas con estiércol de vaca (HF+CD) en una proporción de 40:60 resultó ser una materia prima eficaz con un alto potencial para la generación de biogás por digestión anaeróbica. Sin embargo, cuando las heces humanas fueron co-digeridas con cama de aves de corral (HF+PL) en una proporción de 50:50, la producción de biogás específica disminuyó en comparación con HF+CD debido a un pH alto, una relación C / N baja y una concentración alta de NH₄ -N en los desechos de la cama de las aves de corral. La alta concentración de NH₄ -N es tóxica para los anaerobios, lo que disminuirá la eficiencia de la digestión y alterará el proceso. De los resultados obtenidos, la generación acumulada de biogás fue mayor en el HF.+CD (12,96 × 10³ ml) comparado con el HF+PL (9,85 × 10³ ml) y HF (7,62 × 10³ ml). La digestión anaeróbica de HF, HF+PL y HF+La EC tuvo solo efectos menores sobre la inactivación de patógenos del digestato sólido y líquido, mostrando una reducción en el número de E. coli y Enterobacteriaceae en una unidad

logarítmica. Por lo tanto, se requeriría un tratamiento posterior adicional, como el co-compostaje y el vermicompostaje, para destruir patógenos y permitir el uso de digestato para fines agrícolas. El estudio recomendó que se llevaran a cabo más estudios para determinar la mejor proporción de mezcla para estas materias primas para un rendimiento óptimo de biogás. El uso de heces humanas como un producto valioso podría ayudar a abordar tanto el desafío del saneamiento como a ofrecer beneficios ambientales en términos de producción de biogás y fertilizantes orgánicos (Shubhra Singh, N. Hariteja, Shilpi Sharma, N. Janardhana Raju, TJ Renuka Prasad, 2021).

Por su parte, Alexis Sagastume Gutiérrez en 2020, identifica el potencial energético basado en biomasa de los residuos de biomasa disponibles en Colombia. Además, es necesario destacar las aplicaciones potenciales del potencial energético basado en la biomasa, para reemplazar las fuentes de energía insostenibles como los combustibles fósiles o la leña para cocinar en la combinación de energía de uso final. Aquí se evidenció un potencial bioenergético de 60.000 a 120.000 GWh por año, con mayores potencialidades para los sistemas de combustión directa que para la digestión anaeróbica. En particular, el potencial de biogás representa el 90% del uso de gas natural y GLP. Además, el uso de aproximadamente la mitad de la biomasa sólida disponible en los sistemas de combustión directa puede reemplazar potencialmente el uso de combustibles sólidos (es decir, madera y carbón). En total, el uso combinado de combustión directa y digestión anaeróbica puede soportar del 50 al 97% del uso de combustibles gaseosos y sólidos (Alexis Sagastume Gutiérrez, Juan J. Cabello Eras, Luc Hens, Carlo Vandecasteele, 2020).

Profundizando con el análisis exergetico, se pudo identificar estudios como el de Giorgio Vilardi en 2020, que muestra un análisis completo de exergía y energía de tres tecnologías de mejora de biogás: procesos de depuración de aminas, depuración de agua y separación de membranas. En donde las tres tecnologías aquí reportadas se implementaron en diagramas de flujo de Aspen Plus y se utilizaron para

actualizar un biogás a biometano, cumpliendo con los estándares UNIT / TS 11537: 2019 para que el biogás se inyecte en la red de gas. Se han analizado cada unidad de todos los procesos simulados calculando la alimentación de exergía total, la exergía total producida y la pérdida de exergía, distinguiendo lo perdido por irreversibilidad y por desperdicio. Aquí se encontró que el lavado de agua se caracterizó por los valores más altos de eficiencia exergética (94,5%) y recuperación de metano (99%), mientras que la eficiencia exergética más baja correspondió a la separación de membranas (90,8%) que arrojó también el mayor consumo específico de energía (0,94 kWh / m³STP). Por el contrario, el lavado de aminas se caracterizó por el valor de consumo energético específico más bajo (0,204 kWh / m³ STP) pero con una eficiencia exergética del 91,1% (Giorgio Vilardi, Claudia Bassano, Paolo Deiana, Nicola Verdone, 2020).

En 2021, por medio del software Aspen Plus, M. Puig-Gamero simuló en el proceso de gasificación directa (con aire) de biomasa en un reactor de lecho fluidizado burbujeante. La simulación del proceso de pirólisis fue respaldada por una subrutina externa de MS-Excel® para definir el rendimiento y la composición de los componentes principales, a saber, carbón, gas y alquitrán. Mientras que los procesos de combustión y reducción se simularon mediante un modelo cinético. Estos modelos fueron calibrados y posteriormente validados con un conjunto de resultados distintos de la gasificación de cuatro tipos diferentes de biomasa utilizando un reactor de lecho fluidizado burbujeante a escala piloto, con diferente relación de equivalencia (de 0,17 a 0,35) y temperatura (de 709 ° C a 859 ° C). ° C). Los resultados obtenidos de la simulación, a saber, la concentración de CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄ en el gas productor, estuvieron en buen acuerdo con los experimentales para un conjunto de tipos de biomasa y condiciones de operación. Entre los gases analizados, H₂ gas se predijo con la precisión más bajo,

siempre siendo sobreestimado; a pesar de eso, el error absoluto más alto obtenido para H 2 fue solo del 4,4%. Finalmente, la concentración de alquitrán predicha estuvo entre 20 y 42 g / Nm³ y disminuyó con el aumento de la relación de equivalencia, temperatura y tamaño de partícula de biomasa (M. Puig-Gamero, D.T. Pio, L.AC Tarelho, P. Sánchez, L. Sanchez-Silva, 2021).

En cuanto a la efectividad del uso de residuos de estiércol bovino, se encontró que Molla Rahman Shaibur en 2021 hizo un estudio para observar la efectividad de los mismos, producidos en plantas de biogás y sus impactos posteriores en el perfil socioeconómico. Se seleccionaron al azar doce muestras representativas de plantas de biogás para la entrevista y los hallazgos sugirieron que el sistema de transferencia de energía renovable en forma de planta de biogás logró convertir el estiércol de vaca en fertilizante orgánico rico en energía y nutrientes, lo que redujo el costo de compra de fertilizantes químicos para los propietarios de las plantas. Las plantas de transferencia de energía renovable mejoraron notablemente el entorno de cocción general de los digestores de biogás y redujo el tiempo necesario para recolectar leña. Esto facilita el manejo del ganado y la preservación de los recursos forestales. Las plantas de biogás eventualmente contribuyeron a elevar las condiciones ambientales y la recuperación de recursos, lo que finalmente mejoró los perfiles socioeconómicos en términos de distribución ocupacional y nivel educativo de los hogares participantes. Sin embargo, algunos hogares en el área encuestada no manejaron de manera óptima los desechos agrícolas y el estiércol de vaca. Esto provoca una degradación ambiental en términos de contaminación del agua y el aire en el área de estudio.

Mohamed Mahmoud Ali en 2020 en su estudio introdujo la primera evaluación del potencial de biogás de estiércol de ganado y desechos de mataderos en el noroeste de África. Los hallazgos de este estudio, como el primero en sí mismo, podrían usarse para comprender cómo la utilización de información como la población de mataderos y ganado, los hábitats de nutrición, Se pueden emplear mapas de uso

de la tierra y un sistema de información geográfica (SIG) para generar un modelo para una evaluación más completa del potencial de producción de biogás a partir de estiércol de ganado y desechos de mataderos, específicamente en el caso de los países del norte de África. Además, en el caso de la planta de biogás,

este modelo podría utilizarse como herramienta de toma de decisiones para identificar la ubicación altamente calificada para la construcción de la planta de biogás (Mohamed Mahmoud Ali, Mamoudou Ndongo, Boudy Bilal, Kaan Yetilmezsoy, Issakha Youm, Majid Bahramian, 2020).

En cuanto a datos de biogás y la biomasa residual, Sarker, en un estudio en 2020, nos presenta datos brutos de biogás volumétrico y su composición de metano obtenidos de experimentos de digestión anaeróbica realizados a escala de laboratorio. Se realizó una evaluación del potencial de producción de biogás a partir de estiércol de ganado y se presentan brevemente los datos obtenidos. Estos datos obtenidos dan una idea del potencial de producción de biogás del estiércol de ganado y las tortas de aceitunas. Con el fin de permitir una evaluación más completa relevante para la comercialización de una planta de biogás (Sarker, 2020).

Jorge M. Mendoza en 2020, en su estudio, caracteriza experimentalmente mezclas de biomasa de residuos de cultivos para evaluar su potencial energético utilizando un enfoque experimental en un gasificador de corriente descendente a escala comercial se encontró que la temperatura, la composición del gas de síntesis, el menor poder calorífico del gas de síntesis y la eficiencia del gas frío se vieron afectados negativamente a medida que aumentaba la proporción de cáscaras de arroz en la mezcla. Fue posible alcanzar valores de CGE de hasta 57,91% y LHV de hasta 4460 kJ / kg en determinadas condiciones de mezcla. Un mayor porcentaje de cascarilla de arroz provocó un aumento considerable en la variabilidad de la relación de equivalencia, lo que resultó en condiciones de gasificación

subóptimas (Rafael D. Gómez, Mario Palacio, Juan F. Arango, Adrián E. Ávila, Jorge M. Mendoza, 2020).

Alejandro Bautista Buhigas en 2010 encuentra que el biogás resultado del proceso de digestión anaerobia se produce de 400 a 700 litros de gas por cada kilogramo de materia volátil destruida, según sean las características del fango. El biogás del digestor (debido al metano) posee un poder calorífico aproximado de 4,500 a 5,600 kcal/m³.

3.3 Caracterización de la biomasa:

(Fernandez-Lopez, Pedroche, Valverde, & Sanchez-Silva, 2017) Tomaron una muestra de estiércol seco de una lechería. La muestra de estiércol se almacenó primero en un tanque para eliminar parte de su humedad y luego se secó en una estufa a 105 °C. La caracterización físico-química de esta muestra, incluidos los análisis aproximados y finales, el contenido de metales, cianuro (CN⁻), cloruro (Cl⁻) y el poder calorífico se muestran en la siguiente Tabla 5.

Análisis final (% en peso) BS ^a					Análisis próximo (% en peso) ^a					HHV (MJ / kg)	LHV (MJ/kg)	
C	H	N	S	O	M	FC	VM	ASH	TS			
51,4	6,72	1,7	0,5	39,5	3,45	11,6	64,09	20,7	18,8	18,4	16,7	
3		4	2	9		8		8				
Contenido de minerales (ppm)												
Al	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Na	Ni	P	Si	Cl ⁻	CN ⁻
516	16,99	73	-	3800	580	6426	37,44	-	16,20	53	42,88	45

	7				6		5		7	7	6		
--	---	--	--	--	---	--	---	--	---	---	---	--	--

^a *BS = base seca y libre de cenizas; M = humedad; VM = Materia volátil; FC = carbono fijo; ASH = cenizas; TS = Sólidos totales; HHV = Poder calorífico superior.*

Tabla 5. Caracterización de la biomasa.

Fuente: (Fernandez-Lopez, Pedroche, Valverde, & Sanchez-Silva, 2017)

3.4 Desarrollo

3.4.1 Descripción del modelo:

Para el PSM se consideran dos grupos de reacciones para la digestión o fermentación anaeróbica. Estos dos grupos (A y B) dependen de la complejidad de la reacción, definiéndose condiciones específicas para las etapas de la digestión:

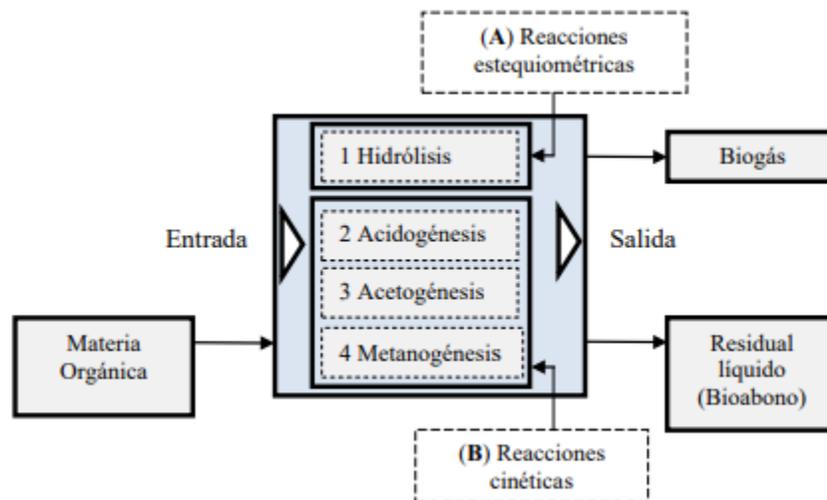


Figura 1: Esquema general del proceso de simulación

Fuente: (Suárez & López, 2019)

En la digestión anaerobia ocurren una cantidad enorme de reacciones. La comunidad microbiana dentro de la DA es bastante compleja, compuesta de más de 500 especies (Méndez-Acosta et al. 2004), por

ello se desconoce las reacciones que son llevadas a cabo por toda la comunidad microbiana. Para la definición del PSM, se consideran las reacciones estequiométricas (A) que intervienen en la hidrólisis, evaluadas por Rajendran et al., (2013), para una variación de la fracción de conversión de 0 a 1. Las ecuaciones de hidrólisis se incluyen carbohidratos, proteínas y grasas en el conjunto de reacciones (A) (ver Tabla 6). Los carbohidratos se incorporan como celulosa, almidón y hemicelulosas. Las proteínas se añadieron en base a su solubilidad, tales como las proteínas solubles y las proteínas insolubles. Las grasas constan de tripalmitato, trioleína, palmito-oleína y linoleico palmítico.

<i>No</i>	<i>Componente</i>	<i>Reacción de hidrólisis</i>	<i>% Conv.</i>
1	Almidón	$(C_6H_{12}O_6)_n + H_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$	0,6±0,2
2	Celulosa	$(C_6H_{12}O_6)_n + H_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$	0,4±0,1
3	Hemicelulosa	$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow 2,5 C_2H_4O_2$	0,4±0,0
4	Hemicelulosa	$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_5$	0,6±0,0
5	Xilosa	$C_5H_{10}O_5 \rightarrow C_5H_4O_2 + 3H_2O$	0,6±0,0
6	Celulosa	$C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow 2C_2H_6O + 2CO_2$	0,4±0,1
7	Etanol	$2C_2H_6O + CO_2 \rightarrow 2C_2H_4O_2 + CH_4$	0,6±0,1
8	Proteína Soluble	$C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6H_2O \rightarrow 6,5CO_2 + 6,5CH_4 + 3NH_3 + H_2S$	0,5±0,2
9	Proteína Insoluble (P.I)	$P.I + 0,3337H_2O \rightarrow 0,045C_6H_{14}N_4O_2 + 0,048C_4H_7NO_4 + 0,047C_4H_9NO_3 + 0,172C_3H_7NO_3 + 0,074C_5H_9NO_4 + 0,111C_5H_9NO_2 + 0,25C_2H_5NO_2 + 0,047C_3H_7NO_2 + 0,067C_3H_6NO_2S + 0,074C_5H_{11}NO_2 + 0,07C_6H_{13}NO_2 + 0,046C_6H_{13}NO_2 + 0,036C_9H_{11}NO_2$	0,6±0,1
10	Trioleína	$C_{57}H_{104}O_6 + 3H_2O \rightarrow C_3H_8O_3 + 3C_{18}H_{34}O_2$	0,5±0,2
11	Tripalmitato	$C_{51}H_{98}O_6 + 8,436H_2O \rightarrow 4C_3H_8O_3 + 2,43C_{16}H_{34}O$	0,5±0,3
12	Palmito-Oleína	$C_{37}H_{70}O_5 + 4,1H_2O \rightarrow 2,1C_3H_8O_3 + 0,9C_{16}H_{34}O + 0,9C_{18}H_{34}O_2$	0,6±0,2
13	Palmito-Linoleína	$C_{37}H_{68}O_5 + 4,1H_2O \rightarrow 2,2C_3H_8O_3 + 0,9C_{16}H_{34}O + 0,9C_{18}H_{34}O_2$	0,6±0,2

Tabla 6. Reacciones estequiométricas de la hidrólisis

Fuente: (Rajendran et al., 2013)

Con la separación de las reacciones de hidrólisis se pueden estudiar los efectos del pretratamiento para aumentar la eficiencia del proceso, a partir de la simulación del modelo para diferentes sustratos. Para el desarrollo de las etapas posteriores de la digestión anaeróbica, las cuales dependen de la cinética en las reacciones (B), se parten de los resultados obtenidos por (Serrano, 2011).

No.	Componente	Reacciones químicas	Energía de activación (J/Mol)
Reacciones de degradación de Aminoácidos			
1	Glicina	$C_2H_5NO_2 + H_2 \rightarrow C_2H_4O_2 + NH_3$	
2	Teronina	$C_4H_9NO_3 + H_2 \rightarrow C_2H_4O_2 + 0,5C_4H_8O_2 + NH_3$	
3	Histidina	$C_6H_8N_3O_2 + 4H_2O + 0,5H_2 \rightarrow CH_3NO + C_2H_4O_2 + 0,5C_4H_8O_2 + 2NH_3$ + CO_2	
4	Arginina	$C_6H_{14}N_4O + 3H_2O + H_2 \rightarrow 0,5C_2H_4O_2 + 0,5C_3H_6O_2 + 0,5C_5H_{10}O_2 + 4NH_3 + CO_2$	
5	Prolina	$C_5H_9NO_2 + H_2O + H_2 \rightarrow 0,5C_2H_4O_2 + 0,5C_3H_6O_2 + 0,5C_5H_{10}O_2 + NH_3$	
6	Metionina	$C_5H_{11}NO_2S + 2H_2O \rightarrow C_3H_6O_2 + CO_2 + NH_3 + H_2 + CH_4S$	
7	Serina	$C_3H_7NO_3 + H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + H_2$	
8	Treonina	$C_4H_9NO_3 + H_2O \rightarrow C_3H_6O_2 + NH_3 + H_2 + CO_2$	
9	Ácido-Aspártico	$C_4H_7NO_4 + 2H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 + NH_3 + 2CO_2 + 2H_2$	
10	Ácido - Glutámico	$C_5H_9NO_4 + H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 + 0,5C_4H_8O_2 + NH_3 + CO_2$	14143
11	Ácido - Glutámico	$C_5H_9NO_4 + 2H_2O \rightarrow 2C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + H_2$	
12	Histidina	$C_6H_8N_3O_2 + 5H_2O \rightarrow CH_3NO + 2C_2H_4O_2 + 2NH_3 + CO_2 + 0,5H_2$	
13	Arginina	$C_6H_{14}N_4O_2 + 6H_2O \rightarrow 2C_2H_4O_2 + 4NH_3 + 2CO_2 + 3H_2$	
14	Lisina	$C_6H_{14}N_2O_2 + 2H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 + C_4H_8O_2 + 2NH_3$	
15	Leucina	$C_6H_{13}NO_2 + 2H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_2 + NH_3 + CO_2 + 2H_2$	
16	Isoleucina	$C_6H_{13}NO_2 + 2H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_2 + NH_3 + CO_2 + 2H_2$	
17	Valina	$C_5H_{11}NO_2 + 2H_2O \rightarrow C_4H_8O_2 + NH_3 + CO_2 + 2H_2$	
18	Fenilalanina	$C_9H_{11}NO_2 + 2H_2O \rightarrow C_6H_6 + C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + H_2$	
19	Tirosina	$C_9H_{11}NO_3 + 2H_2O \rightarrow C_6H_6O + C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + H_2$	
20	Tiptofan	$C_{11}H_{12}N_2O_2 + 2H_2O \rightarrow C_8H_7N + C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + H_2$	

21	Glicina	$C_2H_5NO_2+0,5H_2O\rightarrow 0,75C_2H_4O_2+NH_3+0,5CO_2$	
22	Alanina	$C_3H_7NO_2+2H_2O\rightarrow C_2H_4O_2+NH_3+CO_2+2H_2$	
23	Cisteína	$C_3H_6NO_2S+2H_2O\rightarrow C_2H_4O_2+NH_3+CO_2+0,5H_2+H_2S$	
Reacciones acidogénicas			
24	Dextrosa	$C_6H_{12}O_6+0,1115NH_3\rightarrow 0,1115C_5H_7NO_2+0,744C_2H_4O_2+0,5C_3H_6O_2+0,4409C_4H_8O_2+0,6909CO_2+1,0254H_2O$	35616
25	Glicerol	$C_3H_8O_3+0,4071NH_3+0,0291CO_2+0,0005H_2\rightarrow 0,04071C_5H_7NO_2+0,94185C_3H_6O_2+1,09308H_2O$	35616
Reacciones acetogénicas			
26	Ácido - Oleico	$C_{18}H_{34}O_2+15,2396H_2O+0,2501CO_2+0,1701NH_3\rightarrow 0,1701C_5H_7NO_2+8,6998C_2H_4O_2+14,4978H_2$	21472
27	Ácido - Propiónico	$C_3H_6O_2+0,06198NH_3+0,314336H_2O\rightarrow 0,06198C_5H_7NO_2+0,9345C_2H_4O_2+0,660412CH_4+0,160688CO_2+0,0005H_2$	18108
28	Ácido - Isobutírico	$C_4H_8O_2+0,0653NH_3+0,8038H_2O+0,0006H_2+0,5543CO_2\rightarrow 0,0653C_5H_7NO_2+1,8909C_2H_4O_2+0,446CH_4$	17043
29	Ácido - Isovalérico	$C_5H_{10}O_2+0,0653NH_3+0,5543CO_2+0,8044H_2O\rightarrow 0,0653C_5H_7NO_2+0,8912C_2H_4O_2+C_3H_6O_2+0,4454CH_4+0,0006H_2$	17043
30	Ácido - Linoleico	$C_{18}H_{32}O_2+15,356H_2O+0,482CO_2+0,1701NH_3\rightarrow 0,1701C_5H_7NO_2+8,4402C_2H_4O_2+14,9748H_2$	21472
31	Ácido - Palmítico	$C_{16}H_{34}O_2+15,253H_2O+0,482CO_2+0,1701NH_3\rightarrow 0,1701C_5H_7NO_2+8,4402C_2H_4O_2+14,9748H_2$	21472
Reacciones metanogénicas			
32	Ácido - Acético	$C_2H_4O_2+0,022NH_3\rightarrow 0,022C_5H_7NO_2+0,945CH_4+0,066H_2O+0,945CO_2$	29136
33	Hidrógeno	$14,4976H_2+3,8334CO_2+0,0836NH_3\rightarrow 0,0836C_5H_7NO_2+3,4154CH_4+7,4996H_2O$	

Tabla 7. Reacciones cinéticas de la degradación de aminoácidos y las etapas acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas.

Fuente: (Rajendran et al., 2013)

Bloques de cálculo Fortran: Un bloque de cálculo en Aspen Plus permite insertar declaraciones validas de cálculo en Fortran para el diagrama de flujo; para que realice tareas definidas por el usuario. El uso de Fortran permite escribir modelos propios, cálculos y ajuste de variables de entrada antes de ser utilizados, así como llamar a subrutinas externas, entre otras.

Cada bloque de cálculo del conjunto de reacciones cinéticas (b) tiene un programa de Fortran, que calcula los productos entregados de cada una de las reacciones. Los bloques de cálculo se asignan con diferentes variables tales como la velocidad de flujo, VFA`S (Volatile Fatty Acids), temperatura, parámetro cinético y H_2 , lo cual importa la cantidad de reactantes y la velocidad de reacción para cada bloque de cálculo basado de los resultados aportados del conjunto de reacciones estequiométricas (a).

Los parámetros cinéticos se obtuvieron a partir de estudios previos en la literatura (Andrews, J.F. 1968; Angelidaki et al. 2000; Batstone et al. 2002). Se utilizó ley de potencia para calcular la velocidad de reacción, que incluye la tasa de crecimiento específica de los microorganismos, y las inhibiciones de amoníaco. El pH se calcula en función de las constantes de equilibrio químicas dentro de los bloques de cálculo para cada VFA (Ácidos grasos volátiles), basados en Angelidaki et al., 2000 y Cheng, J. 2010.

En total se definieron 10 bloques calculadores que determinaron los parámetros cinéticos correspondientes a la formación de aminoácidos como el glicerol, ácido valérico, ácido butírico, ácido propiónico, ácido linoleico, ácido palmítico, ácido oleico, azúcares, así como la metanogénesis acetoclástica e hidrogenotrófica. Se considera como materia prima en la etapa de digestión anaerobia, la biomasa (estiércol bovino).

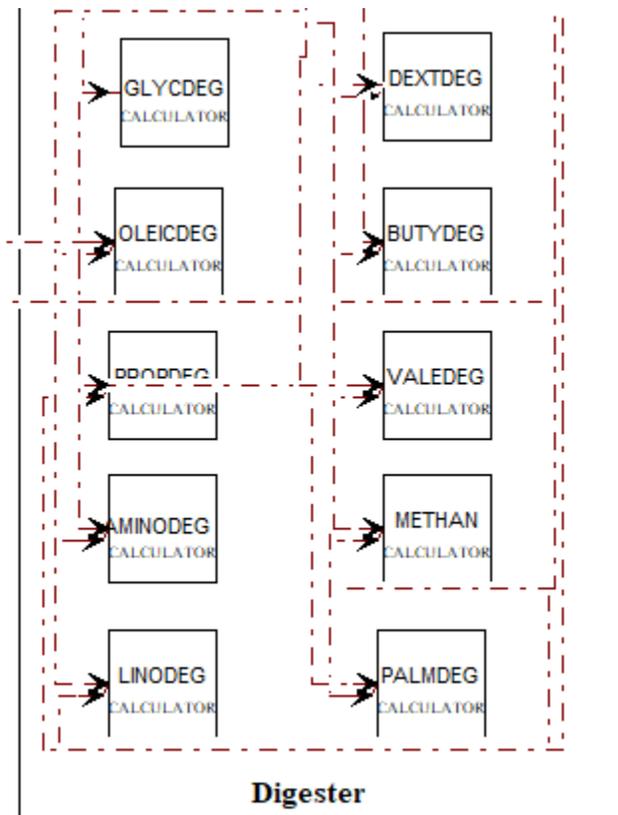


Figura 2. Bloques de calculo

Para simular el biodigestor termofílico (55 ° C) se utilizó un reactor estequiométrico (RSTOIC) para la fase de hidrólisis y un reactor de tanque con agitación continua (CSTR) para las otras fases. El tiempo de residencia de los reactores se fijó en 15 días, que es típico de la digestión anaerobia en condiciones termofílicas. (Y. Zheng, J. Zhao, F. Xu, Y. Li, 2014).

Para la simulación se utilizó la composición química del estiércol bovino empleada por Budiyono, 2011. Celulosa 16,9%, Hemicelulosa 37,95%, Proteína 9,05%, Grasas 3,21%, Dextrosa 2%, Amoniaco 0,01%, Ceniza 19%.

Composition

Mass-Frac

Component	Value
WATER	0,1188
GLYCEROL	
OLEIC-AC	
DEXTROSE	0,02
ACETI-AC	0
PROPI-01	0
ISOBU-01	
ISOVA-01	
H+	
OH-	
NH3	0,0001
CELLULOS	0,169
HEMECELL	0,3795
GLUCOSE	
TRIOLEIN	0,0107
TRIPALM	0,0107
PALM	0,0107
PROTEIN	0,0905
KERATIN	0
ACETATE	
INERT	0,19
Total	1

Figura 3. Especificación composición química del estiércol.

La razón de flujo de la materia orgánica representa la condición inicial del proceso de cálculo comenzando para el bloque de la hidrólisis la formación de monómeros que luego intervienen en las etapas posteriores donde se realiza el cálculo de sus parámetros cinéticos.

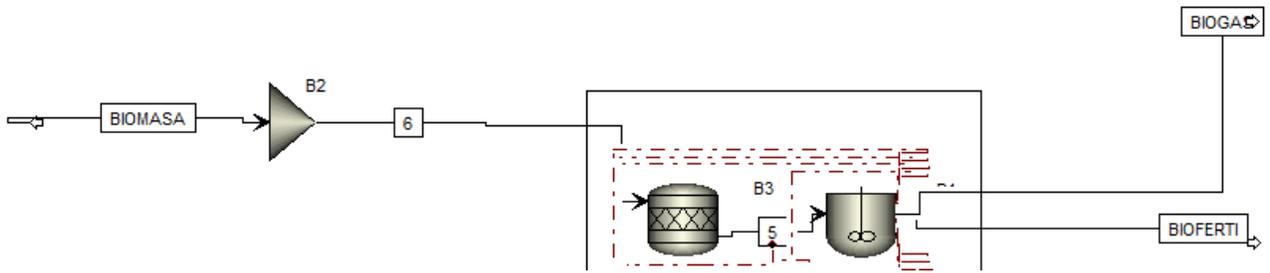


Figura 4. Esquema del modelo en ASPEN PLUS.

Modelo Termodinámico: En un diagrama de flujo en Aspen Plus, es posible definir un modelo termodinámico distinto para cada etapa o bloque de operación y, así simular el proceso de una manera más realista. El modelo termodinámico que se definió y recomendado por la literatura para el proceso en cuestión fue el NRTL (Non-Random Two-Liquid model). Dicho método correlaciona y calcula sobre la base de fracciones molares y coeficientes de actividad para diferentes componentes, facilitando el equilibrio vapor líquido. (Serrano, 2011).

Validación del modelo PSM: El modelo PSM fue validado con datos experimentales, los cuales utilizan diferentes sustratos con diversas condiciones de proceso, incluyendo datos de estudio en investigación de laboratorio a pequeña escala y plantas industriales de DA. Tomando como base la información del estiércol de vaca (Budiyono, 2011), especificando las condiciones de operación, el flujo volumétrico y las fracciones másicas, se puede ejecutar la simulación. Enseguida nos muestra los siguientes resultados:

B2 (Mixer) x Main Flowsheet x Control Panel x VALEDEG - Input x B1 (RCSTR) x METHAN x B1 (RCSTR) - Convergence x Results Summary - Stream									
Material	Heat	Load	Work	Vol. % Curves	Wt. % Curves	Petroleum	Polymers	Solids	
				Units	5	6	BIOMASA	BIOGAS	BIOFERTI
Molar Solid Fraction					0	0	0	0	0
Mass Vapor Fraction					0,00188718	0,00179572	0,00179537	1	0
Mass Liquid Fraction					0,998113	0,998204	0,998205	0	1
Mass Solid Fraction					0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	J/kmol				-2,85286e+08	-2,87353e+08	-2,87353e+08	-2,00907e+08	-2,83531e+08
Mass Enthalpy	J/kg				-1,50601e+07	-1,51259e+07	-1,51259e+07	-7,59366e+06	-1,51969e+07
Molar Entropy	J/kmol-K				-158129	-165605	-165605	-42079,1	-156684
Mass Entropy	J/kg-K				-8347,57	-8717,22	-8717,23	-1590,46	-8398,03
Molar Density	kmol/cum				24,4333	37,295	37,4423	0,0371379	51,5575
Mass Density	kg/cum				462,843	708,508	711,306	0,982563	961,92
Enthalpy Flow	Watt				-41,2872	-41,4675	-41,4675	-0,373872	-40,9001
Average MW					18,9431	18,9974	18,9974	26,4572	18,6572
+ Mole Flows	kmol/hr				0,000521	0,000519512	0,000519512	6,69932e-06	0,000519309
+ Mole Fractions									
- Mass Flows	kg/day				0,236865	0,236865	0,236865	0,00425388	0,232533
WATER	kg/day				0,221839	0,222653	0,222653	0,00044691	0,221701
GLYCEROL	kg/day				3,18572e-05	0	0	6,15283e-13	1,42328e-05

Figura 5. Resumen de resultados de las corrientes del diagrama de flujo.

B2 (Mixer) x Main Flowsheet x Control Panel x VALEDEG - Input x B1 (RCSTR) x METHAN x B1 (RCSTR) - Convergence x Results Summary - Stream									
Material	Heat	Load	Work	Vol. % Curves	Wt. % Curves	Petroleum	Polymers	Solids	
				Units	5	6	BIOMASA	BIOGAS	BIOFERTI
TRIPALM	kg/day				9,4746e-06	9,4746e-05	9,4746e-05	8,27619e-23	9,4746e-06
PALM	kg/day				0,000118102	0	0	1,00071e-14	8,88393e-07
SN-1--01	kg/day				0	0	0	0	0
SN-1--02	kg/day				9,4746e-06	9,4746e-05	9,4746e-05	8,03549e-20	9,4746e-06
XYLOSE	kg/day				0,000269164	0	0	3,35441e-14	0,000269164
FURFURAL	kg/day				0	0	0	0	0
LINOLEIC	kg/day				4,0351e-05	0	0	2,51003e-16	3,25856e-07
STARCH	kg/day				0	0	0	0	0
ETHANOL	kg/day				0,00118448	0	0	2,90193e-05	0,00115546
PROTEIN	kg/day				7,10595e-05	0,000710595	0,000710595	7,2204e-06	6,38391e-05
KERATIN	kg/day				0,000213178	0,000426357	0,000426357	0,000213105	7,31427e-08
ACETATE	kg/day				0	0	0	0	0
INERT	kg/day				0,00260551	0,00260551	0,00260551	7,97976e-17	0,00260551
+ Mass Fractions									
Volume Flow	l/day				0,511761	0,334315	0,333	4,32937	0,241738
Exergy flow rate	Watt				0,0116711	-0,00157893	-0,00157082	0,000791034	0,0115116

Figura 6. Resumen de resultados de las corrientes del diagrama de flujo.

El valor experimental de producción de biogás 353,5 L/kgVSdía para este caso esta reportado por Kaparaju et al. 2009. El reporte de unidades es respecto a los kilogramos de VS introducidos, y el simulador reporta la cantidad introducida en kg_{totales} en la corriente BIOMASA=0,237 kg/día, entonces restamos los kilogramos que no son VS; esto es: el agua (WATER=0,223 kg/día) y el inerte (INERT=0,003 kg/día). Realizando dicha operación, se tiene: 0,237-0,223-0,003=0,011 Kg_{vs}/día. Para obtener la cantidad de biogás en L/Kg_{vs} hay que dividir (353,5 L/día) / (0,011 Kg_{vs}/día) = 392,72 L/Kg_{vs}

Sustrato	Estiércol de vaca
HTR (días)	15
Temperatura (°K)	328.15
Resultados experimentales	353,5 L / Kg _{vs} .día
Resultados modelo	392,72 L / Kg _{vs} /día
Diferencia en (%)	9,9

Tabla 7. Comparación de resultados

3.5 Análisis de exergía

Supuestos considerados:

Las suposiciones que se dan a continuación se tuvieron en cuenta en los cálculos.

- El biodigestor y sus componentes se hicieron funcionar en estado estacionario.
- Los valores exergéticos de las energías cinética y potencial fueron insignificantes.
- La temperatura y la presión del estado de referencia fueron 303,15 K y 100 kPa, respectivamente.

El análisis de exergía permitió realizar una comparación entre diferentes procesos basándose en el segundo principio de la termodinámica, al encontrar la pérdida de exergía en las unidades de proceso. El análisis de exergía representó una herramienta fundamental para la optimización de un proceso, individualizando el equipo unitario caracterizado por la menor eficiencia de exergía y apoyando al diseñador de la planta a través del proceso de análisis sensible.

La ecuación de balance de masa para un sistema de volumen de control de estado estacionario podría escribirse de la siguiente manera:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

Donde: \dot{m}_{in} es el caudal masico de entrada y \dot{m}_{out} el caudal masico de salida en (kg / s)

La ecuación de balance de energía podría expresarse como

$$\sum \dot{E}n_{in} = \sum \dot{E}n_{out} \quad (2)$$

E_n = caudal de energía (kJ/s)

O de manera detallada según el análisis termodinámico de un proceso realizado por N. Yildirim, S. Genc, en 2015.

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_{in}(h_{in} - h_0) = \dot{W} + \sum \dot{m}_{out}(h_{out} - h_{in}) \quad (3)$$

Donde:

\dot{Q} = Tasa de flujo de calor (kJ / s), \dot{W} = Caudal de trabajo (kJ/s) y h = entalpias especificas (kJ/kg).

La ecuación del balance de exergía se podría escribir de la siguiente manera (IO Ohijeagbon, 2013)

$$\sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out} = \sum \dot{E}x_{dest} \quad (4)$$

Donde:

$\dot{E}x$ = Flujo de exergía (kJ/s), subíndices: in, entrada; out, salida; dest, destruida.

$$\dot{E}x = \dot{m} ex \quad (4.1)$$

Las exergías específicas de corrientes orgánicas podrían calcularse como la suma de sus exergías físicas y químicas.

$$ex = ex^{ph} + ex^{ch} \quad (5)$$

ex = exergía específica (kJ/kg); ex^{ph} = exergía física; ex^{ch} = exergía química.

La exergía física específica se obtuvo por medio de la herramienta del programa Aspen property set, llamada EXERGYFL (exergy flow rate).

La exergía química se calculó con la ecuación 6.

$$ex^{ch} = n \left(\sum_i x_i ex_i^{ch} + RT_o \sum_i x_i \ln(x_i) \right) \quad (6)$$

Donde: ex_i^{ch} es la exergía química estándar de los componentes como se observa en la tabla (kJ/mol), x_i es la fracción molar y R es la constante universal de los gases (8.314472 kJ/K* mol).

Considerando los sistemas en reposo con respecto al medio ambiente, la exergía total de un sistema se calcula como la suma de las exergías químicas y físicas. La exergía física depende de la temperatura y la presión, y la exergía química está relacionada con el equilibrio químico de una sustancia con su entorno. Las exergías químicas de diferentes compuestos pueden obtenerse de la literatura, lo que facilita el cálculo de los valores de exergía. (Pedro Cruzab; Zaira Navas, 2018)

Componente	Standard chemical exergy (kJ/mol)
CH ₄	831,65
CO ₂	18,97
H ₂ S	812
O ₂	3,97
H ₂ O (g)	9,5
N ₂	0,72
H ₂	236,09
NH ₃	336,7
CO	275
H ₂ O (l)	0,9
Glycerol (C ₃ H ₈ O ₃)	1762,66
Aceti-Ac (C ₂ H ₄ O ₂)	907,2
Propi-01 (C ₃ H ₆ O ₂)	1797
Isobu-01 (C ₄ H ₈ O ₂)	2804,2
Celulosa	3404,4
Hemicelulosa	2826,4
Xylose	1835,6
Etanol	1250,9

Tabla 8. Exergía química estándar de algunos componentes.

Fuentes: (RezaBarati, 2017) & (Samir Meramo-Hurtado, et al, 2018)

La exergía química de la biomasa se calcula a partir de la ecuación (7). (Jorge Mendoza, et al, 2012)

$$Ex_{Biomass} = \beta (LHV_{biomass}) \quad (7)$$

Donde: β es un dato en términos de las relaciones de oxígeno – carbono e hidrogeno – carbono, como se muestra en la ecuación 8 y el $LHV_{biomass}$ es el poder calorífico inferior de la biomasa.

$$\beta = \frac{1.0414+0.0177(C/H)-0.3328(O/C)[1+0.3377(H)]}{1-0.4021(O/C)} \quad (8)$$

La tasa de energía térmica perdida / absorbida por las unidades del sistema podría convertirse a la tasa de exergía de la siguiente manera:

$$E\dot{x}_l = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) \quad (9)$$

La eficiencia exergetica del biodigestor se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{Ex} = \frac{\sum E\dot{x}_{out}}{\sum E\dot{x}_{in}} \times 100 = \left(1 - \frac{E_{x,dest}}{E_{x,in}}\right) \times 100 \quad (10)$$

4. Resultados y conclusiones:

Se llevo a cabo un análisis de exergía completo para examinar termodinámicamente un digestor anaeróbico que produce simultáneamente biogás y digestatos líquidos (bio-abono). Más específicamente, el objetivo de este estudio fue localizar las pérdidas termodinámicas e identificar las oportunidades para mejorar el rendimiento del digestor mediante la presentación de balances de exergía y por medio de la simulación del proceso.

Frecuentemente la producción de biogás ocurre con un bajo contenido de metano (CH_4), debido a múltiples efectos que inhiben el proceso de fermentación en general. El análisis de la composición del biogás resultante representa una herramienta útil para la concepción y el diseño de plantas industriales. En la tabla se muestra la composición del biogás producido para las condiciones experimentales

realizadas por Diaz & Guerra, 2012 y calculadas por el PSM. Esta información tiene gran relevancia con la posibilidad de implementar acciones que contribuyan a una mayor producción de CH₄.

COMPOSICION	REFERENCIA (%)	RESULTADOS SIMULACION (%)
Metano (CH ₄)	65	51,21
Dióxido de carbono (CO ₂)	27	31,26
Hidrogeno (H ₂)	1,0	0,6
Amoniacó (NH ₃)	0,5	4,03
Ácido sulfúrico (H ₂ S)	0,1	1,74
Vapor de agua	6	7

Tabla 9. Composición del biogás estiércol bovino.

4.1 Análisis de exergía a nivel de componentes

COMPONENTE	FRACCION MOLAR
Metano (CH ₄)	0,5121136
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,31159175
Hidrogeno (H ₂)	0,006231
Amoniacó (NH ₃)	0,04032088
Ácido sulfúrico (H ₂ S)	0,01734688
Vapor de agua	0,06998444

Tabla 10. Fracciones molares del biogás obtenido en la simulación.

COMPONENTES BIOFERTI.	FRACCION MOLAR
H ₂ O (L)	0,187080636
Glycerol	0,001204002
Aceti ac	0,224467169
Propi-01	0,0260436
Isobu-01	0,022430962
NH ₃	0,003905339
Cellulosa	0,038017748
Hemecell	0,139698227
Xylose	0,034924568
Ethanol	0,068226189
Ceniza	0,231008882

Tabla 11. Fracciones molares biofertilizante

Los dos reactores que se utilizaron simulan el biodigestor, la unidad de CSTR (Reactor continuo de tanque agitado) y el RSTOIC (Reactor estequiométrico), para el análisis exergetico se tomó las exergías de entrada (biomasa) y salida (biogás, biofertilizante) de los componentes como se muestra en la siguiente tabla.

Stream	n (mol/s)	Ex_{química} (kW)	Ex_{física} (kW)	Ex_{total} (kW)
BIOMASS	0	8370,30664	0	8370,30664
BIOGAS	1,9	3386,77528	0,994068	3387,769348
BIOFERTI	0,47	1233,81102	1,3243	1235,13532

Tabla 12. Exergías entrada y salida biodigestor.

La exergía destruida se calculó con la ecuación (4) y la eficiencia exergetica con la ecuación (10). Así se obtuvo que la exergía destruida en el biodigestor es de 3749,72034 kW y la eficiencia exergetica corresponde al 55,2%.

Bibliografía

- Alexis Sagastume Gutiérrez, Juan J. Cabello Eras, Luc Hens, Carlo Vandecasteele. (2020). El potencial energético de los residuos de biomasa agrícola, agroindustrial, ganadera y de matadero mediante combustión directa y digestión anaeróbica. El caso de Colombia.
- Aleksander Lisowski, Jerzy Buliński, Stanisław Gach, Jacek Klonowski, Michał Sypuła, Jarosław Chlebowski, Krzysztof Kostyra, Tomasz Nowakowski, Adam Strużyk, Adam Świętochowski, Magdalena Dąbrowska-Salwi. (2017). Biomass collected in two phases of growth from power plants for the production of biogas.
- Ahdi Noomen Ajmi, Roula Inglesi-Lotz. (2020). The link between biomass energy consumption and economic growth in OECD countries: a panel analysis.
- Arini Wresta, Dian Andriani, Aep Saepudin, Henny Sudiby. (2015). Economic analysis of biogas from cow dung as an energy source for generating electricity in small-scale ranches.
- Giorgio Vilardi, Claudia Bassano, Paolo Deiana, Nicola Verdone. (2020). Exergy and energy analysis of three biogas improvement processes.
- Fang Liu, Guanyi Chen, Beibei Yan, Wenchao Ma, Zhanjun Cheng, Li'an Hou. (2017). Exergetic analysis of a new polygeneration system based on lignocellulosic biomass.
- Fernandez-Lopez, M., Pedroche, J., Valverde, J. L., & Sanchez-Silva, L. (2017). Simulation of the gasification of animal wastes in a dual gasifier using Aspen Plus. *Energy Conversion and Management*, 211-217.
- Hamed M.El-Mashadab, R. (2017). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology*, 4021-4028.
- Haseeb Yaqoob, Yew Heng Teoh, Zia Ud Din, Noor Us Sabah, Muhammad Ahmad Jamil, M.A. Mujtaba, Asad Abid. (2021). The potential of sustainable biogas production from biomass waste for power generation in Pakistan.
- IO Ohijeagbon, M. W. (2013). Methodology for the physical and chemical exergetic analysis of steam boilers. *Energy*, 153-164.
- Helga Cristina Fuhrmann Dinnebier, Alexandre Matthiensen, William Michelin, Deisi Cristina Tápparo, Tauani Gabriela Fonseca, Rafael Favretto, Ricardo Luis Radis Steinmetz, Helen Treichel, Fabiane Goldschmidt Antes, Airton Kunz. (2021). Fitorremediación y producción de biomasa a partir de aguas residuales porcinas de alta resistencia para la mejora de la generación de biogás: un bioproceso integrado .
- Iván, V.-R., José, M.-R., Melitón, E.-J., & Agustina, O.-S. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 429-436.
- Jorge Mendoza, et al. (2012). Análisis Exergético de la Gasificación de Biomasa. *Información Tecnológica*, 85-96.
- José Morelos Gómez. (2016). Análisis de la variación de la eficiencia en la producción de biocombustibles en América Latina.
- JL Ramos-Suárez, A. Ritter, J. Mata González, A. Camacho Pérez. (2018). Biogás procedente de estiércol animal: una oportunidad energética sostenible en Canarias.

Kotas, T. (1985). *The exergy method of thermal plant analysis*. Krieger Publishing Company.

Molla Rahman Shaibur, Humaira Husain, Samsul Huda Arpon. (2021). Utilization of cow manure waste from a biogas plant for the sustainable development of a rural community.

Mohamed Mahmoud Ali, Mamoudou Ndongo, Boudy Bilal, Kaan Yetilmezsoy, Issakha Youm, Majid Bahramian. (2020). Mapping biogas production potential from livestock manure and slaughterhouse waste: a case study for African countries.

M. Fernández-Delgado Juárez, P. Mostbauer, A. Knapp, W. Müller, S. Tertsch, A. Bockreis, H. Insam (2017). Biogas purification with biomass ash.

Néstor Sánchez, Ruth Ruiz, Anne Rödl, Martha Cobo. (2021). Análisis técnico y medioambiental de la producción de energía a partir de biomasa residual utilizando hidrógeno como vector energético.

Mohammadreza Mohammadpour, Ehsan Houshfar, Mehdi Ashjaee, Amirreza Mohammadpour. (2020).

Energy and exergy analysis of the biogas regenerative gas turbine cycle with recirculation CO₂ for the generation of oxy-fuel combustion energy.

M. Puig-Gamero, D.T. Pio, L.AC Tarelho, P. Sánchez, L. Sanchez-Silva. (2021). Simulación de gasificación de biomasa en reactor de lecho fluidizado burbujeante utilizando aspen plus®.

Li Yingjian, Qiu Qi, He Xiangzhu, Li Jiezhi. (2014). Balance and energy efficiency analysis for energy generation in sets of internal combustion engines that use biogas.

Lydia Stougie, Georgios A. Tsalidis, Hedzer J. van der Kooi, Gijbert Korevaar. (2017). Evaluation of the environmental and exergetic sustainability of energy generation from biomass.

Pedro Cruzab; Zaira Navas. (2018). Exergy analysis of hydrogen production via biogas dry reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11688-11695.

Rajendran et al. (2014). A novel process simulation model (PSM) for anaerobic digestion using Aspen Plus. *Bioresource Technology*, 7-13.

Rajendran et al. (2013). A Novel Process Simulation Model (PSM) for Anaerobic Digestion Using. *Bioresource Technology*.

RezaBarati, M. (2017). Comprehensive exergy analysis of a gas engine-equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*, 743-763.

Samir Meramo-Hurtado, et al. (2018). Exergy Analysis of Bioethanol Production from Rice Residues. *Contemporary Engineering Sciences*, 467-474.

Sarker. (2020). Exploración de datos potenciales de biogás de estiércol de ganado y torta de olivo para obtener información sobre la producción a escala comercial y agrícola.

Salvador Carlos Hernández, Edgar N Sanchez, Jean François Béteau, Lordes Díaz Jiménez. (2014). Análisis de un Proceso de Tratamiento de Efluentes para Producción de Metano.

Seyed Mohammad Safieddin Ardebili. (2020). Green electricity generation potential from biogas produced by anaerobic digestion of farm animal waste and agricultural residues in Iran.

Shubhra Singh, N. Hariteja, Shilpi Sharma, N. Janardhana Raju, TJ Renuka Prasad. (2021). Biogas production from human feces mixed with co-substrate poultry litter and cow manure.

Serrano, R. (2011). *Biogas Process Simulation*. Syddansk Universitet. Obtenido de Biogas Process Simulation.

Suárez, V., & López, I. (2019). ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE PROCESOS. *Revista Centro Azucar*.

Varnero, M. (2011). *MANUAL DE BIOGÁS*. Chile.

Wei Qiao, Xiuyi Yan, Junhui Ye, Yifei Sun, Wei Wang, Zhongzhi Zhang. (2011). Evaluation of biogas production from different biomass residues with / without hydrothermal pretreatment.

Y. Zheng, J. Zhao, F. Xu, Y. Li. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Prog Energy Combust Sci*, 35-53.