

*Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”
Facultad de Ciencias Técnicas*



***ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DE UN SISTEMA DE CODIGESTIÓN DE
BIOMASA***

Trabajo de Diploma en Ingeniería Mecánica

Autor: Omar Pérez Ysusi

Tutor: Dr.C. Roberto Vizcón Toledo

Matanzas, 2018

DEDICATORIA

A mi familia por todo el apoyo que me ha brindado durante estos 5 años de estudio. En especial, a mi abuela, por siempre inculcarme la necesidad de esforzarme y de superarme en todos los aspectos de la vida.

A mi novia por su cariño, apoyo y comprensión.

A mis amigos, por no olvidarse de mí aun cuando casi no podíamos vernos.

A mis compañeros de estudio.

A la Universidad y a su claustro de profesores, por hacer de mí un buen profesional.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, el profesor Roberto Vizcón, por brindarme su ayuda, su guía y sus conocimientos.

Al profesor Florentino Sánchez Portilla, por sus explicaciones y por la información que me brindó, sin la cual, este trabajo no se hubiera realizado.

A los compañeros de la Estación Experimental de Pastos y Forrajes “Indio Hatuey” de Matanzas por la información que facilitaron.

A la profesora Marlene Oramas, por su ayuda como jefa de año.

Al CICT de la Universidad de Matanzas, en especial a la biblioteca que me acogió durante largas jornadas de estudio y de trabajo, y a su personal que siempre me apoyó en todas mis necesidades.

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaro que yo, Omar Pérez Ysusi, soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

RESUMEN

En una primera parte se investigó sobre las características y propiedades del biogás y la utilización de este como fuente de energía, además de los procesos que se realizan en la actualidad para mejorar sus propiedades combustibles y eliminar los componentes indeseados que forman la mezcla. En una segunda parte se desarrolló una metodología de cálculo que permite realizar una modelación teórica del funcionamiento de un biodigestor de cúpula fija durante el tiempo definido por el autor, el cual se basa en los trabajos de (Sánchez Portilla and Vizcón Toledo, 2017). El procedimiento desarrollado cuenta con un balance de masas, análisis exergoeconómico, análisis de ganancias económicas y de sostenibilidad, este último referido a la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera debido al aprovechamiento de los productos de la digestión. En el capítulo final de esta investigación se realizó la modelación del funcionamiento de un biodigestor real, modelo propuesto por (Pérez-Borroto Calderín, 2014) que utiliza una mezcla de desechos orgánicos compuesta por restos de comida, lodos cloacales y estiércol bovino. Se determinó la cantidad de biogás y de efluentes obtenidos de manera teórica. Se determinó la composición química de la biomasa introducida en los cálculos, la del biogás obtenido y la del efluente final. Se obtuvieron en el período de tiempo analizado 12,153 m³ de biogás y en base a su poder calorífico se determinó la eficiencia exergética del biodigestor como de un 19 %, se comparó la producción unitaria de biogás obtenida con la expresada en otras investigaciones.

Palabras claves: biogás; biodigestor anaeróbico; biofertilizantes; termoeconomía; análisis.

ABSTRACT

In the first part, the characteristics and properties of biogas and its use as an energy source were investigated, in addition to the processes that are currently carried out to improve their combustible properties and eliminate unwanted components that form the mixture. In the second part, a methodology was developed that allows a theoretical modeling of the functioning of a fixed dome biodigester during the time defined by the author, which is based on the works of (Sánchez Portilla and Vizcón Toledo, 2017). The developed procedure has a mass balance, exergoeconomic analysis, analysis of economic gains and sustainability, the latter referred to the reduction of CO₂ emissions to the atmosphere due to the use of digestion products. In the final chapter of this research, the modeling of the functioning of a real biodigester was made, a model proposed by (Pérez-Borroto Calderín, 2014) that uses a mixture of organic waste composed of food waste, sewage sludge and bovine manure. The amount of biogas and effluents obtained theoretically was determined. The chemical composition of the biomass introduced in the calculations, the biogas obtained and the final effluent were determined. In the period of time analyzed, 12,153 m³ of biogas were obtained and, based on its calorific value, the exergy efficiency of the biodigester was determined as 19%. The unit biogas production obtained was compared with that expressed in other investigations.

Keywords: biogas; anaerobic biodigester; biofertilizers; thermoeconomy; analysis.

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de contenido	
Introducción	1
Capítulo 1: Revisión Bibliográfica	5
1.1. El biogás	5
1.2. Tratamientos realizados para la purificación y mejoramiento de las propiedades del biogás	7
1.2.1. Adsorción por variación de la presión	8
1.2.2. Absorción	10
1.2.3. Separación por membrana	11
1.2.4. Separación criogénica	12
1.2.5. Separación de trazas y otros componentes presentes en el biogás	13
1.3. La digestión anaeróbica	15
1.3.1. La digestión anaeróbica de estiércol animal	15
1.3.2. La codigestión y sus ventajas	16
1.3.3. Procesos metabólicos de la digestión anaeróbica	17
1.3.4. Clasificación de los sustratos para la metanogénesis	18
1.4. Biodigestores	19
1.4.1. Definición de biodigestor	19
1.4.2. Producción de biogás	20
1.4.3. Clasificación de los biodigestores	20
1.4.4. Tipos de biodigestores	22
1.5. Consecuencias de la acumulación de desechos procedentes de la agricultura	23
1.6. Análisis medioambiental de la codigestión anaeróbica	24
1.6.1. Impacto de la energía de la biomasa sobre las condiciones climáticas	24
1.6.2. Aplicaciones del fertilizante o bioabono	25
1.7. La contribución a la sostenibilidad ambiental con el uso de biodigestores	26
1.8. Análisis de la utilización de biodigestores y la eficiencia productiva de estos en materia de obtención de biogás	27
1.9. Aplicación de la producción de biogás en Cuba	28
1.10. Análisis termoeconómico	29
1.11. Ecuaciones para el análisis termoeconómico	30
Capítulo 2: Materiales y Métodos	35
2.1. Descripción del sistema analizado	35
2.2. Idealización y división del sistema en volúmenes de control	35
2.3. Definición de las condiciones ambientales a las que está expuesto el sistema	36
2.4. Balance másico	36
2.5. Cálculo de la composición química de la biomasa, el biogás y de los efluentes obtenidos en el biodigestor	38
2.5.1. Cálculo de la composición química de la biomasa seca introducida en el biodigestor	39

2.5.2. Cálculo de la composición química de la biomasa húmeda	42
2.5.3. Cálculo del contenido de elementos químicos de la biomasa que pasan a formar parte del biogás	43
2.5.4. Cálculo de la composición química del efluente	45
2.6. Análisis energético y exergético del biodigestor	46
2.6.1. Balance de exergía	48
2.6.2. Cálculo del rendimiento exergético del biodigestor	50
2.7. Análisis del flujo de costo de producción del biogás y los biofertilizantes	50
2.8. Análisis del costo exergoeconómico del biogás.....	52
2.9. Análisis económico	54
2.9.1. Cálculo de la ganancia económica.....	55
2.9.2. Cálculo del período de recuperación de la inversión	57
2.10. Análisis de sostenibilidad.....	58
2.11. Cálculo del costo por daño ambiental.....	60
Capítulo 3: Análisis de los resultados	62
3.1. Selección del biodigestor para el análisis	62
3.2. Balance másico del biodigestor	63
3.2.1. Cálculo de la cantidad de biogás obtenido.....	63
3.2.2. Cálculo de la cantidad de biofertilizante sólido obtenido.....	64
3.2.3. Cálculo de la cantidad de biofertilizante líquido obtenido	64
3.3. Cálculo de la composición química de la biomasa, el biogás y los efluentes en el biodigestor	65
3.4. Análisis exergético del biodigestor	66
3.4.1. Cálculo de la exergía que entra al biodigestor proveniente de la biomasa	67
3.4.2. Cálculo de la exergía útil	68
3.4.3. Cálculo de la exergía destruida y perdida.....	68
3.4.4. Cálculo del rendimiento exergético del biodigestor	68
3.5. Análisis del flujo de costo de producción del biogás y los biofertilizantes	69
3.5.1. Cálculo del flujo de costo de inversión.....	69
3.5.2. Cálculo del flujo de costo por utilización de agua.....	70
3.5.3. Cálculo del flujo de costo de la biomasa	70
3.5.4. Cálculo del flujo de costo de producción del biogás y los biofertilizantes.....	71
3.6. Análisis del costo exergoeconómico del biogás producido	71
3.6.1. Cálculo del costo exergoeconómico de inversión.....	71
3.6.2. Cálculo del costo exergoeconómico del agua.....	72
3.6.3. Cálculo del costo exergoeconómico de la biomasa	72
3.6.4. Cálculo del costo exergoeconómico de producción del biogás	72
3.7. Análisis económico del biodigestor	74
3.7.1. Costo del biogás obtenido debido a la sustitución del combustible diésel	74
3.7.2. Costo del biofertilizante sólido obtenido según el precio de 1kg en el mercado agropecuario.....	74
3.7.3. Costo del biofertilizante líquido obtenido según el precio de 1L en el mercado agropecuario.....	75
3.7.4. Costo del agua utilizada en el biodigestor	75

3.7.5. Costo de la biomasa empleada por concepto de combustible utilizado para el transporte.....	75
3.8. Cálculo del período de recuperación de la inversión.....	76
3.9. Análisis de sostenibilidad del biodigestor.....	77
3.9.1. Cálculo de la reducción de emisiones de CO ₂ a la atmósfera.....	77
3.9.2. Cálculo del costo por daño al medio ambiente.....	78
Conclusiones.....	81
Recomendaciones.....	83
Referencias Bibliográficas.....	84
ANEXOS.....	87

INTRODUCCIÓN

Según estudios realizados por la **IEA** (*International Energy Agency*) en 2017 la demanda energética a nivel global aumentó en un 2,1% respecto al año anterior, mientras que la emisión de CO₂ relacionada con el consumo de esta energía se incrementó en un 1,4% alcanzando un pico histórico de 32,5 GT (gigatoneladas). Se podría afirmar que el mundo se encuentra en la última fase del largo período de crecimiento y desarrollo que se inicia con el descubrimiento del petróleo, y que se está ante un punto de inflexión. (Starr et al., 2015)

La disminución de las reservas de combustibles fósiles ha provocado que las naciones que precisan altos niveles energéticos para la industria y el transporte hayan comenzado a obtener combustibles mediante la siembra de algunas gramíneas y otros vegetales pequeños, haciendo necesaria la deforestación de grandes territorios para extender los cultivos. Además de esto, la sobreexplotación del ambiente ha llegado a tal grado que el entorno y la naturaleza del planeta están gravemente comprometidos. Por esta razón es de vital importancia buscar tecnologías comprometidas y amigables con el medio ambiente, haciendo uso de las fuentes renovables de energía, que favorecen el impacto ambiental. (Sánchez Portilla and Vizcón Toledo, 2017)

El tratamiento de los desechos orgánicos producidos por la actividad del hombre permite eliminar, en primer lugar, el riesgo sanitario que representa el almacenar en tiraderos y lagunas de oxidación al aire libre esos residuales que están formados principalmente por restos de comida, lodos cloacales, estiércol de ganado, de aves de corral, restos de materia vegetal y algunos residuales orgánicos provenientes de la industria. (Sánchez Portilla and Vizcón Toledo, 2017)

Como bien es sabido, nuestro planeta se encuentra en un proceso de cambio climático debido al calentamiento global, pero no todos conocen que una buena parte de este fenómeno es causado por la cría a gran escala de ganado para el consumo humano. Este ganado genera una gran cantidad de estiércol, el cual al no poseer un correcto tratamiento

libera durante su descomposición gas metano, que es 21 veces más perjudicial para la atmósfera que el CO₂.

A partir del tratamiento anaeróbico de los desechos orgánicos se eliminan los organismos patógenos que se encuentran en los residuales y se remueven de manera natural la DQO (demanda química de oxígeno) produciendo biogás como combustible como potencial para utilizarse en la generación de energía térmica e incluso eléctrica. Este biogás posee una gran parte de metano en su composición y este al utilizarse para la combustión, no se emite a la atmósfera sino que se transforma luego de la combustión, junto con el oxígeno del aire, en CO₂. Este dióxido de carbono emitido no es tan peligroso como el que emiten los combustibles fósiles durante su utilización debido a que el primero ya formaba parte de la concentración existente en la naturaleza, cosa que no sucede con los hidrocarburos ya que son extraídos directamente de las profundidades de la tierra.

Además de esto, con el tratamiento anaeróbico se producen dos residuales (uno líquido rico en nitrógeno amoniacal y otro sólido rico en metano y macronutrientes) con grandes potencialidades como abonos para la agricultura y sin los requerimientos de energía, de materia prima y de impacto ambiental producidos por la industria de los fertilizantes. (Sánchez Portilla and Vizcón Toledo, 2017)

La digestión anaeróbica de desechos orgánicos es una tecnología que ha evolucionado de forma tal que se usan nuevos tipos de desechos y combinaciones de estos. Así se ha encontrado que la codigestión de varios materiales a menudo produce una cantidad mayor de metano que si cada material se digiere por separado. Esto indica que manteniendo una buena relación C:N entre diferentes sustratos, aumenta la producción promedio de biogás por unidad de materia orgánica introducida dentro del biodigestor. Sin embargo, la producción de metano no viene sola: otros gases como el CO₂, el nitrógeno, el sulfuro de hidrógeno y los siloxanos están presentes y forman parte de lo que se conoce como biogás. (Starr et al., 2015)

Para que el biogás sea un adecuado sustituto del gas natural, necesita ser purificado o mejorado mediante un incremento de la concentración de metano debido a la eliminación de CO₂. Debido a la enorme cantidad de desechos orgánicos que se producen en la

actualidad, vale la pena investigar el potencial del biometano como un posible combustible para el futuro. (Starr et al., 2015)

PROBLEMA CIENTÍFICO

¿Es posible mediante la realización de un análisis termoeconómico conocer el potencial productivo de un biodigestor anaeróbico rectangular de cúpula fija si se conocen sus dimensiones, la composición de la biomasa introducida y las condiciones del medio circundante?

HIPÓTESIS CIENTÍFICA

La realización de un análisis termoeconómico permite conocer en teoría cuál es la producción de un biodigestor anaeróbico rectangular de cúpula fija y posibilita, mediante un conjunto de cálculos, saber cuál es la eficiencia exergética del sistema y la factibilidad económica de su implementación.

OBJETIVO GENERAL

- ❖ Realizar un análisis termoeconómico y de sostenibilidad ambiental de un biodigestor anaeróbico rectangular de cúpula fija.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Investigar cómo se comporta en la actualidad del uso y desarrollo de las tecnologías del biogás.
- ❖ Desarrollar un método de análisis que incluya cálculos exergéticos y exergoeconómicos y de ganancias para su aplicación en la valoración de productividad y factibilidad de implementación de un biodigestor anaeróbico.

- ❖ Realizar una valoración de las ventajas de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos para el medio ambiente y un análisis de sostenibilidad ambiental del biodigestor.
- ❖ Investigar acerca de los provechos económicos de un bodigestor anaeróbico desde el punto de vista de la sustitución de combustibles fósiles por biogás y de los fertilizantes industriales por los efluentes de la digestión.
- ❖ Determinar la producción de biogás de un biodigestor anaeróbico y su posible utilización como fuente de energía.
- ❖ Hallar el rendimiento exergético de un biodigestor anaeróbico.

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. El biogás

El biogás es el producto de un proceso biológico conocido como digestión anaeróbica (DA). El biogás está compuesto principalmente por metano (CH_4) en una concentración que oscila entre 50...70% del volumen total de la mezcla, mientras que el dióxido de carbono (CO_2) se encuentra en una concentración que va desde 30...50%. El contenido relativo del metano y del dióxido de carbono en el biogás depende principalmente de la naturaleza del sustrato y del PH existente en el reactor. (Angelidaki et al., 2018)

Además de estos dos gases, el biogás contiene adicionalmente una menor concentración de otros compuestos químicos, como nitrógeno (N_2) en concentraciones de hasta un 3%, vapor de agua (H_2O) que puede presentarse en concentraciones de 5...10%, oxígeno (O_2) el cual puede llegar a ocupar hasta un 1% del volumen de la mezcla. Dicho gas entra en el proceso proveniente de la afluencia del sustrato o de filtraciones, además también está presente en la mezcla el sulfuro de hidrógeno (H_2S) en concentraciones que van desde 0...10 000ppmv y el amonio (NH_3) que se origina por la hidrólisis de la materia proteica u orina. Por último encontramos presencia de hidrocarburos en concentraciones de 0...200mg/m⁻³ y de siloxanos en concentraciones de 0...41mg/m³, este último se origina por la entrada a la mezcla de desperdicios provenientes de la industria médica y cosmética. (Angelidaki et al., 2018)

Generalmente el valor calorífico del biogás es de aproximadamente 21,5MJ/m³, mientras que el del gas natural es de 35,8MJ/m³. La diferencia entre los valores caloríficos de estas dos sustancias es amplia debido a la existencia de una parte no combustible del biogás, la cual contiene en su mayoría CO_2 . Debido al alto volumen de CO_2 hay una reducción en el valor calorífico del gas, la cual viene acompañada de un incremento del costo de compresión y de transportación, limitando la factibilidad económica del biogás para la generación de energía. De igual forma, otros contaminantes en el biogás causan un efecto negativo en los equipos que trabajan bajo flujo, provocando corrosión en bombas, tuberías de calderas y chimeneas de acero. (Angelidaki et al., 2018)

También la presencia de siloxanos en el biogás, incluso en mínimas concentraciones, se asocia con problemas. Es bien conocido que durante la combustión los óxidos de silicón generan residuos pegajosos, los cuales se depositan en el interior de los quemadores de biogás y en las válvulas, causando un mal funcionamiento de ambas. Hoy en día existen diferentes tratamientos que tienen como objetivo remover los componentes indeseables del biogás (Ver Anexo 1), expandiendo así su rango de aplicaciones. (Angelidaki et al., 2018)

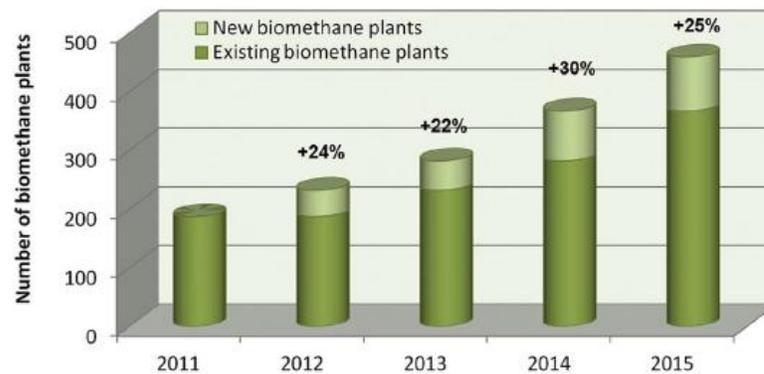


Fig. 1.1 Desarrollo de la implementación de plantas de biometano en el mundo. Tomado de la IEA Bioenergy Task 37 recogida en Hoyer et al. (2016) y en la European Biogas Association

Actualmente, el primer método de la producción del biogás es la DA. Las plantas de digestión anaeróbica (biodigestores) trabajan a temperaturas relativamente bajas, permitiéndoles a los microorganismos digerir la materia orgánica, en el interior de un reactor y en ausencia de oxígeno para producir biogás con un porcentaje de metano que oscila entre 50-60%. Un proceso similar ocurre en los vertederos donde los desechos orgánicos se descomponen y producen lo que se conoce como gas de pantano el cual posee alrededor de un 45% de metano. Este gas era anteriormente expulsado a la atmósfera incrementando así las emisiones de gases de efecto invernadero, pero en los últimos 50 años ha aumentado el aprovechamiento de estos gases como una fuente de energía. (Lambert, 2017)

Tabla 1.1 Comparación entre las propiedades del biogás y las del gas natural

Compuesto químico	Biogás	Gas natural
Metano	50...85%	83...98%
Dióxido de Carbono	15...50%	0...1,4%
Nitrógeno	0...1%	0,6...2,7%
Oxígeno	0,01...1%	--
Hidrógeno	Trazas	--
Sulfuro de Hidrógeno	Hasta 4000 ppmv	--
Amonio	Trazas	--
Etano	--	Hasta un 11%
Propano	--	Hasta un 3%
Siloxano	0...5mg/m3	--

Tomado de IEA Biomethane status and factors affecting market development and trade (Sept 2014) p.18

1.2. Tratamientos realizados para la purificación y mejoramiento de las propiedades del biogás

El biogás purificado no sólo contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero sino que además ofrece grandes beneficios medioambientales. El biogás mejorado emite menos hidrocarburos, óxidos nitrosos y monóxido de carbono, y puede llegar a compararse con la gasolina o el diésel. (Sahota et al., 2018)

Las tecnologías actualmente desarrolladas y disponibles a escala industrial para el mejoramiento del biogás incluyen los siguientes procesos: adsorción, absorción (química y física), separación por membrana y criogenización. Estas tecnologías son usadas primeramente para la separación del CO₂, mientras que el paso de mejoramiento es requerido para reducir las altas concentraciones de contaminantes como los siloxanos y el H₂S. (Ullah Khan, 2017)

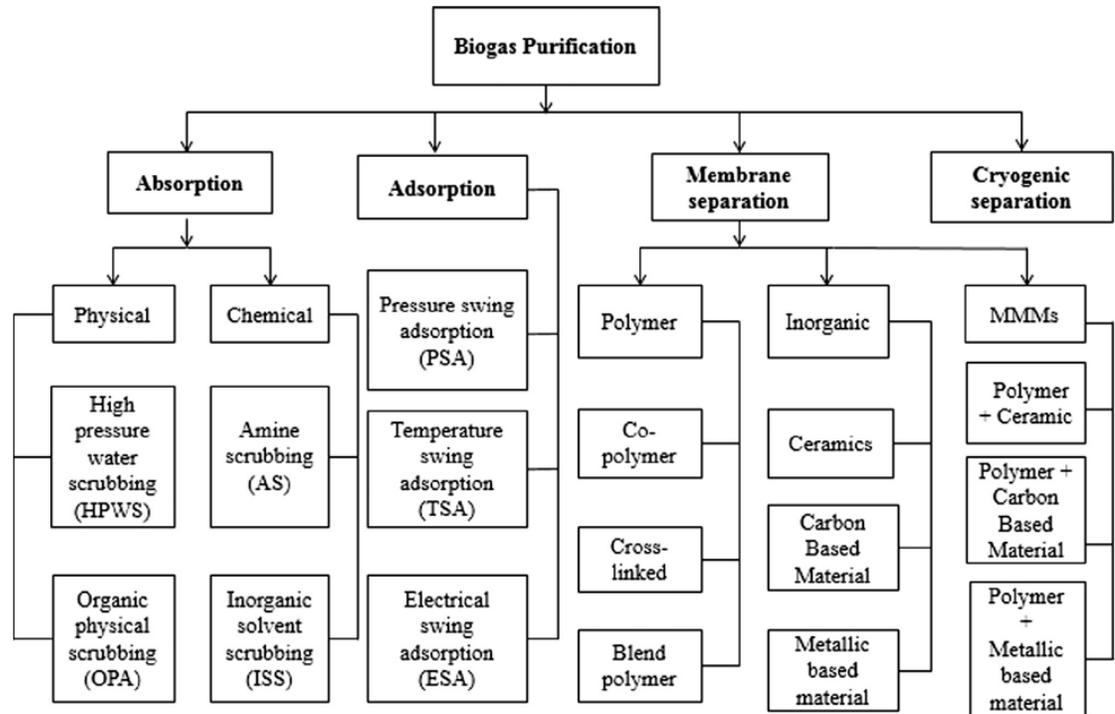


Figura 1.2 Tecnologías de purificación y mejoramiento del biogás. Tomado de Energy Conversion and Management 150 (2017)

1.2.1. Adsorción por variación de la presión

La adsorción es un fenómeno superficial que incluye el enlace o la adhesión selectiva de uno o más componentes de una mezcla sobre una superficie sólida microporosa, que preferiblemente posea un área de contacto por unidad de masa muy extensa. Dependiendo de las fuerzas actuantes el proceso se clasifica como adsorción física y adsorción química. En la adsorción física actúan fuerzas de *Van der Waals*, de pequeña magnitud, entre la sustancia adsorbida y el adsorbente. Por lo tanto, mediante un aumento o disminución de la presión, este proceso puede revertirse con facilidad. En comparación, en la adsorción química se forman enlaces químicos muy fuertes, conocidos como *Langmuir*, entre la sustancia adsorbida y el adsorbente. Este tipo de enlace es muy difícil de revertir. Durante la adsorción por variación de la presión, algunos gases indeseables como el CO_2 son separados del biogás bajo una presión elevada usando materiales adsorbentes. (Sahota et al., 2018)

Carbotech, Acroma, Cirmac, Gasrec, Xebec Inc. y Guild Associates son compañías reconocidas mundialmente, las cuales desarrollan y comercializan esta tecnología a pequeña y a gran escala. En el proceso de adsorción por variación de la presión, que en próximas menciones abreviaremos como PSA (*Pressure Swing Adsorption*) por sus siglas en inglés, la eliminación del H₂S gaseoso es un paso primordial debido a que es considerado como tóxico para el proceso de la combustión. La adsorción de este compuesto es irreversible. (Ullah Khan, 2017)

En este proceso las concentraciones de CH₄ pueden llegar al orden de los 95-99%. Sin embargo esta tecnología necesita un extenso proceso de control y requiere grandes inversiones y un alto costo operacional. Además, las impurezas en el flujo de biogás puro afectan la eficiencia del proceso. Para reducir las pérdidas de metano en el gas despresurizado, el sistema debe estar diseñado de forma que este gas recircule durante todo el proceso de adsorción. (Ullah Khan, 2017)

La adsorción por variación de la temperatura o TSA (*Temperature Swing Adsorption*) y la adsorción por variación de la corriente eléctrica o ESA (*Electricity Swing Adsorption*) por sus siglas en inglés, son otros ejemplos de procesos de adsorción para el mejoramiento del biogás. La TSA requiere energía térmica para regenerar el material adsorbente, mientras que la PSA utiliza la energía aportada por la compresión del gas. Es por esta razón que la TSA puede ser una mejor opción si se encuentra disponible una fuente de energía más económica. (Ullah Khan, 2017)

En la ESA la regeneración se lleva a cabo haciendo pasar una corriente eléctrica a través del adsorbente saturado y así el calor generado por el efecto *Joule* facilita la extracción del CO₂. Aun cuando este proceso posee el potencial de reducir el costo de eliminación del CO₂ comparado con la TSA y la PSA, se requiere conductividad eléctrica para el uso de los adsorbentes. El carbón activado ha sido desarrollado como un nuevo tipo de semiconductor adsorbente con una superficie extensa y un gran volumen de microporos. (Ullah Khan, 2017)

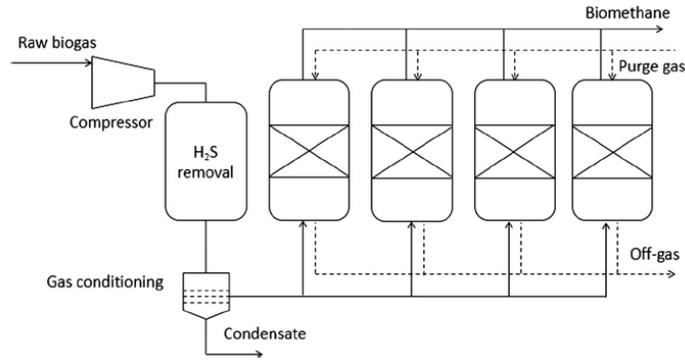


Fig. 1.3 Diagrama de flujo del proceso de adsorción por variación de la presión.
Tomado de *Energy Conversion and Management 150* (2017)

1.2.2 Absorción

La absorción es un fenómeno físico-químico, en el cual los componentes de la fase gaseosa se difunden en líquido haciéndolos pasar a través de una región interfacial. La selección de los solventes más indicados es el paso más importante en el proceso de absorción. Además de esto, factores como la disponibilidad, la no contaminación hacia el medio ambiente, la volatilidad y el costo de operación juegan un papel decisivo en el proceso de absorción. (Sahota et al., 2018)

La absorción depende de la solubilidad de varios componentes en el solvente líquido. El biogás puro se encuentra en un flujo continuo de líquido en una columna, la cual se encuentra rellena con una empaquetadura de algún material para incrementar el área de contacto entre el líquido y el gas. Durante el mejoramiento del biogás, el CO_2 es más soluble que el CH_4 en líquido, por lo que el gas que abandona la columna posee una alta concentración de CH_4 mientras que el líquido incrementa su concentración de CO_2 . La depuración por agua a alta presión o HPWS (*High Pressure Water Scrubbing*) y la depuración orgánica física u OPS (*Organic Physical Scrubbing*) por sus siglas en inglés, son también ejemplos de absorción física, mientras que la depuración por solvente inorgánico (ISS) y la depuración por aminas (AS) son ejemplos de absorción química. (Ullah Khan, 2017)

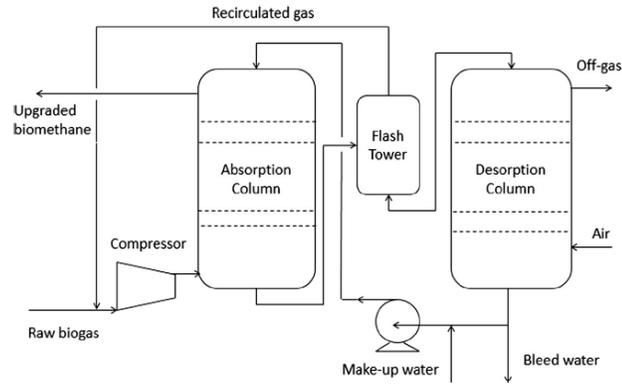


Fig. 1.4 Diagrama de flujo del proceso de depuración por agua a alta presión. Tomado de Energy Conversion and Management 150 (2017)

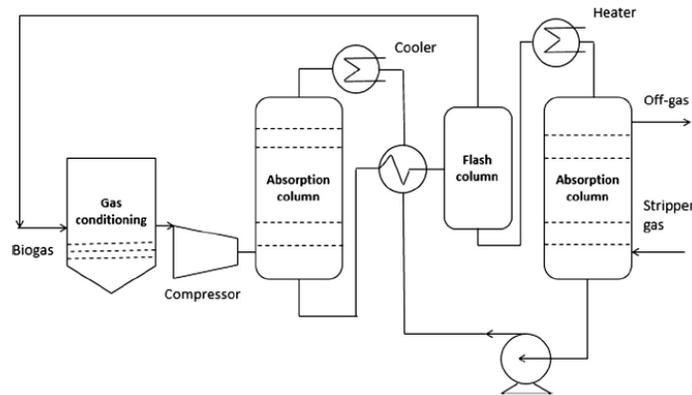


Fig. 1.5 Diagrama de flujo del proceso de depuración orgánica física. Tomado de Energy Conversion and Management 150 (2017)

1.2.3 Separación por membrana

Durante los últimos 40 años el proceso de separación de gas mediante membrana se ha convertido en una parte importante de la cuota existente en el mercado. La membrana actúa como una barrera permeable que le permite a determinados componentes, presentes en el biogás, pasar a través de ella y además posibilita controlar su permeabilidad mediante la aplicación de fuerzas de conducción obtenidas por: diferencia de concentración de presión, diferencia de temperaturas y diferencias de cargas eléctricas. Las membranas más usadas son las poliméricas, las inorgánicas y las de matriz mixta. (Ullah Khan, 2017)

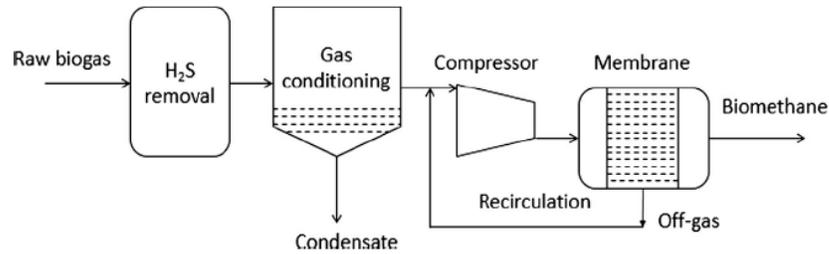


Fig. 1.6 Diagrama de flujo del proceso de separación por membrana. Tomado de Energy Conversion and Management 150 (2017)

1.2.4 Separación criogénica

Este proceso se basa en la disminución gradual de la temperatura del biogás para separar el CH_4 líquido de otros componentes entre los que se incluye el CO_2 y así obtener un producto en concordancia con las normas de calidad del Gas Licuado Natural o *Liquefied Natural Gas* (LNG), como se conoce internacionalmente. A pesar de los resultados esperados, el proceso de separación por criogenización se encuentra aún en desarrollo y sólo algunos de sus beneficios se obtienen actualmente a escala comercial. Los altos costos de inversión y de operación, las fugas de CH_4 y los problemas prácticos (como la obstrucción o "clogging") derivados del incremento de las concentraciones de CO_2 sólidos, o la presencia del resto de las impurezas, limitan el establecimiento y desarrollo de esta técnica. (Angelidaki et al., 2018)

Las condiciones de operación necesarias para llevar a cabo este proceso se mantienen utilizando una serie de compresores e intercambiadores de calor. El principal inconveniente de este proceso es el uso de diferentes equipos, principalmente turbinas, intercambiadores de calor, columnas de destilación y compresores, los cuales aumentan el costo monetario y operacional, además de requerir grandes niveles de energía. (Ullah Khan, 2017)

Generalmente el proceso de criogenización involucra 4 pasos. En el primero, la humedad, H_2S , partículas de polvo, halógenos, siloxanos y otros compuestos indeseables son removidos del biogás puro. En el segundo paso, el biogás es comprimido hasta 1 000 kPa y después es enfriado hasta -25°C . En el tercer paso, el biogás es enfriado hasta -55°C y

el CO₂ que ha pasado a estado líquido es removido de la mezcla. Finalmente, el flujo de gas restante es enfriado mucho más hasta -85°C donde el CO₂ toma un estado sólido y es retirado. El gas purificado se descomprime y puede ser utilizado en muchas aplicaciones. La separación criogénica es muy útil si se desea obtener biometano líquido o gas natural líquido. (Ullah Khan, 2017)

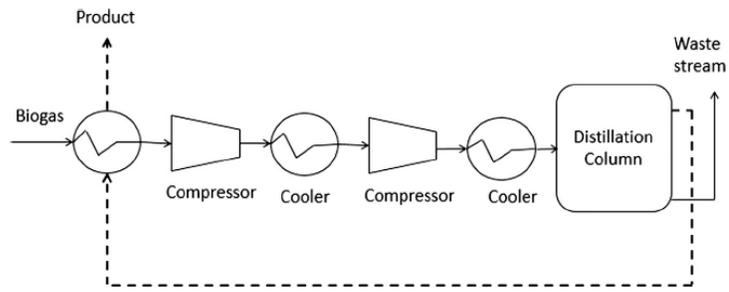


Fig. 1.7 Diagrama de flujo del proceso de separación criogénica. Tomado de Energy Conversion and Management 150 (2017)

1.2.5 Separación de trazas y otros componentes presentes en el biogás

El CH₄ y el CO₂ son los compuestos que se encuentran con mayor concentración en el biogás, pero este contiene además compuestos sulfurosos entre los que se incluye el H₂S, compuestos halogenados, siloxanos, agua, amonio y otros compuestos orgánicos volátiles en forma de trazas. Los efectos que producen las trazas de impurezas se muestran en la tabla siguiente. (Ullah Khan, 2017)

Tabla 1.2 Impurezas presentes en el biogás y sus efectos

Impurities	Impact
H ₂ O	Corrosion in compressors, gas storage tanks and engines due to reaction with H ₂ S, NH ₃ , and CO ₂ to form acids Accumulation of water in pipes Condensation or freezing due to high pressure
H ₂ S	SO ₂ and SO ₃ are formed due to combustion, which are more toxic than H ₂ S and cause corrosion with water
CO ₂	Reduction in calorific value
NH ₃	Corrosive when dissolves in water leads to an increase in antiknock properties of engines; causes formation of NO _x
O ₂ /air	Explosive mixtures due to high concentrations of O ₂ in biogas
Cl ⁻¹	Corrosion in combustion engines
F ⁻¹	Corrosion in combustion engines
Dust	Clogging due to deposition in compressors and gas storage tanks
Hydrocarbons	Corrosion in engines due to combustion
Siloxanes	Formation of SiO ₂ and microcrystalline quartz due to combustion; deposition at spark plugs, valves, and cylinder heads abrading the surface

Tomado de Energy Conversion and Management 150 (2017)

La humedad en el biogás no es recomendable y necesita ser eliminada para su correcta utilización debido a que causa serios daños por corrosión en los equipos y por ello se reducen seriamente los beneficios del uso del biogás. El secado del biogás se realiza mediante su condensación y adsorción por gel de sílice, carbón activado u óxido de aluminio. La eliminación del H₂S es crucial en todos los procesos de mejoramiento del biogás debido a que este compuesto provoca corrosión en las tuberías y en los equipos. El proceso antes mencionado es efectivo generalmente cuando existe una alta concentración de sulfuro en el biogás. (Ullah Khan, 2017)

Los siloxanos provienen de algunos productos industriales como champús, textiles, detergentes, etc. El método más común utilizado para su eliminación es la adsorción en carbón activado. Con un fregado mediante agua es posible remover de la mezcla del biogás, compuestos halogenados solubles en esta, compuestos sulfúricos y el amonio. En la literatura está reconocido el proceso de separación por membrana, el cual está basado en el principio de la permeabilidad de los siloxanos por solución y difusión a través de una membrana de material polimérico denso. (Ullah Khan, 2017)

Tabla 1.3 Tratamientos y métodos de eliminación del H₂S y el H₂O

H ₂ S pretreatment methods	H ₂ O removal methods
Air/O ₂ dosing to biogas reactor	Condensation
Iron sponge	Demister
Iron oxide	Cyclone
Iron chloride dosing to digester slurry	Moisture trap
Air stripping and recovery	Adsorption dryer
Biological removal on a filter bed	Silica
Membranes	Aluminium
Adsorption on activated carbon	Physical absorption with glycol
Physical and chemical absorption	Absorption with hygroscopic salts
Zinc oxide sorbents	

Tomado de Energy Conversion and Management 150 (2017)

De todas maneras, debido al alto costo de inversión y a los moderados costos de operación, esta tecnología no cumple con sus objetivos. La razón más probable es que aún no han sido probadas un gran número de impurezas en el proceso de separación por membrana y por ende, estos contaminantes pueden provocar efectos adversos en el proceso de separación y en la estabilidad de la misma membrana. (Ullah Khan, 2017)

1.3. La digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso bioquímico acompañado por la acción combinada de un grupo de microorganismos, los cuales metabolizan los compuestos orgánicos en una mezcla gaseosa consistente principalmente en metano y dióxido de carbono (biogás) en condiciones anaeróbicas. (Luque et al., 2016) Este proceso es en muchos aspectos, idóneo para el tratamiento de residuos, además el biogás posee un potencial energético considerable y se obtiene además un efluente con una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) con un alto valor fertilizante. (Pagés Díaz, 2012)

1.3.1. La digestión anaeróbica de estiércol animal

La digestión anaeróbica de estiércol animal es la principal fuente de conversión de residuos orgánicos en dos categorías de productos útiles: por una parte se encuentra el biogás, una fuente de energía renovable empleada para producir electricidad verde, calor

o como combustible para vehículos; por otro lado, los sustratos que se obtienen luego de la digestión anaeróbica son utilizados como fertilizantes en la agricultura. Estos sustratos pueden además, para un mayor aprovechamiento, ser refinados para obtener fertilizantes concentrados, productos de fibra y agua limpia, todos adecuados para un posterior reciclaje. (Holm-Nielsen et al., 2008)

La codigestión de estiércol animal con distintos tipos de sustratos incrementa el campo de aplicación del biogás y ofrece un número de ventajas para la gestión del estiércol y los desechos orgánicos, así como para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero (Ver Anexo 2). La codigestión anaeróbica de estiércol y desechos orgánicos provenientes de la industria alimenticia posee una significancia importante para la economía en conjunto de las plantas de biogás y por razones socioeconómicas. (Holm-Nielsen et al., 2008)

1.3.2. La codigestión y sus ventajas

Para maximizar la producción de biogás, muchos digestores en Europa y Estados Unidos realizan un proceso denominado codigestión que incluye elementos como desechos de la industria de alimentos y otros desechos orgánicos e incluso cultivos especialmente destinados a la biodigestión. La codigestión representa una excelente oportunidad para ayudar a una producción basal de biogás por parte de los digestores, además de aumentar la producción de biogás en general. La principal ventaja de la codigestión radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. Este efecto puede deberse a un aumento de la biomasa activa, resultando en una mayor resistencia a fenómenos de inhibición. También las partes inorgánicas de algunos de estos cosustratos, como es el caso de las arcillas y los compuestos de hierro, han mostrado un efecto positivo frente a los procesos de inhibición por amonio o ácido sulfhídrico. De esta manera, los sustratos susceptibles de usar en un sistema de codigestión anaerobia podemos clasificarlos en:

- Residuos de origen animal: Purín de vacunos, cerdos, pavos, pollos, etc., camas de aves, desechos de matadero (sangre, vísceras), desperdicios de pesca, restos de lana y cuero, desechos de establos (estiércol, orina y paja).

- Residuos de cosechas: rastrojo, ensilaje y grano de maíz u otros cultivos, malezas, paja, maloja de caña de azúcar.
- Residuos agroindustriales: tortas de oleaginosas, bagazo, salvado de arroz, desechos de tabaco, semillas, desperdicios de procesamiento de hortalizas y frutas, residuos de té, etc.
- Residuos forestales: pequeñas ramas, hojas, corteza.
- Plantas acuáticas: camalote, algas marinas.

1.3.3. Procesos metabólicos de la digestión anaeróbica

Los procesos metabólicos importantes en la digestión anaeróbica de la materia orgánica son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. (Tay León, 2017)

❖ Hidrólisis

Es teóricamente la primera etapa de la digestión anaerobia, donde se produce la ruptura de macromoléculas orgánicas formadas por carbohidratos, proteínas y grasas hasta subunidades pequeñas que puedan atravesar la pared celular. Así las proteínas son degradadas a aminoácidos, los polisacáridos a monómeros de azúcares y las grasas a polioles y ácidos grasos de cadena larga. La hidrólisis se produce por la acción de exoenzimas secretadas por las bacterias de la microbiota acidogénica. (Pagés Díaz, 2012)

❖ Acidogénesis

Los compuestos resultantes de la etapa hidrolítica, son fermentados por los microorganismos acidogénicos produciéndose principalmente ácidos grasos de cadena larga, alcoholes y compuestos aromáticos; estos compuestos pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas. Los productos finales de esta etapa, dependen del sustrato inicial, de las condiciones ambientales y del contenido de hidrógeno, que si es bajo favorece la producción de acetato, dióxido de carbono e hidrógeno y si es alto ocurre la formación de propionatos y otros ácidos orgánicos, lactato y etanol. (Pérez-Borroto Calderín, 2014)

❖ Acetogénesis

En la tercera etapa, los ácidos grasos y los alcoholes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. A su vez el metanol, los ácidos propiónicos y butíricos son transformados en ácido acético por las bacterias acetogénicas. (Tay León, 2017)

Las bacterias involucradas en esta etapa son las acetogénicas productoras de H₂ (*Syntrophobacter wolinii*, *Desulfovibrio*), estas catabolizan propionatos, ácidos orgánicos de cadena larga, alcoholes y compuestos aromáticos, transformándolos en H₂, CO₂, y acetato. Se producen rápidamente y no son tan sensibles a los cambios de temperatura. (Pérez-Borroto Calderín, 2014)

❖ Metanogénesis

Los estudios realizados sobre la metanogénesis han revelado que la producción biológica de metano tiene lugar a través de una serie exclusiva de reacciones de elevada complejidad en las que intervienen coenzimas especiales. La coenzima metanofurano interviene en el primer paso de la metanogénesis; contiene el anillo furanósico de cinco miembros y un átomo de nitrógeno amínico que se une al dióxido de carbono. (Cendales Ladino, 2011)

En esta etapa los microorganismos son estrictamente anaeróbicos y producen metano empleando como sustrato el ácido acético, el H₂ y el CO₂. Los microorganismos metanogénicos son considerados los más importantes dentro de los microorganismos anaeróbicos ya que intervienen en la formación del metano. Las bacterias involucradas en esta etapa son sensibles a los cambios de temperatura y de pH, es por ello que su control resulta de gran interés para obtener biogás. Se desarrollan en dos rangos de temperatura: mesofílicas (15-40°C) y termofílicas (55-65°C) y el pH ideal para su producción se encuentra en el rango 6,8...7,2. (Pérez-Borroto Calderín, 2014)

1.3.4. Clasificación de los sustratos para la metanogénesis

Los sustratos para la metanogénesis se pueden definir en función de su apariencia física, nivel de difusión, grado de concentración y características cuantitativas: porcentaje de

sólidos totales (ST), porcentaje de sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO). (Tay León, 2017)

- Los sustratos Clase I (sólidos): basura doméstica, estiércol sólido y residuos de cosecha con un 20% de ST, pueden degradarse eficientemente en digestores discontinuos o por lotes.
- Los sustratos Clase II (lodos altamente contaminados): heces de animales con un 5-10% de ST, son degradados en digestores de operación continua.
- Los sustratos Clase III (fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos): heces de animales de cría y levante diluidas con agua de lavado con $3\text{...}7\text{gL}^{-1}$ de DQO, deben tratarse en digestores de filtro anaeróbico.
- Los sustratos Clase IV (fluidos muy contaminados, con sólidos en suspensión): agua residuales de agroindustrias y aguas negras, con $5\text{...}8\text{gL}^{-1}$ de DQO y $400\text{...}500\text{gL}^{-1}$ de DQO respectivamente, deben ser degradados en digestores continuos.

1.4. Biodigestores

1.4.1. Definición de biodigestor

Un biodigestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, etc.) en determinadas disoluciones líquidas para que se descomponga, produciéndose gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio. Este sistema también puede incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás, cámaras de presión hidrostática y postramientos (filtro y piedras) a la salida del reactor. (Pérez González, 2016)

1.4.2. Producción de biogás

Inicialmente la carga (residuos orgánicos previamente recolectados y tratados) se adiciona al digestor por medio de un tanque de carga. La digestión anaerobia tiene lugar en el digestor (tanque sellado) el cual crea las condiciones ideales para que las bacterias fermenten el material orgánico en condiciones libres de oxígeno. El biogás producido es atrapado en la parte superior del digestor y es removido dejando una tubería por la cual sale el gas colectado. (Nureña Díaz et al., 2016)

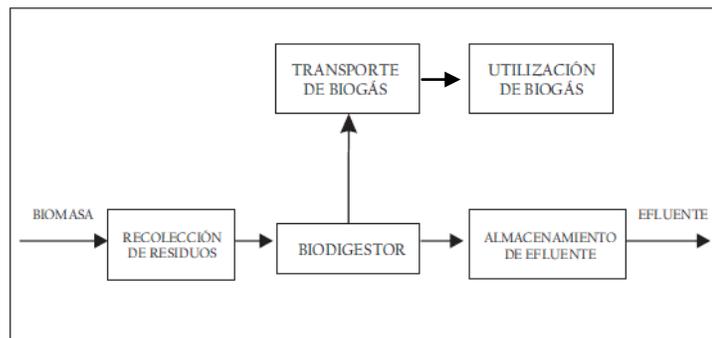


Fig. 1.8 Componentes de un sistema de biogás. Tomado de la revista “Tecnología y Desarrollo” 2016

1.4.3. Clasificación de los biodigestores

Los biodigestores se pueden clasificar principalmente por su uso en tres categorías generales, a pesar de ello, existen biodigestores más complejos donde la obtención del biogás requiere de tecnologías más avanzadas, sin embargo, solo se recomiendan para la industria ya que solo así se puede amortizar o controlar de forma eficiente el sistema, puesto que requieren de automatización y tecnología que difícilmente será aplicada en una granja o tiradero municipal. La clasificación general y que solo se tocará en este trabajo es la siguiente.

❖ Biodigestores discontinuos

Reciben carga orgánica durante un período y se capta todo el biogás que pueda ser producido por esa carga, cuando la carga se ha agotado, la cual puede variar dependiendo la carga y el tipo de materia orgánica, se abre el biodigestor de manera cuidadosa, para

evitar intoxicaciones por el remanente que pueda quedar en su interior y se prosigue a vaciar en su totalidad el biodigestor. Al vaciarlo por completo, se vuelve a cargar con una cantidad similar y se repiten los pasos de cerrado y comprobación de fugas. Así sucesivamente se utiliza este sistema. En particular este sistema muestra algunas desventajas, ya que el llenado en una sola carga representa un trabajo pesado, el abono que se obtiene debe ser posicionado en algún lugar ya previsto, pero que además, mientras se degrada la cantidad de sólidos orgánicos dentro del biodigestor, se está rezagando o acumulando una cantidad en algún lado, que puede ser un foco de infección y malos olores hasta el momento de llevarlos dentro del digestor.

❖ Biodigestores continuos

Los biodigestores son alimentados en periodos menos largos y al mismo tiempo que se alimentan por un extremo, por el otro se está evacuando la sustancia ya digerida en forma de biofertilizantes. Estos sistemas son más comunes y son los más recomendados ya que no representan una carga para su llenado, el llenado puede ser diario, cada tercer día, alternado varios días o por semana. Las ventajas de estos sistemas es que no se almacena sustancia sólida orgánica en lugares donde puedan representar un problema de infección o malos olores.

❖ Biodigestores permanentes

Se trata de biodigestores que funcionan una sola vez y después dejan de serlo, un ejemplo de estos, son los rellenos sanitarios, ya que un relleno sanitario es un tiradero de basura sólo que de forma ordenada y que va siendo cubierto en estratos donde queda atrapada la materia orgánica entre otros materiales. Los materiales que se quedan atrapados sin dárseles un segundo uso son: vidrio, metales, plásticos, cartón, papel, por esta razón, los biodigestores de este tipo, no son los más recomendados como para utilizarse en la obtención de biogás, pues muchos de los materiales que se quedan en el relleno sanitario tienen un valor de venta en el mercado que podría aprovecharse como recursos para otras actividades. Además los materiales que se quedan atrapados son material de reciclaje, que poseen un valor ecológico inequívoco. Otra desventaja de este tipo de proyectos se presenta a mediano y largo plazo, ya que el material de relleno pierde volumen y por lo

tanto se presentan hundimientos que pueden dañar construcciones realizadas sobre su área.

1.4.4. Tipos de biodigestores

❖ Biodigestor de cúpula fija de origen chino

Se asemeja a una esfera y el gas se almacena dentro de la campana fija a presión variable, la cual se obtiene desplazando el líquido en digestión hacia una cámara llamada: cámara de hidropresión, los materiales de construcción son bloques y/o ladrillos, cemento y acero. Estos digestores se cargan de forma semicontinua: se realiza una primera carga con un material celulósico y estiércol, además del inóculo correspondiente hasta un 70% de su capacidad; luego se sigue cargando como un digestor continuo. Pasados de 120 a 180 días se descarga de forma total y se reinicia el ciclo. (Suárez, 2011)

❖ Biodigestor tubular plástico

Son construidos con materiales como el cloruro de polivinilo, polietileno, entre otros. Los componentes fundamentales de este biodigestor son: un bolso de polietileno o polivinilo, cuyo objetivo es almacenar la excreta mezclada con agua, y la instalación de determinados accesorios para propiciar el buen funcionamiento del equipo (válvulas de seguridad, tuberías y adaptadores). Estos sistemas pueden ser construidos de forma alargada o en forma de saco, son de fácil instalación, más baratos y de mayor simplicidad en el manejo y mantenimiento. Como desventajas de este tipo de biodigestor, se encuentran: su bajo tiempo de vida útil y la facilidad de sufrir roturas por acciones del hombre, los animales y las condiciones climatológicas adversas. (Pérez-Borroto Calderín, 2014)

❖ Laguna anaeróbica cubierta con polietileno de alta densidad

Es una tecnología desarrollada por el Centro de Tecnología del Biogás de Hanói, para grandes volúmenes de residuales y una gran cantidad de sólidos, con bajos costos de construcción y operación, la cual resuelve las limitaciones de las lagunas anaeróbicas descubiertas que emiten metano y la atmósfera olores desagradables y que además no

permiten recuperar el biogás. Su fondo y sus paredes pueden ser de arcilla impermeable, de bloques, de ladrillos u hormigón armado; mientras que la cubierta de Polietileno de Alta Densidad flota en la superficie de la laguna y es resistente a los rayos ultravioletas. (Suárez, 2011)

❖ Biodigestor de domo flotante de origen indio

Este biodigestor consiste en un tambor, originalmente hecho de acero, pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzada de plástico para superar el problema de la corrosión. Normalmente se construye la pared del reactor y el fondo de ladrillo, aunque a veces se utilizan refuerzos de hormigón. Se entrapa el gas producido bajo una tapa flotante que sube y cae en una guía central. La presión del gas disponible normalmente varía entre 4 y 8 centímetros de la columna de agua. El reactor se alimenta de forma semicontinua a través de una tubería de entrada. (Suárez, 2011)

❖ Biodigestor de domo de polietileno

Este tipo de planta tiene en la parte superior un digestor de bolsa en el cual se almacena gas, la entrada y salida se encuentran en la misma superficie de la bolsa. Sus ventajas son de bajo costo, fácil transportación, poca sofisticación de construcción, altas temperaturas de digestión, fácil limpieza, mantenimiento y vaciado, Sus desventajas son su corto tiempo de vida, alta receptibilidad a ser dañado. (Chacha Pumasunta and Flores Erreyes, 2017)

1.5. Consecuencias de la acumulación de desechos procedentes de la agricultura

La producción agropecuaria acarrea problemas ambientales, sociales y económicos debido a que genera desechos como: excretas de animales y restos vegetales. El vertimiento de estos desperdicios afecta el medio ambiente desde la contaminación de fuentes de agua hasta la contaminación atmosférica, con la correspondiente contribución al calentamiento global. La ubicación geográfica de ganado concentrado en tierras con bajo potencial agrícola genera altos impactos ambientales (agua, suelo y aire), debido a la mala administración y gestión de los desechos animales. (Freire Montenegro, 2018)

La disposición de residuos orgánicos sobre el entorno en grandes cantidades, produce daños irreversibles en los ecosistemas como: contaminación de los suelos, del agua superficial y subterránea, del aire, provoca daños en los animales y las plantas, la eutrofización por el exceso de carga orgánica y la contaminación por metales pesados en el suelo, que también repercute negativamente en la salud humana. La intensificación de la producción ganadera aumenta la generación de estiércol, lo cual representa una gran cantidad de nutrientes desechados y concentrados en un área pequeña. (González Rodríguez, 2015)

A nivel mundial, las actividades de producción agropecuaria emiten al menos una cuarta parte de las emisiones antropogénicas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y considerando el procesamiento y manipulación de los alimentos estas emisiones ascienden a un 1/3 del total de GEI. (Freire Montenegro, 2018)

1.6. Análisis medioambiental de la codigestión anaeróbica

La finalidad básica de este proceso es lograr reducir los parámetros físico-químico y biológicos de los residuos domésticos o agropecuarios, después de un período de tiempo en los digestores, que permitan obtener al final un efluente, cuyas características y calidad aseguren una baja o nula contaminación, medida en valores de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) bacteriológico y pueden ser dispuestos al medio ambiente sin peligro para la salud.

El uso de la bioenergía proporciona además un grado de equilibrio ecológico y cambio climático, que permite reducir la lluvia ácida, minimizar la erosión del suelo, la contaminación del agua, ofrece un mejor cuidado a los hábitats para la vida silvestre y ayudan a mantener los bosques sanos.

1.6.1. Impacto de la energía de la biomasa sobre las condiciones climáticas

El uso de combustibles fósiles durante siglos como un recurso de energía primaria ha contribuido al grave deterioro del medio ambiente a través de la liberación de cientos de millones de toneladas de gases de efecto invernadero a la atmósfera (GEI), que incluyen el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), han alterado el clima de la tierra,

afectando la Biosfera de tal manera, que probablemente la vida no vuelva a ser igual tal como la conocemos.

El uso de la energía de la biomasa puede ayudar a minimizar y quizás incluso, a invertir el efecto. Aunque el metano y dióxido de carbono son los dos más importantes contribuyentes al calentamiento global, el metano es de corta vida en la atmósfera, pero tiene un efecto perjudicial significativamente mayor (21 veces más potente) que el dióxido de carbono.

1.6.2. Aplicaciones del fertilizante o bioabono

El bioabono se caracteriza por ser rico en materia orgánica y nutrientes, usualmente contiene un 2% de nitrógeno, 1.5% de fósforo, 1.8% de potasio y otros elementos. Dichas características lo convierten en un material orgánico ideal para aplicarse en los suelos agrícolas, especialmente en aquellos donde la materia orgánica es escasa. El efluente carece prácticamente de olor debido a que las sustancias provocadoras del mal olor son reducidas casi en su totalidad en función al tiempo de retención.

Existen diferentes ventajas en el uso del bioabono producido en un biodigestor que se presentan a continuación.

❖ Efecto del efluente sobre el suelo

El efecto en los suelos de la aplicación de bioabono se traduce en una mejora significativa de su estructura y sobre todo en su fertilidad. La cantidad de humus estable se duplica con respecto al que se consigue mediante la utilización de desechos sin tratar, incrementando en forma significativa la actividad biológica del suelo.

❖ Efecto sobre los cultivos

Existen amplias evidencias del incremento en la producción de distintas especies provocada por la aplicación de efluente al suelo. En este aspecto, las cifras dependen del material orgánico de carga, del digestor, del suelo y finalmente del cultivo.

❖ Aspecto sanitario

El uso de efluente aporta indudables beneficios al reemplazar otros costosos sistemas para obtener el mismo grado de descontaminación. El tratamiento de los desechos por vía anaeróbica elimina la acumulación de estos a la intemperie, evitando la proliferación de moscas, mosquitos, otros insectos y roedores portadores de peligrosas enfermedades.

El proceso en sí mismo produce una reducción del 90% al 99% de los principales patógenos (estafilococos, salmonella, pseudo-monas). Esta ventaja importante desde el punto de vista del saneamiento está regulada por la temperatura de fermentación y la cantidad de días que permanece la biomasa dentro del digester (tiempo de retención).

1.7. La contribución a la sostenibilidad ambiental con el uso de biodigestores

Las tecnologías utilizadas para la extracción, transportación, procesamiento y combustión de los combustibles fósiles provocan contaminación ambiental y pueden causar, directa o indirectamente, efectos negativos en la economía. La excavación del carbón mineral destruye los suelos. Durante la extracción, transportación y almacenamiento del petróleo y el gas natural, pueden ocurrir derrames y fugas, lo cual puede causar la contaminación del agua y del aire. Los procesos de refinación también provocan un impacto ambiental negativo. Sin embargo, la mayor parte del daño ambiental provocado por los combustibles fósiles ocurre durante su combustión. (Veziroglu, 2002)

Los combustibles fósiles están compuestos, en su mayoría, por carbono e hidrógeno, no obstante existen en ellos compuestos altamente contaminantes los cuales son liberados a la atmósfera durante su utilización. (Veziroglu, 2002)

La contaminación del aire puede definirse como la presencia de algunos gases y partículas, los cuales no forman parte de la composición natural de la atmósfera, o poseen una concentración fuera de lo normal. La contaminación del aire provoca daños a la salud de los seres humanos y de los animales. (Veziroglu, 2002)

Utilizando estudios realizados por numerosos científicos ambientalistas, es posible determinar los daños ambientales causados por cada combustible fósil y su respectivo costo económico. Estos costos por daños no se incluyen en el precio de los combustibles

fósiles, pero son pagados por las personas, directa o indirectamente, a través de impuestos, gastos médicos, pagos de seguros, y debido a la reducción de la calidad de vida. En otras palabras, los combustibles fósiles son altamente subsidiados.

El uso de combustibles fósiles como el diésel o la gasolina crea contaminación ambiental debido a la emisión de CO₂ durante su combustión. En su trabajo, (Sánchez Portilla and Vizcón Toledo, 2017) brindan la siguiente información relacionada con la cantidad de dióxido de carbono que pueden emitir cada uno de estos combustibles.

1 litro de gasolina utilizado emite **2,3 kg de CO₂**

1 litro de diésel utilizado emite **2,6 kg de CO₂**

1.8. Análisis de la utilización de biodigestores y la eficiencia productiva de estos en materia de obtención de biogás

❖ Biodigestores anaeróbicos de bajo potencial

Desde hace décadas se ha intensificado el uso de biodigestores, sobre todo en zonas rurales por todo el mundo. Esto sucede debido a que cada vez es mayor la cantidad de desechos que se generan en sectores como la cría de ganado intensificada, y la siembra de grandes extensiones de cultivo. A continuación se recopilaron resultados obtenidos por otros autores y que permitirán determinar cuál es el rendimiento esperado de un biodigestor.

En su investigación, (Salazar Cuaila et al., 2012) propone el uso de estiércol ovino como biomasa (14 kg diarios) y agua (24 L), para ser digeridos en un biodigestor de bolsa tubular de polietileno. Luego de 30 días de funcionamiento y manteniéndose a una temperatura de 30°, se obtuvo una producción promedio diaria de 0,437 m³ de biogás. Para este caso se puede concluir que hubo una producción unitaria de **0,031 m³ de biogás** por cada kg de materia orgánica.

En otro trabajo, (Chacha Pumasunta, 2017) plantea la utilización de una mezcla diaria compuesta por 50 kg de estiércol bovino y 50 L de agua para ser usados en un biodigestor de bolsa de polietileno. Según las mediciones realizadas por el autor, diariamente se

obtiene una producción de 1,05 m³ de biogás. Esto da como resultado una producción unitaria de **0,021 m³ de biogás** por cada kg de materia orgánica.

Por otro lado, (Pérez-Borroto Calderín, 2014) propone en su investigación la utilización de un biodigestor de cúpula fija rectangular, que trabaja con una carga diaria de 15,93 kg de una mezcla entre estiércol de cerdo y de gallina y 42 L de agua. Con estas proporciones se obtiene una producción aproximada de 0,72 m³ de biogás diariamente. Esto da como resultado una producción unitaria de **0,045 m³ de biogás** por cada kg de materia orgánica.

Con los resultados obtenidos anteriormente se puede establecer, más o menos, un patrón para poder determinar la eficiencia productiva de un biodigestor anaeróbico. Tomando en cuenta las 3 producciones unitarias de biogás obtenidas en las 3 fuentes estudiadas se puede esperar que el biodigestor que se analizará en este trabajo posea una producción unitaria en el orden de los **0,032 m³ de biogás** por cada kg de materia orgánica introducida.

❖ Plantas de biogás industriales

En (Martin and Parsapour, 2012), se modela el funcionamiento de una planta de biogás industrial que recibe una carga anual de 60 000 toneladas de BSG (*Brewer's Spent Grain*) con un determinado contenido de humedad. Además de esto la planta requiere de 57 046 m³ de agua al año para su funcionamiento. Para realizar el proceso de digestión se emplea energía eléctrica, la cual alimenta un sistema de agitación mecánica y permite controlar la temperatura de la planta. Según los autores, es posible obtener una tasa de producción de biogás de 9 046 153 m³ al año. Esto quiere decir que se obtienen aproximadamente **0,151 m³ de biogás** por cada kg de BSG introducido.

1.9. Aplicación de la producción de biogás en Cuba

Uno de los procesos de investigación e innovación tecnológica que se desarrollan en el marco del proyecto "La biomasa como fuente renovable de energía para el medio rural" (BIOMAS-CUBA) está relacionado con la producción de biogás y bioabonos a partir de los efluentes de biodigestores, en fincas agroenergéticas, donde se producen alimentos o

energía, de forma integrada. Las tecnologías seleccionadas para la construcción de biodigestores anaeróbicos han sido: la cúpula fija (modelo chino), el tubular plástico o de manga de polietileno con flujo continuo (Tipo Taiwán) y la laguna anaeróbica cubierta con una geomembrana de polietileno de alta densidad. A partir de estas se construyeron o repararon -en menor medida- 69 biodigestores, en fincas campesinas de las provincias de Matanzas, Sancti Spiritus y Las Tunas, en la Estación Experimental "Indio Hatuey", en la comunidad de Montaña Magueyal (Santiago de Cuba), en un centro de producción porcina de Las Tunas y en una granja agropecuaria del Ministerio del Interior, en Jovellanos (Provincia de Matanzas). (Cepero et al., 2012)

Estos 69 biodigestores abarcaron una capacidad total de digestión de 1 665 m³ y generación de producciones de 600 060 m³ de biogás, que se utilizaron en la cocción de alimento humano y animal, la generación de electricidad y la cocción de ladrillos; así como 2 601 t de bioabonos, empleados en la mejora de la fertilidad de 1 830 ha de suelos; además permiten eliminar la contaminación provocada por excretas vacunas y porcinas en los escenarios productivos, lo cual genera un impacto ambiental positivo. Se instalaron 52 plantas de producción de bioproductos a partir de efluentes de biodigestores, enriquecidos con microorganismos nativos, los cuales se utilizan en la sanidad animal y vegetal, la nutrición de cultivos, la eliminación de malos olores en instalaciones pecuarias, la biorremediación de lagunas contaminadas con residuales orgánicos y en los filtros de biocerámicas. (Cepero et al., 2012)

1.10. Análisis termoeconómico

La preocupación creciente por el ahorro de energía ha fomentado el desarrollo de técnicas de análisis basadas en el Segundo Principio de la Termodinámica, y en particular en el concepto de exergía. El balance de exergía de una instalación nos permite localizar y cuantificar las irreversibilidades con que se desarrolla el proceso productivo, e identificar qué equipos y por qué causas, son responsables de su ineficiencia. Buena parte de los trabajos publicados sobre análisis exergético se limitan a determinar la irreversibilidad y rendimiento de la planta y de sus equipos. Esta información, aunque de gran utilidad,

resulta insuficiente. En la práctica, cuando se pretende conseguir ahorros efectivos de energía en una instalación deben considerarse los tres factores adicionales siguientes:

i) No toda irreversibilidad es evitable. Así, el ahorro técnico de exergía es siempre de menor magnitud que el ahorro termodinámico (energético). La diferencia entre ambos depende del nivel de decisión que limita el tipo de acciones a emprender (operación, mantenimiento, circuitería, proceso, etc.).

ii) Los ahorros locales de exergía que puedan conseguirse en los distintos equipos o procesos de una instalación no son equivalentes. Una disminución en la irreversibilidad local de un equipo supondrá en general una variación de magnitud diferente en el consumo de energía de la planta.

iii) Las oportunidades de ahorro solo podrán concretarse mediante un estudio concienzudo de los mecanismos fundamentales de generación de entropía. Además deberán relacionarse las posibilidades de control de dichos mecanismos con las variables libres de diseño y con el coste de inversión necesario. La consideración de estos factores, en una u otra forma, ha dado lugar a la aparición de teorías que fundamentadas en el Segundo Principio y agrupadas bajo el nombre de Termoeconomía se plantean como objetivo la asignación de costes y optimización económica de los sistemas térmicos. El objetivo de la Termoeconomía es el de sentar las bases teóricas del ahorro de energía. Para ello deberá formular criterios generales que permitan evaluar la eficiencia de los sistemas energéticos y que expliquen de manera racional cuál es el proceso de formación del coste de sus productos. (Lozano Serrano, 1997)

1.11. Ecuaciones para el análisis termoeconómico

La Termoeconomía, según lo expresado por (Valdimarsson, 2011), estudia la parte económica de la generación de energía desde el punto de vista exergético. Este análisis se basa en la existencia de flujos de exergía. La instalación analizada tendrá uno o más corrientes exergéticas de entrada (alimentación), y una o más corrientes exergéticas de salida (producto). Una corriente de alimentación es cualquier entrada hacia la instalación, mientras que una corriente de salida es cualquier producto de la instalación. La exergía se

pierde debido a las irreversibilidades que van a ocurrir en todos los componentes de la instalación. Este fenómeno se conoce como destrucción de exergía. En algunas instalaciones existe una corriente de exergía rechazada, la cual no tiene utilización en el proceso. Esta es la pérdida de exergía, y la corriente de pérdida de exergía para el componente analizado.

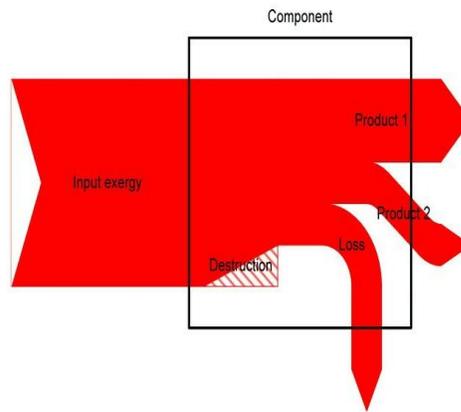


Fig. 1.9 Representación esquemática de las corrientes exergéticas. Tomado de Geothermal Training Programme

La anergía se asume como que no presenta ningún valor, así como todas las corrientes de pérdidas exergéticas y las de destrucción. El costo unitario de exergía se calcula para cada punto en el proceso de conversión de energía, y los costos de las corrientes se utilizan para obtener una visión general de los aspectos económicos del proceso de generación de energía. Cada instalación tendrá tres tipos de flujos de costos asociados, el flujo de costo de la exergía de entrada, el flujo de costo de la inversión de la instalación y el flujo de costo de la exergía del producto. Un balance de costo, iguala el flujo de costo de los productos (todos con la misma unidad de costo exergético a la suma del flujo de costo de la exergía de entrada y el flujo de costo de la inversión de la instalación.

Se debe de pagar por la compra de la instalación y por su mantenimiento. El costo asociado es fijado, y no depende de la magnitud de las corrientes de exergía de entrada y de salida de la instalación. El flujo de costo de la inversión se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{Z} = \dot{Z}_{CL} + \dot{Z}_{OM} \quad (1.1)$$

donde:

El punto encima de la variable denota la derivada con respecto al tiempo (1/s, 1/h)

c_L : subíndice que denota la inversión de capital

c_{OM} : subíndice que denota el factor de operación y mantenimiento

Z: Costo fijado (\$)

El costo exerético unitario es importante para el estudio del rendimiento de la instalación. Cada kWh de exergía de entrada y de salida en la instalación conlleva un costo (o tiene un precio), el cual puede ser comparado con el costo de la electricidad. Esta corriente exerética es entonces el producto del costo exerético unitario y del flujo exerético:

$$\begin{aligned}\dot{C}_i &= c_i \dot{X}_i = c_i (\dot{m}_i x_i) \\ \dot{C}_e &= c_e \dot{X}_e = c_e (\dot{m}_e x_e) \\ \dot{C}_w &= c_w \dot{W} \\ \dot{C}_q &= c_q \dot{X}_q\end{aligned}\tag{1.2}$$

donde:

C: Costo total (\$)

i: subíndice relativo a la alimentación o entrada

e: subíndice relativo al producto o salida

q: subíndice relativo al flujo de calor

w: subíndice relativo al trabajo o energía

c: Costo unitario (específico), precio (\$/kWh)

m: Masa (kg)

W: Trabajo (kJ, kWh)

X: Exergía (kJ, kWh)

x: Exergía específica (kJ/kg)

El flujo de costo de los productos debe ser igual a la suma de todos los flujos de costos de entrada, ambos relacionados con la exergía al igual que el flujo de costo de inversión. Este balance se escribe de la siguiente forma:

$$\sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k \quad (1.3)$$

donde:

k: Número de instalaciones

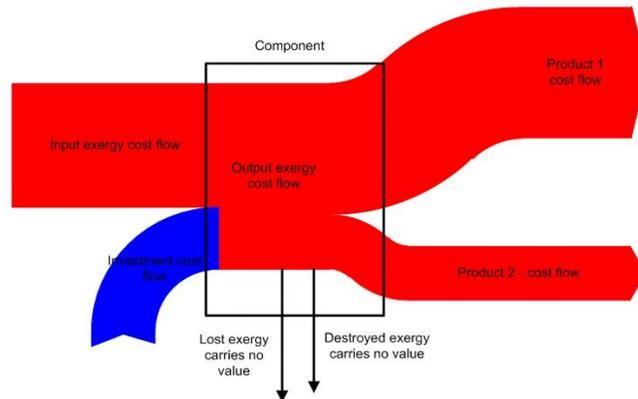


Fig. 1.10 Corrientes de costos. Tomado de Geothermal Training Programme

El flujo de costo del producto puede solucionarse desde esta ecuación, asumiendo que todos los componentes en la cadena ya han sido calculados.

La ecuación anterior se modifica de manera que incluya los valores de costo unitarios:

$$\sum_e (c_e \dot{X}_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{X}_{q,k} + \sum_i (c_i \dot{X}_i)_k + \dot{Z}_k \quad (1.4)$$

Conclusiones parciales del capítulo

Este capítulo fue redactado utilizando una amplia bibliografía siendo la mayoría de los documentos citados bastante recientes (Menos de 5 años de haber sido publicados) y muchos de ellos en idioma inglés. Se investigó en, primer lugar, acerca de lo que se conoce como biogás en el mundo de la ciencia, su composición, modo de producción y las tecnologías más utilizadas en el mundo actualmente que permiten su purificación y el mejoramiento de sus propiedades físico-químicas. Además de esto se explican en qué consiste la digestión anaeróbica de la materia orgánica y las fases por las que esta debe pasar hasta transformarse en biogás en el interior de los biodigestores.

Se estableció un patrón para poder determinar la eficiencia productiva de un biodigestor anaeróbico a partir de conocer la carga orgánica de la biomasa introducida y la producción de biogás.

Más adelante se describen los tipos de biodigestores anaeróbicos más comunes en el mundo y en nuestro país, así como se comporta la aplicación de esta tecnología en Cuba gracias al surgimiento del proyecto BIOMAS-CUBA. En otra parte del capítulo se describe cómo se realiza un análisis exergoeconómico de una instalación de digestión anaeróbica de desechos orgánicos, tema principal en la realización de esta tesis.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de análisis conlleva una serie de pasos teóricos a realizar, con los cuales puede establecerse el ámbito del análisis y las fronteras del sistema que vamos a analizar (biodigestor) así como las características de este. Luego se desarrollan una serie de cálculos y se analizan los resultados arrojados.

2.1. Descripción del sistema analizado

El sistema está formado por un biodigestor anaeróbico en el cual se modela el proceso de codigestión anaeróbica y es alimentado con materia orgánica (estiércol de vaca, desechos de comida, lodos cloacales) y agua en una proporción establecida según estudios anteriores. Luego de la codigestión de la mezcla adicionada se obtiene biogás y los efluentes (uno sólido y otro líquido) se utilizan como fertilizante para la agricultura.

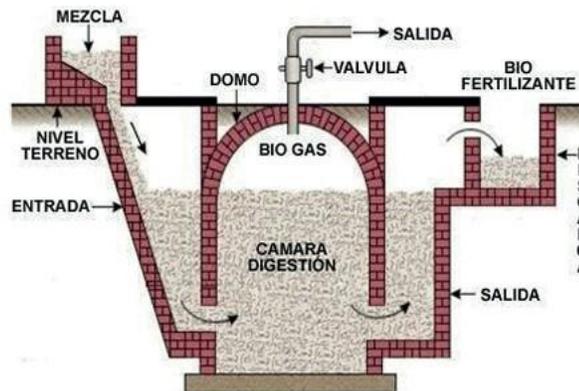


Fig 2.1 Esquema de un biodigestor anaeróbico de cúpula fija

2.2. Idealización y división del sistema en volúmenes de control

Para facilitar los cálculos se hace necesario simplificar la estructura del biodigestor de la manera que se muestra a continuación. Para esto se considerará el biodigestor como una caja negra la cual tiene un número restringido y bien definido de flujos de masa y energía que entran y salen de este. Además se considera un intercambio de energía con el medio circundante en forma de calor.

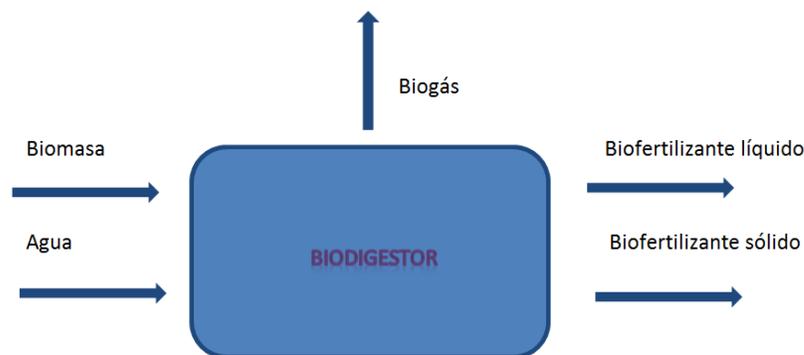


Fig 2.2 Esquema simplificado de un biodigestor

2.3. Definición de las condiciones ambientales a las que está expuesto el sistema

Para realizar los cálculos se asume que el sistema analizado se encuentra expuesto a una temperatura de 37°C y a una presión atmosférica estándar (1atm).

2.4. Balance másico

Según (Sánchez Portilla and Vizcón Toledo, 2017), 1 kg de biomasa (con un 79,7% de humedad) ofrece aproximadamente, luego de su descomposición en un biodigestor anaeróbico: 0,0254m³ de biogás (60% de CH₄ y 40% de CO₂ de composición volumétrica) y 0,06 kg de fertilizante sólido.

El producto final que se obtiene en el biodigestor y que se utiliza como fertilizante se conoce como efluente. Las características del efluente dependen mucho del tipo de sistema, pero tratando con sistemas de mezcla completa y con residuos orgánicos, se puede decir que el efluente es la mezcla del influente estabilizado y la biomasa microbiana producida. Durante el proceso anaeróbico parte de la materia orgánica se transforma en metano, por lo que el contenido en materia orgánica es menor que en el influente. Se trata, además, de un producto más mineralizado que el influente, con lo que normalmente aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuye el nitrógeno orgánico.

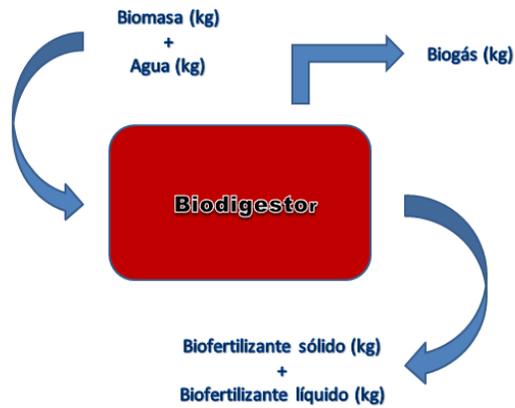


Fig. 2.3. Equilibrio másico en un biodigestor

$$m(bmh) + m(ag) = m(bg) + m(bfs) + m(bfl) \quad (2.1)$$

Donde:

$m(bmh)$: Cantidad de biomasa húmeda introducida (kg)

$m(ag)$: Cantidad de agua introducida (kg)

$m(bg)$: Cantidad de biogás producido (kg)

$m(bfs)$: Cantidad de biofertilizante sólido obtenido (kg)

$m(bfl)$: Cantidad de biofertilizante líquido obtenido (kg)

❖ Cálculo de la cantidad de biogás producido

$$V(bg) = m(bmh) \times Pu(bg) \quad (2.2)$$

A continuación se calcula la masa de los dos compuestos fundamentales presentes en el biogás (metano y dióxido de carbono) teniendo en cuenta su concentración en el volumen de biogás producido.

$$m(CH_4) = V(bg) \times fv(CH_4) \times \rho(CH_4) \quad (2.3)$$

Donde:

$m(\text{CH}_4)$: Cantidad de metano producido (kg)

$V(\text{bg})$: Volumen de biogás producido (m^3)

$f_v(\text{CH}_4) = V(\text{CH}_4)/V(\text{biog})$

$\rho(\text{CH}_4)$: Densidad del metano (kg/m^3)

$$m(\text{CO}_2) = V(\text{bg}) \times f_v(\text{CO}_2) \times \rho(\text{CO}_2) \quad (2.4)$$

Donde:

$m(\text{CO}_2)$: Cantidad de dióxido de carbono producido (kg)

$f_v(\text{CO}_2) = V(\text{CO}_2)/V(\text{biog})$

$\rho(\text{CO}_2)$: Densidad del dióxido de carbono (kg/m^3)

$$m(\text{bg}) = m(\text{CH}_4) + m(\text{CO}_2) \quad (2.5)$$

❖ Cálculo de la cantidad de biofertilizante sólido obtenido

$$m(\text{bfs}) = m(\text{bmh}) \times P_u(\text{bfs}) \quad (2.6)$$

Donde:

$P_u(\text{bfs})$: Producción unitaria de biofertilizante sólido

❖ Cálculo de la cantidad de biofertilizante líquido obtenido

$$m(\text{bfl}) = m(\text{bmh}) + m(\text{ag}) - [m(\text{bg}) + m(\text{bfs})] \quad (2.7)$$

2.5. Cálculo de la composición química de la biomasa, el biogás y de los efluentes obtenidos en el biodigestor

El objetivo de este análisis es ilustrar de manera numérica la cantidad de elementos químicos que entran al biodigestor con la materia orgánica y la cantidad de elementos que salen en forma de biogás y en forma de efluente líquido y sólido

2.5.1. Cálculo de la composición química de la biomasa seca introducida en el biodigestor

A continuación se muestra una tabla en la que se expresa la composición química de los tres tipos de biomasa principales que se utilizan en los biodigestores referenciada a la masa de sólidos totales que poseen estos compuestos. La suma de las cantidades de estos elementos que se introducen en el biodigestor conforma la biomasa total (bmh), la cual posee un determinado porcentaje de humedad que depende de la cantidad de agua presente en cada uno de los desechos orgánicos. Se utilizaron las investigaciones de (Pala Reyes, 2006), (Colomer Mendoza et al., 2010), (Sebastián Nogués et al., 2018) y (Chen et al., 2003).

Tabla 2.1 Tipos de biomasa que forman la mezcla y su composición química respecto a su masa seca

Tipo de biomasa	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	P (%)	K (%)	S (%)	Cenizas (%)	Fuente
Restos de comida	48	6,4	37,6	2,6	0	0	0,4	5	(Pala Reyes, 2006)
Lodos cloacales	32,69	3,62	20,85	3,91	0	0	1,45	37,48	(Colomer Mendoza, 2010)
Estiércol bovino	51,43	6	34,29	2,72	0,81	0,92	0	3,83	(Sebastián Nogués et al., 2010)

Tomado de varias fuente

❖ Cálculo del contenido de carbono de la biomasa seca

$$\%C(bms) = [\%C(RC) \times fm(RC)] + [\%C(LC) \times fm(LC)] + [\%C(EB) \times fm(EB)] \quad (2.8)$$

donde:

%C(bms): Porcentaje de carbono en la biomasa seca (%)

%C(RC): Porcentaje de carbono en los restos de comida (%)

%C(LC): Porcentaje de carbono en los lodos cloacales (%)

%C(EB): Porcentaje de carbono en el estiércol bovino (%)

fm(RC): Fracción másica de los restos de comida (%)

fm(LC): Fracción másica de los lodos cloacales (%)

fm(EB): Fracción másica del estiércol bovino (%)

❖ Cálculo del contenido de hidrógeno de la biomasa seca

$$\%H(bms) = [\%H(RC) \times fm(RC)] + [\%H(LC) \times fm(LC)] + [\%H(EB) \times fm(EB)] \quad (2.9)$$

donde:

%H(bms): Porcentaje de hidrógeno en la biomasa seca (%)

%H(RC): Porcentaje de hidrógeno en los restos de comida (%)

%H(LC): Porcentaje de hidrógeno en los lodos cloacales (%)

%H(EB): Porcentaje de hidrógeno en el estiércol bovino (%)

❖ Cálculo del contenido de oxígeno de la biomasa seca

$$\%O(bms) = [\%O(RC) \times fm(RC)] + [\%O(LC) \times fm(LC)] + [\%O(EB) \times fm(EB)] \quad (2.10)$$

donde:

%O(bms): Porcentaje de oxígeno en la biomasa seca (%)

%O(RC): Porcentaje de oxígeno en los restos de comida (%)

%O(LC): Porcentaje de oxígeno en los lodos cloacales (%)

%O(EB): Porcentaje de oxígeno en el estiércol bovino (%)

❖ Cálculo del contenido de nitrógeno de la biomasa seca

$$\%N(bms) = [\%N(RC) \times fm(RC)] + [\%N(LC) \times fm(LC)] + [\%N(EB) \times fm(EB)] \quad (2.11)$$

donde:

%N(bms): Por ciento de nitrógeno en la biomasa seca (%)

%N(RC): Por ciento de nitrógeno en los restos de comida (%)

%N(LC): Por ciento de nitrógeno en los lodos cloacales (%)

%N(EB): Por ciento de nitrógeno en el estiércol bovino (%)

❖ Cálculo del contenido de azufre de la biomasa seca

$$\%S(bms) = [\%S(RC) \times fm(RC)] + [\%S(LC) \times fm(LC)] + [\%S(EB) \times fm(EB)] \quad (2.12)$$

donde:

%S(bms): Por ciento de azufre en la biomasa seca (%)

%S(RC): Por ciento de azufre en los restos de comida (%)

%S(LC): Por ciento de azufre en los lodos cloacales (%)

%S(EB): Por ciento de azufre en el estiércol bovino (%)

❖ Cálculo del contenido de cenizas de la biomasa seca

$$\%cnz(bms) = [\%cnz(RC) \times fm(RC)] + [\%cnz(LC) \times fm(LC)] + [\%cnz(EB) \times fm(EB)] \quad (2.13)$$

donde:

%cnz(bms): Por ciento de cenizas en la biomasa seca (%)

%cnz(RC): Por ciento de cenizas en los restos de comida (%)

%cnz(LC): Por ciento de cenizas en los lodos cloacales (%)

%cnz(EB): Por ciento de cenizas en el estiércol bovino (%)

2.5.2. Cálculo de la composición química de la biomasa húmeda

- ❖ Cálculo del contenido de agua de la biomasa húmeda

El porcentaje de agua presente en la biomasa húmeda es un dato conocido por lo que no requiere ningún cálculo

- ❖ Cálculo del contenido de carbono de la biomasa húmeda

$$\%C(bmh) = \%C(bms) \times \%ST(bmh) \quad (2.14)$$

donde:

$\%C(bmh)$: Porcentaje de carbono de la biomasa húmeda (%)

$\%C(bms)$: Porcentaje de carbono de la biomasa seca (%)

$\%ST(bmh)$: Porcentaje de sólidos totales de la biomasa húmeda (%)

- ❖ Cálculo del contenido de hidrógeno de la biomasa húmeda

$$\%H(bmh) = \%H(bms) \times \%ST(bmh) \quad (2.15)$$

donde:

$\%H(bmh)$: Porcentaje de hidrógeno de la biomasa húmeda (%)

$\%H(bms)$: Porcentaje de hidrógeno de la biomasa seca (%)

- ❖ Cálculo del contenido de oxígeno de la biomasa húmeda

$$\%O(bmh) = \%O(bms) \times \%ST(bmh) \quad (2.16)$$

donde:

$\%O(bmh)$: Porcentaje de oxígeno de la biomasa húmeda (%)

$\%O(bms)$: Porcentaje de oxígeno de la biomasa seca (%)

❖ Cálculo del contenido de nitrógeno de la biomasa húmeda

$$\%N(bmh) = \%N(bms) \times \%ST(bmh) \quad (2.17)$$

donde:

$\%N(bmh)$: Porcentaje de nitrógeno de la biomasa húmeda (%)

$\%N(bms)$: Porcentaje de nitrógeno de la biomasa seca (%)

❖ Cálculo del contenido de azufre de la biomasa húmeda

$$\%S(bmh) = \%S(bms) \times \%ST(bmh) \quad (2.18)$$

donde:

$\%S(bmh)$: Porcentaje de azufre de la biomasa húmeda (%)

$\%S(bms)$: Porcentaje de azufre de la biomasa seca (%)

❖ Cálculo del contenido de cenizas de la biomasa húmeda

$$\%cnz(bmh) = \%cnz(bms) \times \%ST(bmh) \quad (2.19)$$

donde:

$\%cnz(bmh)$: Porcentaje de cenizas de la biomasa húmeda (%)

$\%cnz(bms)$: Porcentaje de cenizas de la biomasa seca (%)

2.5.3. Cálculo del contenido de elementos químicos de la biomasa que pasan a formar parte del biogás

A continuación se ilustra en una tabla, la composición química de 1 kg de biogás con una composición volumétrica de 60% de CH₄ y 40% de CO₂.

Tabla 2.2 Composición química del biogás respecto a su masa

Composición química del biogás		
C (%)	H (%)	O (%)
43,9	8,7	47,4

Elaboración propia

- ❖ Cálculo del contenido de carbono de la biomasa que pasa a la composición del biogás

$$\%C'(bg)' = \frac{\%C(bg) \times m(bg)}{\%C(bms) \times m(bms)} \times 100\% \quad (2.20)$$

donde:

$\%C'(bg)'$: Por ciento de carbono de la biomasa seca que pasa al biogás (%)

$\%C(bg)$: Por ciento de carbono del biogás (%)

$m(bg)$: Cantidad de biogás producido (kg)

$m(bms)$: Cantidad total de biomasa seca introducida (kg)

- ❖ Cálculo del contenido de hidrógeno de la biomasa que pasa a la composición del biogás

$$\%H(bg)' = \frac{\%H(bg) \times m(bg)}{\%H(bms) \times m(bms)} \times 100\% \quad (2.21)$$

donde:

$\%H(bg)'$: Por ciento de hidrógeno de la biomasa seca que pasa al biogás (%)

$\%H(bg)$: Por ciento de hidrógeno del biogás (%)

- ❖ Cálculo del contenido de oxígeno de la biomasa que pasa a la composición del biogás

$$\%O(bg)' = \frac{\%O(bg) \times m(bg)}{\%O(bms) \times m(bms)} \times 100\% \quad (2.22)$$

donde:

%O(bg)’: Por ciento de oxígeno de la biomasa seca que pasa al biogás (%)

%O(bg): Por ciento de oxígeno del biogás (%)

2.5.4. Cálculo de la composición química del efluente

❖ Cálculo de la humedad

$$\%hd(efl) = \left(\frac{\%hd(bmh) \times m(bmh) + m(ag)}{m(bfs) + m(bfl)} \right) \times 100\% \quad (2.23)$$

donde:

%hd(efl): Por ciento de agua o de humedad del efluente obtenido en el biodigestor (%)

%hd(bmh): Humedad de la biomasa expresada en por ciento (%)

❖ Cálculo del contenido de carbono

$$\%C(efl) = \left(\frac{[\%C(bms) \times m(bms)] - [\%C(bg) \times m(bg)]}{m(bfs) + m(bfl)} \right) \times 100\% \quad (2.24)$$

donde:

%C(efl): Por ciento de carbono en el efluente (%)

❖ Cálculo del contenido de hidrógeno

$$\%H(efl) = \left(\frac{[\%H(bms) \times m(bms)] - [\%H(bg) \times m(bg)]}{m(bfs) + m(bfl)} \right) \times 100\% \quad (2.25)$$

donde:

%H(efl): Por ciento de hidrógeno en el efluente

❖ Cálculo del contenido de oxígeno (%)

$$\%O(efl) = \left(\frac{[\%O(bms) \times m(bms)] - [\%O(bg) \times m(bg)]}{m(bfs) + m(bfl)} \right) \times 100\% \quad (2.26)$$

donde:

%O(efl): Porcentaje de oxígeno en el efluente (%)

❖ Cálculo del contenido de nitrógeno

$$\%N(efl) = \left(\frac{[\%N(bms) \times m(bms)] - [\%N(bg) \times m(bg)]}{m(bfs) + m(bfl)} \right) \times 100\% \quad (2.27)$$

donde:

%N(efl): Porcentaje de nitrógeno en el efluente (%)

❖ Cálculo del contenido de azufre

$$\%S(efl) = \left(\frac{[\%S(bms) \times m(bms)] - [\%S(bg) \times m(bg)]}{m(bfs) + m(bfl)} \right) \times 100\% \quad (2.28)$$

donde:

%S(efl): Porcentaje de azufre en el efluente (%)

❖ Cálculo del contenido de cenizas

$$\%cnz(efl) = \left(\frac{[\%cen(bms) \times m(bms)]}{m(bfs) + m(bfl)} \right) \times 100\% \quad (2.29)$$

donde:

%cnz(efl): Porcentaje de cenizas en el efluente (%)

2.6. Análisis energético y exergético del biodigestor

Para realizar el análisis energético de los flujos de entrada y de salida del biodigestor debe tenerse en consideración las temperaturas a las que se encuentran dichas corrientes.

En el caso estudiado se puede considerar que la biomasa, el agua, el biogás y los efluentes se encuentran a temperatura y presión ambiente, por lo que su valor energético es idéntico a su valor exergético, ya que se consideran para los cálculos, solamente el PCI de los elementos que intervienen en el sistema. La ecuación del balance energético del biodigestor quedaría como sigue.

$$E_{ent} = E(U) + E(FC) + E(ef) \quad (2.30)$$

Donde:

E_{ent} : Es la energía que entra al sistema debido a la introducción de la biomasa con su poder calórico inferior (PCI) y por su temperatura (kJ)

$E(U)$: Energía útil proveniente del biogás obtenido con su poder calórico y su temperatura (kJ)

$E(FC)$: Energía del flujo de calor hacia el exterior provocado por la fermentación de la materia orgánica dentro del biodigestor (kJ)

$E(ef)$: Energía del efluente por la presencia de carbono, azufre e hidrógeno que sale del biodigestor y por la temperatura de este (kJ)

Para realizar el análisis exergético es preciso definir la cantidad de exergía que entra al sistema y calcular cuánta de esta se transforma en exergía útil, cuánta en no se utiliza y cuanta se pierde durante el proceso de fermentación en forma de calor. En el caso de un biodigestor anaeróbico se considera que solamente se puede utilizar la exergía proveniente del biogás y que el resto se considera como exergía destruída y perdida, esta última es la proveniente de los efluentes sólido y líquido.

El contenido energético de la biomasa se mide en el poder calorífico que el recurso posee. Este término hace referencia a la cantidad de calor que es capaz de producir por medio de la combustión por unidad de masa del recurso, la unidad de medida puede estar dada en kJ/kg, kJ/L ó kJ/m³, de acuerdo con el estado de agregación de la materia en que se

encuentre. Para esto el autor se basó en las investigaciones de (Pala Reyes, 2006), (Colomer Mendoza et al., 2010) y (Serrato Monroy and Lesmes Cepeda, 2016).

Tabla 2.3 Propiedades energéticas de los diferentes tipos de biomasa utilizados

Tipo de biomasa	Humedad	PCI (kJ/kg de ST)	Fuente
Residuos de comida	70%	4 652,037	(Pala Reyes, 2006)
Lodos cloacales	79%	11 580,000	(Colomer Mendoza, 2010)
Estiércol bovino	73%	15 828,07	(Serrato Monroy & Lesmes Cepeda, 2016)

Tomado de varias fuentes

2.6.1. Balance de exergía

$$E_x(Ent) = E_x(U) + E_x(D+P) \quad (2.31)$$

donde:

Ex(Ent): Exergía total del flujo que entra al biodigestor (kJ)

Ex(U): Exergía utilizable proveniente del biogás que sale del biodigestor (kJ)

Ex(D+P): Exergía que se pierde y exergía que se destruye (kJ)

❖ Cálculo de la exergía que entra al biodigestor proveniente de la biomasa

$$E_x(Ent) = E_x(bms) \quad (2.32)$$

donde:

Ex(bms): Exergía de la biomasa seca introducida

$$PCI(bms) = [PCI(RC) \times fm(RC)] + [PCI(LC) \times fm(LC)] + [PCI(EB) \times fm(EB)] \quad (2.33)$$

donde:

PCI(bms): Poder calórico inferior de la biomasa seca introducida (kJ/kg)

PCI(RC): Poder calórico inferior de los restos de comida (kJ/kg)

PCI(EB): Poder calórico inferior del estiércol bovino (kJ/kg)

fm(RC): Fracción másica de los restos de comida (kg ST(RC)/kg (bms))

fm(LC): Fracción másica de los lodos cloacales (kg ST(LC)/kg (bms))

fm(EB): Fracción másica del estiércol bovino (kg ST(EB)/kg (bms))

$$E_x (bms) = m(bms) \times PCI(bms) \quad (2.34)$$

donde:

m(bms): Cantidad de biomasa seca introducida (kg)

❖ Cálculo de la exergía útil proveniente del biogás que sale del biodigestor

$$E_x (U) = E_x (bg) \quad (2.35)$$

$$E_x (bg) = V(bg) \times \%CH_4 \times \rho(CH_4) \times PCI(CH_4) \quad (2.36)$$

donde:

Ex(bg): Exergía total del biogás producido (kJ)

V(bg): Cantidad de biogás producido (m³)

%CH₄): Porcentaje de metano presente en el biogás (m³ CH₄/m³ biogás)

ρ(CH₄): Densidad específica del metano (kg/m³)

PCI(CH₄): Poder calórico inferior del metano (kJ/kg)

❖ Cálculo de la exergía destruida y de la exergía no aprovechada

$$E_x (D+P) = E_x (Ent) - E_x (U) \quad (2.37)$$

2.6.2. Cálculo del rendimiento exergético del biodigestor

$$\eta_x = \frac{E_x(U)}{E_x(Ent)} \times 100 \% \quad (2.38)$$

2.7. Análisis del flujo de costo de producción del biogás y los biofertilizantes

El objetivo de este análisis es conocer el costo por hora de la producción del biogás y los biofertilizantes. Para esto se consideran los gastos del agua utilizada y de combustible diésel consumido por concepto de transporte de la biomasa desde el lugar de recolección hasta la ubicación de la instalación, durante 30 días de operación del biodigestor, así como el costo total de la inversión del biodigestor, el cual se asume que se mantiene en funcionamiento durante 7920 horas al año (equivalentes a 11 meses de 30 días cada uno).

❖ Cálculo del flujo de costo de producción del biogás y los biofertilizantes

$$\dot{Z}(bg + bfs + bfl) = \dot{Z}_I + \dot{Z}(ag) + \dot{Z}(bmh) \quad (2.39)$$

donde:

$\dot{Z}(bg + bfs + bfl)$: Flujo de costo de producción del biogás y los biofertilizantes (\$/h)

\dot{Z}_I : Flujo de costo de inversión (\$/h)

$\dot{Z}(ag)$: Flujo de costo de agua utilizada (\$/h)

$\dot{Z}(bmh)$: Flujo de costo de la biomasa (\$/h)

❖ Cálculo del flujo de costo de inversión del biodigestor

Para calcular el flujo de costo de inversión del biodigestor se utiliza la siguiente ecuación:

$$\dot{Z}_I = \frac{a \times \phi \times Z_{DC}}{N} \quad (2.40)$$

donde:

\dot{Z}_I : Costo de inversión del biodigestor (\$/h)

a: Coeficiente

Φ : Factor de costos operación y mantenimiento

Z_{DC} : Costo de diseño y construcción (\$)

N: Cantidad de horas de trabajo al año (h)

$$a = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.41)$$

donde:

i: Factor de amortización de la inversión (6%)

n: Vida útil estimada del biodigestor en años

❖ Cálculo del flujo de costo del agua utilizada

$$\dot{Z}(ag) = \frac{V(ag) \times P(ag)}{n} \quad (2.42)$$

donde:

V(ag): Cantidad de gua utilizada (m³)

P(ag): Precio del agua (\$/m³)

n: Número de horas de trabajo del biodigestor durante el tiempo analizado (h)

❖ Cálculo del flujo de costo de la biomasa

$$\dot{Z}(bmh) = \frac{V(ds) \times P(ds)}{n} \quad (2.43)$$

donde:

$V(ds)$: Cantidad de combustible diésel utilizado para el transporte de la biomasa (L)

$P(ds)$: Precio del combustible diésel (\$/L)

2.8. Análisis del costo exergoeconómico del biogás

El objetivo de este análisis es conocer cuanto cuesta producir cada MJ de energía que proporciona el biogás obtenido en el biodigestor durante todo el tiempo de explotación de este (20 años aproximadamente). Para esto es necesario conocer cuanto cuesta la instalación del biodigestor (incluye el costo de diseño-construcción y el de operación-mantenimiento), cuanto cuesta la cantidad de agua total utilizada y cuanto cuesta el traslado de la biomasa desde donde se recolecta hasta el lugar donde se encuentra ubicado el biodigestor.

Para la realización de los cálculos se puede asumir que el biodigestor trabajará en el año, 11 meses de 30 días cada uno, de manera que los resultados obtenidos en los epígrafes anteriores pueden ser utilizados en estos cálculos. Además se supone que el biodigestor va a funcionar sin interrupción durante los 20 años de explotación sin que varíe su producción o su eficiencia, obteniéndose anualmente la misma producción.

❖ Cálculo de la exergía obtenida del biogás producido

$$E_x(bg) = V(bg) \times \%CH_4 \times \rho(CH_4) \times PCI(CH_4) \quad (2.44)$$

❖ Cálculo del costo exergoeconómico del biogás

$$Z_{EX}(bg) = Z_{EX(I)} + Z_{EX}(ag) + Z_{EX}(bmh) \quad (2.45)$$

donde:

$Z_{EX(I)}$: Costo exergoeconómico de inversión del biodigestor (\$)

$Z(ag)$: Costo exergoeconómico del agua utilizada (\$)

$Z(bmh)$: Costo exergoeconómico de la biomasa utilizada (\$)

❖ Cálculo del costo exergoeconómico de inversión

$$Z_{EX(a)} = \frac{Z_{DC} \times \phi}{E_X(bg)} \quad (2.46)$$

❖ Cálculo del costo exergoeconómico del agua utilizada

$$Z_{EX(ag)} = \frac{V(ag) \times P(ag)}{E_X(bg)} \quad (2.47)$$

donde:

V(ag): Volumen de agua total utilizada durante un mes de explotación del biodigestor (m³)

P(ag): Precio del m³ de agua (\$/m³)

❖ Cálculo del costo exergoeconómico de la biomasa utilizada

$$Z_{EX(bmh)} = \frac{V(ds) \times P(ds)}{E_X(bg)} \quad (2.48)$$

donde:

V(ds): Cantidad total de combustible diésel utilizado para el transporte durante un mes de explotación del biodigestor (m³)

P(ds): Precio del combustible diésel (\$/L)

❖ Cálculo del factor exergoeconómico

Este parámetro pondera la repercusión relativa que tiene el costo total de la inversión respecto al incremento del costo exergoeconómico unitario total que se produce en un equipo. Si está próximo a la unidad indica que existen pocas posibilidades de mejorar la economía del proceso mediante una mayor inversión en el equipo que tienda a disminuir la irreversibilidad. Por el contrario, un factor exergoeconómico muy pequeño muestra que, al menos en teoría, resultará posible y probablemente rentable realizar una inversión adicional en el equipo con vistas a mejorar su eficiencia termodinámica.

(Benjan et al., 1997) ha definido el **factor exergoeconómico** de un equipo mediante la expresión:

$$F_{EC} = \frac{Z_{EX}(I)}{Z_{EX}(I) + Z_{EX}(D+P)} \quad (2.49)$$

Donde:

$$Z_{EX(D+P)} = Z_{EX}(bg) * (1 - \eta_x) \quad (2.50)$$

El factor exergoeconómico es una herramienta muy útil para investigar, en procesos o plantas de tecnología bien establecida, en qué equipos o subprocesos debe centrarse una mejora efectiva de su eficiencia y para valorar el potencial económico de las alternativas de mejora establecidas.

- Para equipos de transformación de la energía se esperan valores del F_{EC} hasta 0,55
- Para compresores y turbinas este valor ronda entre 0,35...0,75
- Para las bombas es mayor que 0,70

2.9. Análisis económico

Para evaluar económicamente un biodigestor se necesita realizar un balance de costos que refleje las ganancias obtenidas luego del tiempo de trabajo analizado. Para esto se compara el costo económico de las corrientes de entrada con el costo económico de las corrientes de salida. Para esto se utilizaron las fuentes siguientes: (Finanzas y Precios, 2015), (Pérez-Borroto Calderín, 2014), (CUPET, 2017).

Tabla 2.4 Precios de algunos productos para el análisis económico

Producto	Precio	Fuente
Litro de diésel	\$20	(CUPET, 2017)
Kilogramo de fertilizante sólido	\$2,95	(Ministerio de Finanzas y Precios, 2015)
Litro de fertilizante líquido	\$0,50	(Ministerio de Finanzas y Precios, 2015)
m ³ de agua	\$9	(Pérez-Borroto Calderín, 2014)

Tomado de varias fuentes

2.9.1. Cálculo de la ganancia económica

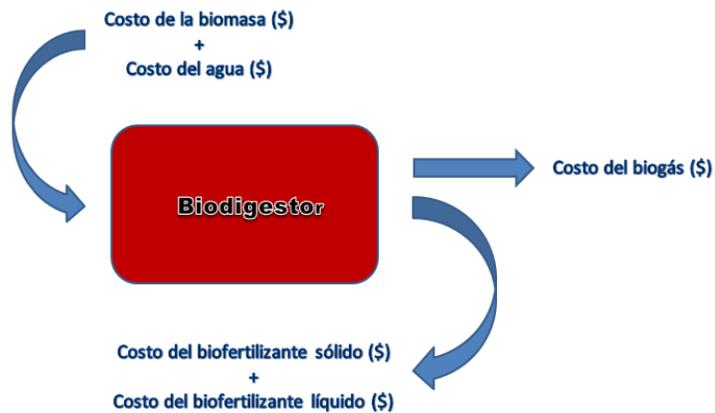


Fig 2.4 Diagrama de las corrientes de costos de un biodigestor

$$G(\$) = C(bg) + C(bfs) + C(bfl) - [C(ag) + C(bmh)] \quad (2.51)$$

Donde:

G(\$): Ganancia obtenida durante el tiempo analizado (\$)

C(bg): Costo del biogás producido (\$)

C(bfs): Costo del biofertilizante sólido obtenido (\$)

C(bfl): Costo del biofertilizante líquido obtenido (\$)

C(ag): Costo del agua utilizada (\$)

C(bmh): Costo de la biomasa húmeda introducida (\$)

Tabla 2.5 Equivalencia energética aproximada del biogás

1m ³ de biogás equivale a:	
Gas natural	0,65m ³
Gas licuado	0,45L
Diésel	0,55L
Gasolina	0,71L

Tomado de la Revista de Ingeniería Energética, 2017, vol XXXVIII, no.3, septiembre/diciembre, p. 213-223, ISSN 1815-5901

❖ Cálculo del costo del biogás producido

El costo del biogás se analiza teniendo en cuenta una posible sustitución del combustible diésel por este para la generación de electricidad en pequeñas plantas o para su uso en vehículos de transporte tipo *dual fuel*.

$$C(bg) = V(bg) \times Eq(ds) \times P(ds) \quad (2.52)$$

donde:

V(bg): Volúmen de biogás producido (m³)

Eq(ds): Cantidad de litros de diésel equivalentes a 1m³ de biogás (L/m³)

P(ds): Precio del litro de diésel (\$/L)

❖ Cálculo del costo del biofertilizante sólido

Para determinar el costo del biofertilizante sólido obtenido se realiza una comparación de este con un fertilizante químico del tipo NPK, comercializado en nuestro país, el cual tiene un precio de comercialización de \$2,95/kg de fertilizante.

$$C(bfs) = m(bfs) \times P(bfs) \quad (2.53)$$

donde:

m(bfs): Cantidad de biofertilizante sólido obtenido (kg)

P(bfs): Precio del kg de fertilizante sólido NPK en el mercado (\$)

❖ Cálculo del costo del biofertilizante líquido

Para determinar el costo del biofertilizante líquido se comparó este con el fertilizante orgánico SolUAN 32, de fabricación americana. Luego se determinó un precio de venta teórico teniendo en cuenta su composición química y los precios de fertilizantes similares comercializados en nuestro país.

$$C(bfl) = L(bfl) \times P(bfl) \quad (2.54)$$

donde:

L(bfl): Cantidad total de biofertilizante líquido obtenido (L)

P(bfl): Precio del L de fertilizante líquido en el mercado (\$/L)

❖ Cálculo del costo del agua utilizada en el proceso

$$C(ag) = V(ag) \times P(ag) \quad (2.55)$$

donde:

V(ag): Cantidad de agua utilizada (m³)

P(ag): Precio del m³ de agua (\$/m³)

2.9.2. Cálculo del período de recuperación de la inversión

El período de recuperación de la inversión (PRI) no es más que el tiempo en años que demora obtener una ganancia monetaria igual al gasto de la inversión. La siguiente ecuación permite calcular este parámetro sin tener en cuenta las tasas de interés y las variaciones de precios de los productos en el mercado.

$$PRI = \frac{I}{G} \quad (2.56)$$

Donde:

I: Gasto de la inversión (\$)

G: Ganancias anuales (\$)

Para nuestra investigación se asumió que el biodigestor estará funcionando durante 11 meses al año, por lo que las ganancias anuales se consideran como la suma de todas las ganancias mensuales durante este período. Además se consideró que la producción y la eficiencia de la instalación se mantienen constantes durante el tiempo de vida de esta.

2.10. Análisis de sostenibilidad

En todos los procesos en los que se genera energía, hay una afectación al ambiente, por consiguiente es necesario establecer un análisis en el que se satisfaga tanto la generación del producto deseado como la disminución de las emisiones de contaminación al ambiente.

Dentro de este contexto, se trata de evitar contaminantes como los hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2), la mayoría de éstos contaminantes se debe al uso de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural, lo cual, tiene consecuencias muy graves para nuestro planeta, por ejemplo el smog, la lluvia ácida, el calentamiento global y cambios climáticos.

La liberación de CO_2 es un problema que junto con otros gases como el metano y los óxidos de nitrógeno, hacen que la tierra se mantenga caliente, generando el efecto invernadero y cambios climáticos.

Para poder realizar un análisis de sustentabilidad, se requiere medir cual es la aportación al medio ambiente para evaluar si el proceso es negativo y si se puede disminuir las emisiones de gases tóxicos, éste análisis se hace por medio de un balance de CO_2 dentro del proceso que se estudia. Para esto se utilizarán los datos brindados en el epígrafe 1.7 obtenidos por (Sánchez Portilla and Vizcón Toledo, 2017) en los que se conoce cuanto dióxido de carbono emite la combustión de cada combustible. La ecuación que se muestra a continuación se elaboró teniendo en cuenta dichos criterios.

$$e(CO_2) = CO_2(bmh) - [CO_2(bg) + CO_2(bfs)] \quad (2.57)$$

donde:

$CO_2(bmh)$: Emisión de dióxido de carbono por concepto de transporte de la biomasa

$CO_2(bg)$: Reducción de la emisión de dióxido de carbono por concepto de sustitución del combustible diésel

$CO_2(bfs)$: Reducción de la emisión de dióxido de carbono por concepto de sustitución de fertilizantes industriales

- ❖ Cálculo de la reducción de la emisión de CO_2 por la sustitución del combustible diésel mediante el uso del biogás producido

$$CO_2(bg) = V(bg) \times Eq(ds) \times CO_2(ds) \quad (2.58)$$

donde:

$CO_2(ds)$: Emisión de dióxido de carbono por la combustión del combustible diésel (kg de CO_2/L)

- ❖ Cálculo de la reducción de la emisión de CO_2 por la utilización del biofertilizante sólido obtenido

$$CO_2(bfs) = m(bfs) \times Ee(bf) \times CO_2(Ee) \quad (2.59)$$

donde:

$Ee(bfs)$: Cantidad de electricidad consumida para producir 1 kg de fertilizante en la industria (kWh/kg)

$CO_2(Ee)$: Emisión de dióxido de carbono debido a la generación de 1 kWh (CO_2/kWh)

- ❖ Cálculo de la emisión de CO_2 debido al uso de combustible diésel para el transporte de la biomasa

$$CO_2(bmh) = V(ds) \times CO_2(ds) \quad (2.60)$$

donde:

V(ds): Cantidad de combustible diésel consumido por concepto de transporte de la biomasa

2.11. Cálculo del costo por daño ambiental

Según lo expresado por (Veziroglu, 2002), la utilización de 1GJ producido por gas natural tiene un costo por daño ambiental de 8,26 USD. Para nuestro trabajo se utilizará esta información, pero aplicando la tasa de cambio existente en nuestro país para el dólar, por lo que esta cantidad sería equivalente a \$198,24 (1 USD = \$24 CUP).

A continuación se plantea una expresión que permite calcular cuánto puede ahorrarse en materia de costos por daño al medio ambiente si se sustituye el uso de este gas natural por el del biogás obtenido.

$$PCI(bg) = PCI(CH_4) \times fm(CH_4) \quad (2.61)$$

$$CA(bg) = -[PCI(bg) \times Eq(gn) \times CA(gn)] \quad (2.62)$$

Donde:

PCI(bg): Poder Calórico Inferior del biogás (GJ/kg de biogás), luego debe multiplicarse por la densidad del biogás para obtenerlo en (GJ/m³ de biogás)

PCI (CH₄): Poder Calórico Inferior del metano (GJ/kg de metano)

fm(CH₄): Fracción másica del metano en el biogás (kg de metano/kg de biogás)

CA(bg): Reducción de costo por daño ambiental debido a la sustitución del gas natural por el biogás (\$)

Eq(GN): Equivalencia energética entre el biogás y el gas natural (m³ de biogás/m³ de gas natural)

CA(gn): Costo por daño ambiental debido al uso de gas natural (\$/GJ)

Conclusiones parciales del capítulo

Es este capítulo se elaboró una metodología de cálculo con la cual se realizará un análisis general a un biodigestor anaeróbico. Dicho análisis incluye el cálculo del balance de masas, cálculo de la composición química de los flujos, cálculos exergéticos, análisis exergoeconómicos y análisis de sostenibilidad. Será posible entonces calcular la productividad energética, el aporte de bioabonos y la contribución a la sostenibilidad del medio ambiente.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Selección del biodigestor para el análisis

Se escogió para realizar el análisis exergoeconómico un biodigestor rectangular de cúpula fija diseñado por (Pérez-Borroto Calderín, 2014) el cual modelará su funcionamiento con restos de comida, lodos cloacales y estiércol bovino. Para realizar los cálculos se utilizaron los resultados de laboratorio obtenidos por (Sánchez Portilla and Vizcón Toledo, 2017), donde se obtienen datos sobre la producción de biogás y biofertilizante según la cantidad de biomasa introducida en el biodigestor, su composición y contenido de humedad (Ver Anexo 3). Además se tiene en cuenta un tiempo de funcionamiento del biodigestor de 30 días (un mes) tiempo durante el cual se considera que permanece toda la materia orgánica en el interior de este hasta que se agota la producción de biogás.

Datos del biodigestor:

Volumen de la cámara de digestión del biodigestor: $2,52 \text{ m}^3$

Volumen de la cámara de almacenamiento de biogás: $2,16 \text{ m}^3$

Volumen del tanque de compensación: $0,24 \text{ m}^3$

Volumen del registro de carga: $0,08 \text{ m}^3$

Volumen del registro de evacuación de lodos: $0,38 \text{ m}^3$

Cantidad de restos de comida introducidos: 159,859 kg

Cantidad de lodos de cloaca introducidos: 159,140 kg

Cantidad de estiércol bovino introducido: 158,901 kg

Cantidad total de biomasa: 477,9 kg

Cantidad de agua introducida: 573,48 L

Tiempo de funcionamiento para la modelación: 30 días

3.2. Balance másico del biodigestor

$$m(bmh) + m(ag) = m(bg) + m(bfs) + m(bfl) \quad (3.1)$$

Datos:

$m(bmh)$: 477,9 kg

$m(ag)$: 573,48 kg

$Pu(bg)$: 0,02543 m³/kg (bmh)

$Pu(bfs)$: 0,06 kg/kg (bmh)

Composición volumétrica del biogás: 60% CH₄ + 40% CO₂

3.2.1. Cálculo de la cantidad de biogás obtenido

$$\begin{aligned} V(bg) &= m(bmh) \times Pu(bg) \\ V(bg) &= 477,9 \text{ kg} \times 0,02543 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \\ V(bg) &= 12,153 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} m(CH_4) &= V(bg) \times fv(CH_4) \times \rho(CH_4) \\ m(CH_4) &= (12,153 \text{ m}^3) \times 0,6 \times 0,656 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ m(CH_4) &= 4,783 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} m(CO_2) &= V(bg) \times fv(CO_2) \times \rho(CO_2) \\ m(CO_2) &= (12,153 \text{ m}^3) \times 0,4 \times 1,842 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ m(CO_2) &= 8,954 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} m(bg) &= m(CH_4) + m(CO_2) \\ m(bg) &= 4,783 \text{ kg} + 8,954 \text{ kg} \\ m(bg) &= 13,738 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.2.2. Cálculo de la cantidad de biofertilizante sólido obtenido

$$\begin{aligned}m(bfs) &= m(bmh) \times Pu(bfs) \\m(bfs) &= 477,9 \text{ kg} \times 0,06 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \\m(bfs) &= 28,674 \text{ kg}\end{aligned}\tag{3.6}$$

3.2.3. Cálculo de la cantidad de biofertilizante líquido obtenido

$$\begin{aligned}m(bfl) &= m(bmh) + m(ag) - [m(bg) + m(bfs)] \\m(bfl) &= 477,9 \text{ kg} + 573,48 \text{ kg} - [13,738 \text{ kg} + 28,674 \text{ kg}] \\m(bfl) &= 1\,008,968 \text{ kg}\end{aligned}\tag{3.7}$$

El balance de masa realizado al biodigestor arroja que en el tiempo calculado este produce 12,153 m³ de biogás, además se obtienen del proceso 28,674 kg de biofertilizante sólido y 1 008,968 kg de biofertilizante líquido. Si se compara la producción unitaria de biogás de este biodigestor (**0,025 m³ de biogás por kg de materia orgánica introducida**) con la producción unitaria promedio brindada por otras fuentes (**0,032 m³ de biogás por cada kg de materia orgánica introducida** sin la presencia de lodos ni restos de comidas), es posible apreciar que ambas son parecidas, pero debido a que en nuestro caso se utilizó la técnica de la codigestión, era de esperarse que el rendimiento productivo del biogás hubiese sido un poco mayor. Para definir mejor esta situación es importante continuar el estudio de los biodigestores ya que hay muchos factores que pueden influir en la producción del biogás, sin embargo vale señalar que la biomasa utilizada para la modelación del funcionamiento de la instalación estudiada las masa húmeda de los tres componentes (restos de comida, lodos cloacales y estiércol bovino) están en igual proporción másica, posee un alto contenido de humedad (74%) y que además de esto, cuando se introduce en el biodigestor se le adiciona agua, lo que hace que la humedad de la mezcla final sea de aproximadamente un 88%.

3.3. Cálculo de la composición química de la biomasa, el biogás y los efluentes en el biodigestor

Teniendo en cuenta las composiciones químicas de los 3 tipos de biomasa utilizados en la codigestión (restos de comida, lodos cloacales y estiércol bovino) presentadas en el capítulo anterior es posible calcular la composición química de la biomasa total introducida en el biodigestor, así como la composición del biogás y de los efluentes. Esto permite tener una idea bastante cercana a la realidad de la distribución, en cada una de las mezclas, de elementos químicos como el carbono, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno, el fósforo, el potasio y el azufre, además de la humedad y el contenido de cenizas. Los cálculos de composición se realizaron utilizando una hoja de cálculo de EXCEL elaborada por el autor y sus resultados se muestran en las tablas siguientes.

Tabla 3.1 Composición de la biomasa seca compuesta por la mezcla de restos de comida, lodos cloacales y estiércol bovino

Composición química de la biomasa seca							
C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	P (%)	K (%)	S (%)	Cenizas (%)
45,04	5,51	31,95	2,99	0,28	0,31	0,55	13,36
C (kg)	H (kg)	O (kg)	N (kg)	P (kg)	K (kg)	S (kg)	Cenizas (kg)
55,661	6,809	39,484	3,695	0,346	0,383	0,68	16,511

Tabla 3.2 Composición de la biomasa teniendo en cuenta el porcentaje de humedad de la mezcla

Composición química de la biomasa húmeda								
Agua (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	P (%)	K (%)	S (%)	Cenizas (%)
74,14	11,65	1,42	8,26	0,77	0,07	0,08	0,14	3,45
Agua (kg)	C (kg)	H (kg)	O (kg)	N (kg)	P (kg)	K (kg)	S (kg)	Cenizas (kg)
354,318	55,661	6,809	39,484	3,695	0,346	0,383	0,68	16,511

Tabla 3.3 Composición del biogás producido

Composición química del biogás								
Agua (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	P (%)	K (%)	S (%)	Cenizas (%)
0	43,9	8,7	47,4	0	0	0	0	0
Agua (kg)	C (kg)	H (kg)	O (kg)	N (kg)	P (kg)	K (kg)	S (kg)	Cenizas (kg)
0	6,031	1,195	6,512	0	0	0	0	0

Tabla 3.4 Elementos químicos de la biomasa que pasan al biogás producido en el biodigestor

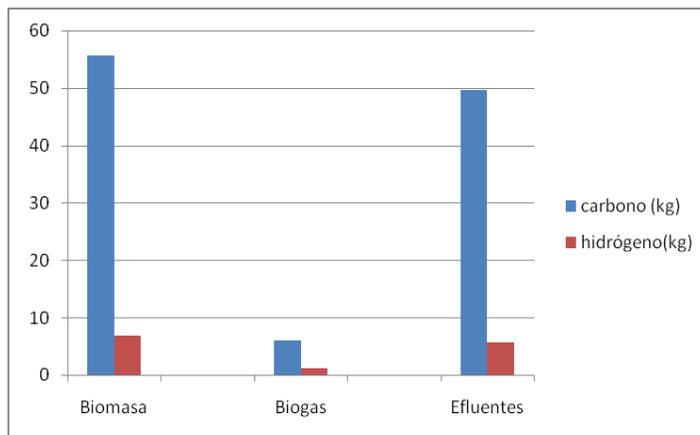
Porcentaje de elementos químicos de la biomasa seca que pasan al biogás								
Agua (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	P (%)	K (%)	S (%)	Cenizas (%)
0	10,84	17,55	16	0	0	0	0	0
Agua (kg)	C (kg)	H (kg)	O (kg)	N (kg)	P (kg)	K (kg)	S (kg)	Cenizas (kg)
0	6,031	1,195	6,512	0	0	0	0	0

Tabla 3.5 Composición del efluente (biofertilizante) obtenido

Composición química del efluente								
Agua (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	P (%)	K (%)	S (%)	Cenizas (%)
89,41	4,78	0,54	3,18	0,36	0,03	0,04	0,07	1,59
Agua (kg)	C (kg)	H (kg)	O (kg)	N (kg)	P (kg)	K (kg)	S (kg)	Cenizas (kg)
927,798	49,63	5,614	32,972	3,695	0,346	0,383	0,68	16,511

En la figura 3.1 se puede apreciar que la mayor parte del contenido de carbón e hidrógeno de la biomasa no pasa al biogás, lo cual no es muy favorable si el propósito es generar más metano.

Fig 3.1 Distribución de los contenidos de carbono e hidrógeno que entran con la biomasa y se distribuyen en la formación del biogás y los efluentes



3.4. Análisis exergético del biodigestor

El balance de exergía se realizó teniendo en cuenta el Poder Calórico Inferior del biogás y de la materia orgánica utilizada. Con estos datos se calcula la exergía total que entra al sistema proveniente de la biomasa, así como la exergía que se aprovecha en forma de biogás obtenido. La exergía correspondiente a los efluentes no se considera como

utilizable por lo que en este trabajo se la nombra: exergía perdida. El resto de la exergía se destruye durante la fermentación, en forma de calor, debido a que este proceso ocurre de forma exotérmica.

$$E_x(Ent) = E_x(U) + E_x(D+P) \quad (3.8)$$

Datos:

$$PCI(RC) = 4\,652,037 \text{ kJ/kg ST(RC)}$$

$$PCI(LC) = 11\,580,000 \text{ kJ/kg ST(LC)}$$

$$PCI(EB) = 15\,828,07 \text{ kJ/kg ST(EB)}$$

$$PCI(CH_4) = 49\,990,392 \text{ kJ/kg de metano}$$

$$m(bms) = 123.582 \text{ kg}$$

$$fm(RC) = 0,38807$$

$$fm(LC) = 0,26978$$

$$fm(EB) = 0,34215$$

3.4.1. Cálculo de la exergía que entra al biodigestor proveniente de la biomasa

$$E_x(Ent) = E_x(bms) \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} PCI(bms) &= [PCI(RC) \times fm(RC)] + [PCI(LC) \times fm(LC)] + [PCI(EB) \times fm(EB)] \\ PCI(bms) &= \left[4\,652,037 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 0,38807 \right] + \left[11\,580 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 0,26978 \right] + \left[15\,828,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 0,34215 \right] \\ PCI(bms) &= 10\,344,943 \frac{\text{kJ}}{\text{kg de bms}} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} E_x(bms) &= m(bms) \times PCI(bms) \\ E_x(bms) &= 123,582 \text{ kg} \times 10\,344,943 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ E_x(bms) &= 1\,278\,448,746 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (3.11)$$

3.4.2. Cálculo de la exergía útil

$$\begin{aligned}
 E_x(U) &= E_x(bg) \\
 E_x(U) &= V(bg) \times fv(CH_4) \times \rho(CH_4) \times PCI(CH_4) \\
 E_x(U) &= 12,153 \text{ m}^3 \times 0,6 \times 0,656 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 49\,990,392 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 E_x(U) &= 239\,125,081 \text{ kJ}
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

3.4.3. Cálculo de la exergía destruida y perdida

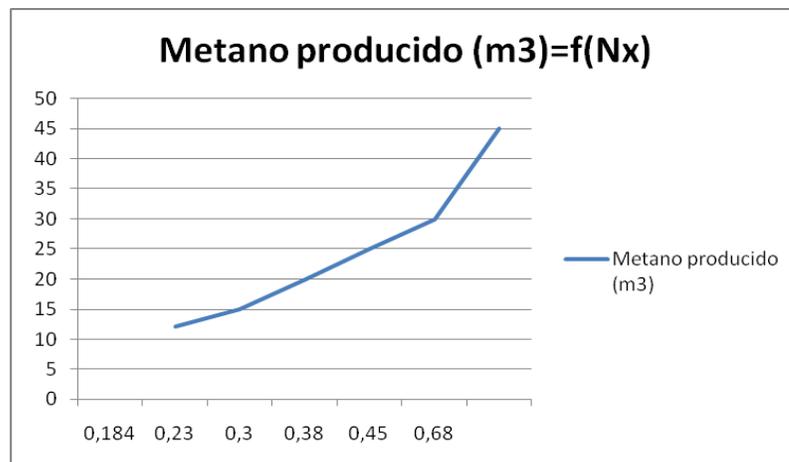
$$\begin{aligned}
 E_x(D+P) &= E_x(Ent) - E_x(U) \\
 E_x(D+P) &= 1\,278\,448,746 \text{ kJ} - 239\,125,081 \text{ kJ} \\
 E_x(D+P) &= 1\,039\,323,665 \text{ kJ}
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

3.4.4. Cálculo del rendimiento exergético del biodigestor

$$\begin{aligned}
 \eta_x &= \frac{E_x(U)}{E_x(Ent)} \times 100 \% \\
 \eta_x &= \frac{239\,125,081 \text{ kJ}}{1\,278\,448,746 \text{ kJ}} \times 100\% \\
 \eta_x &= 19 \%
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Se considera que exista una dependencia entre la producción de metano y el rendimiento exergético del biodigestor según se evidencia en la figura 3.2 siguiente:

Fig 3.2 Influencia del rendimiento exergético en la productividad de metano del biodigestor



Con este resultado se puede concluir que de toda la exergía que entra al biodigestor proveniente de la biomasa, sólo se puede aprovechar el 19% en forma de biogás. El resto de esta se pierde durante la digestión y otra parte se encuentra en el efluente final y no posee valor utilitario con fines energéticos. Según la consulta de fuentes especializadas en el tema del biogás se puede especular que una de las causas del bajo rendimiento en el biodigestor se debe a la baja producción de este ya que una gran parte del carbono y el hidrógeno (elementos químicos que determinan el poder energético de una sustancia), presentes en la biomasa introducida, se va con los efluentes. Además de esto, el biogás obtenido posee un alto contenido de CO₂ en su composición lo cual le resta poder calórico.

3.5. Análisis del flujo de costo de producción del biogás y los biofertilizantes

$$\dot{Z}(bg + bfs + bfl) = \dot{Z}_i + \dot{Z}(ag) + \dot{Z}(bmh) \quad (3.15)$$

3.5.1. Cálculo del flujo de costo de inversión

Datos:

$i = 6\%$

$n = 20$ años

$Z_{DC} = \$10\,574,70$

$\Phi = 1,05$

$N = 8184h$

$$\begin{aligned} a &= \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \\ a &= \frac{0,06 \times (1+0,06)^{20}}{(1+0,06)^{20} - 1} \\ a &= 0,087 \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_I &= \frac{a \times \phi \times Z_{DC}}{N} \\ \dot{Z}_I &= \frac{0,087 \times 1,05 \times \$10\,574,7}{7920 \text{ h}} \\ \dot{Z}_I &= \frac{\$0,12}{\text{h}}\end{aligned}\tag{3.17}$$

Este valor expresa el costo por hora de inversión relativo a la cantidad de horas de funcionamiento del biodigestor en un año.

3.5.2. Cálculo del flujo de costo por utilización de agua

Datos:

$$V(\text{ag}) = 0,573 \text{ m}^3$$

$$P(\text{ag}) = \$9/\text{m}^3$$

$$n = 720 \text{ h}$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}(\text{ag}) &= \frac{V(\text{aguaut}) \times P(\text{aguaut})}{n} \\ \dot{Z}(\text{ag}) &= \frac{0,573 \text{ m}^3 \times 9 \frac{\$}{\text{m}^3}}{720 \text{ h}} \\ \dot{Z}(\text{ag}) &= 0,01 \frac{\$}{\text{h}}\end{aligned}\tag{3.18}$$

Este resultado expresa el costo por hora de utilización de agua durante 30 días de funcionamiento del biodigestor.

3.5.3. Cálculo del flujo de costo de la biomasa

Datos:

$$V(\text{ds}) = 4 \text{ L}$$

$$P(\text{ds}) = \$20/\text{L}$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}(bmh) &= \frac{V(ds) \times P(ds)}{n} \\ \dot{Z}(bmh) &= \frac{4 L \times 20 \frac{\$}{L}}{720 h} \\ \dot{Z}(bmh) &= 0,11 \frac{\$}{h}\end{aligned}\tag{3.19}$$

Este resultado expresa el costo por hora del transporte de la biomasa durante 30 días de funcionamiento del biodigestor.

3.5.4. Cálculo del flujo de costo de producción del biogás y los biofertilizantes

$$\begin{aligned}\dot{Z}(bg + bfs + bfl) &= \dot{Z}_I + \dot{Z}(ag) + \dot{Z}(bmh) \\ \dot{Z}(bg + bfs + bfl) &= 0,12 \frac{\$}{h} + 0,01 \frac{\$}{h} + 0,11 \frac{\$}{h} \\ \dot{Z}(bg + bfs + bfl) &= 0,24 \frac{\$}{h}\end{aligned}\tag{3.20}$$

Con este resultado se puede concluir que la producción del biogás y de los biofertilizantes, en el biodigestor analizado, tiene un costo monetario de 24 centavos por hora de funcionamiento.

3.6. Análisis del costo exergoeconómico del biogás producido

$$Z_{EX}(bg) = Z_{EX(I)} + Z_{EX}(ag) + Z_{EX}(bmh)\tag{3.21}$$

3.6.1. Cálculo del costo exergoeconómico de inversión

Datos:

El coeficiente 220 sirve para obtener la exergía total utilizable acumulada en forma de biogás durante todo el tiempo de vida útil del biodigestor.

Ex(bg) = 239,125 MJ (exergía proveniente del biogás producido durante un mes de funcionamiento)

$$\begin{aligned}
Z_{EX(ag)} &= \frac{Z_{DC} \times \phi}{220 \times E_X(bg)} \\
Z_{EX(ag)} &= \frac{\$10\,574,70 \times 1,05}{220 \times 239,125 \text{ MJ}} \\
Z_{EX(ag)} &= 0,21 \frac{\$}{\text{MJ}}
\end{aligned} \tag{3.22}$$

3.6.2. Cálculo del costo exergoeconómico del agua

$$\begin{aligned}
Z_{EX(ag)} &= \frac{V(ag) \times P(ag)}{E_X(bg)} \\
Z_{EX(ag)} &= \frac{0,573 \text{ L} \times 9 \frac{\$}{\text{L}}}{239,125 \text{ MJ}} \\
Z_{EX(ag)} &= 0,02 \frac{\$}{\text{MJ}}
\end{aligned} \tag{3.23}$$

3.6.3. Cálculo del costo exergoeconómico de la biomasa

$$\begin{aligned}
Z_{EX(bmh)} &= \frac{V(ds) \times P(ds)}{E_X(bg)} \\
Z_{EX(bmh)} &= \frac{4 \text{ L} \times 20 \frac{\$}{\text{L}}}{239,125 \text{ MJ}} \\
Z_{EX(bmh)} &= 0,33 \frac{\$}{\text{MJ}}
\end{aligned} \tag{3.24}$$

3.6.4. Cálculo del costo exergoeconómico de producción del biogás

$$\begin{aligned}
Z_{EX(bg)} &= 0,21 \frac{\$}{\text{MJ}} + 0,02 \frac{\$}{\text{MJ}} + 0,33 \frac{\$}{\text{MJ}} \\
Z_{EX(bg)} &= 0,56 \frac{\$}{\text{MJ}}
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Esto significa que la producción de 1 MJ de energía debido al uso del biogás producido, conlleva un costo de \$0,56.

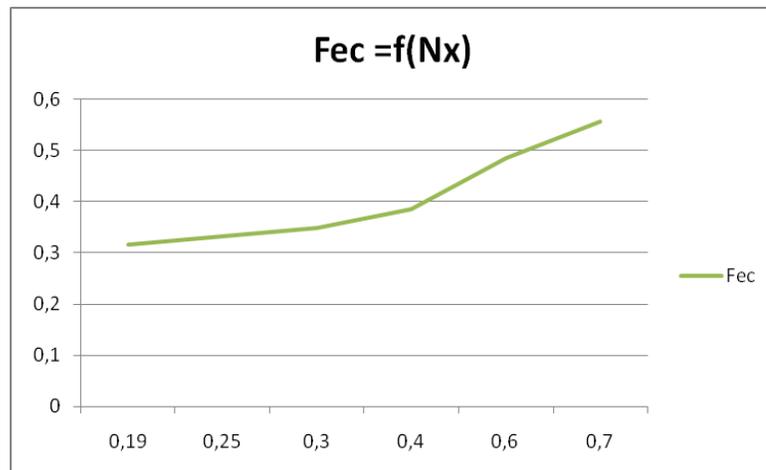
3.6.5. Cálculo del factor exergoeconómico

$$\begin{aligned}
 Z_{EX}(D+P) &= Z_{EX}(bg) * (1 - \eta_x) \\
 Z_{EX}(D+P) &= 0,56 \frac{\$}{MJ} * (1 - 0,19) \\
 Z_{EX}(D+P) &= 0,45 \frac{\$}{MJ}
 \end{aligned}
 \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned}
 F_{EC} &= \frac{Z_{EX}(I)}{Z_{EX}(I) + Z_{EX}(D+P)} \\
 F_{EC} &= \frac{0,21 \frac{\$}{MJ}}{0,21 \frac{\$}{MJ} + 0,45 \frac{\$}{MJ}} \\
 F_{EC} &= 0,32
 \end{aligned}
 \tag{3.27}$$

Este resultado es el factor exergoeconómico del biodigestor analizado y expresa la relación que existe entre el costo exergoeconómico de la inversión y el costo exergoeconómico de las pérdidas. Para que su valor se incremente es necesario lograr un mayor rendimiento exergético ya que el calculado para el biodigestor modelado en este trabajo es sólo del 19%, esto se puede apreciar en la figura 3.3 siguiente:

Fig 3.3 Dependencia del factor exergoeconómico con el rendimiento exergético del biodigestor



El factor exergoeconómico calculado no aparece relacionado en estudios anteriores de los biodigestores, si se considerara como un intercambiador de calor tendría que tener valores superiores a 0,5 lo cual ocurriría si el rendimiento exergético superara el valor de 65%.

3.7. Análisis económico del biodigestor

Se asume para los cálculos que el biofertilizante líquido obtenido tiene una densidad específica de 1kg/L.

Datos:

P(diésel): \$20/L

P(aguaut): \$9/m³

P(biofsol): \$2,95/kg

P(biofliq): \$0,50/L

$$G(\$) = C(bg) + C(bfs) + C(bfl) - [C(ag) + C(bmh)] \quad (3.28)$$

3.7.1. Costo del biogás obtenido debido a la sustitución del combustible diésel

$$\begin{aligned} C(bg) &= V(bg) \times Eq(ds) \times P(ds) \\ C(bg) &= 12,153 \text{ m}^3 \times 0,55 \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \times \$20/\text{L} \\ C(bg) &= \$133,68 \end{aligned} \quad (3.29)$$

3.7.2. Costo del biofertilizante sólido obtenido según el precio de 1kg en el mercado agropecuario

$$\begin{aligned} C(bfs) &= m(bfs) \times P(bfs) \\ C(bfs) &= 28,674 \text{ kg} \times \$2,95/\text{kg} \\ C(bfs) &= \$84,59 \end{aligned} \quad (3.30)$$

3.7.3. Costo del biofertilizante líquido obtenido según el precio de 1L en el mercado agropecuario

$$\begin{aligned}C(bfl) &= L(bfl) \times P(bfl) \\C(bfl) &= 1\,008,968\ L \times \$0,50/L \\C(bfl) &= \$504,48\end{aligned}\tag{3.31}$$

3.7.4. Costo del agua utilizada en el biodigestor

$$\begin{aligned}C(ag) &= V(ag) \times P(ag) \\C(ag) &= 0,573\ m^3 \times \$9/m^3 \\C(ag) &= \$5,16\end{aligned}\tag{3.32}$$

3.7.5. Costo de la biomasa empleada por concepto de combustible utilizado para el transporte

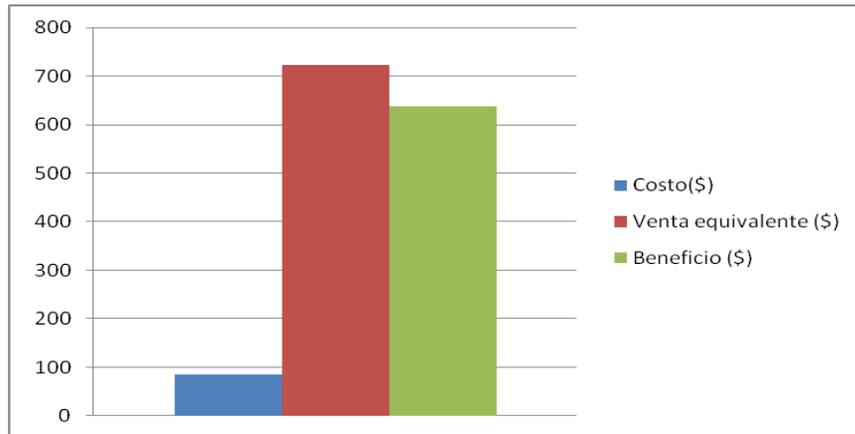
$$\begin{aligned}C(bmh) &= V(ds) \times P(ds) \\C(bmh) &= 4\ L \times \$20/L \\C(bmh) &= \$80\end{aligned}\tag{3.33}$$

A continuación se muestra el resultado del análisis económico de las ganancias del biodigestor modelado:

$$\begin{aligned}G(\$) &= C(bg) + C(bfs) + C(bfl) - [C(ag) + C(bmh)] \\G(\$) &= \$133,68 + \$84,59 + \$504,48 - (\$5,16 + \$80) \\G(\$) &= \$637,59\end{aligned}\tag{3.34}$$

Esto quiere decir que, sin tener en cuenta el costo de inversión del biodigestor y solamente teniendo en consideración los precios de venta en el mercado de los productos obtenidos, en un mes de funcionamiento se pueden obtener aproximadamente una ganancia o beneficio de \$637,59, esto se puede ver en la figura 3.4 siguiente:

Fig 3.4 Relación de costo - beneficio para el biodigestor



3.8. Cálculo del período de recuperación de la inversión

Datos:

$$Z_{DC} = \$10\,574,70$$

$$G = \$7013,49$$

$$\Phi = 1,05$$

$$\begin{aligned}
 PRI &= \frac{I}{G} \\
 PRI &= \frac{Z_{DC} \times \phi}{G(\$)} \\
 PRI &= \frac{\$10\,574,70 \times 1,05}{\$7013,49} \\
 PRI &= 1,5
 \end{aligned}
 \tag{3.35}$$

Esto quiere decir que con las ganancias obtenidas durante un año de funcionamiento de la instalación, es posible recuperar la inversión en menos de 2 años. El resto de las ganancias obtenidas, luego de pasado este tiempo se considerarán como ganancias económicas netas.

3.9. Análisis de sostenibilidad del biodigestor

3.9.1. Cálculo de la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera

Como el objetivo principal del uso de los biodigestores es lograr un adecuado manejo de los desperdicios orgánicos, lo cual comprende además la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono y el metano, las emisiones evitadas por la producción de biogás y la obtención de biofertilizantes se consideran como negativas.

$$e(CO_2) = CO_2(bmh) - [CO_2(bg) + CO_2(bfs)] \quad (3.36)$$

- ❖ Cálculo de la reducción de la emisión de CO₂ por la sustitución del combustible diésel mediante el uso del biogás producido

$$\begin{aligned} CO_2(bg) &= V(bg) \times Eq(ds) \times CO_2(ds) \\ CO_2(bg) &= 12,153 \text{ m}^3 \times 0,55 \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \times 2,596 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \\ CO_2(bg) &= 17,352 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.37)$$

- ❖ Cálculo de la reducción de la emisión de CO₂ por la utilización del biofertilizante sólido obtenido

$$\begin{aligned} CO_2(bfs) &= m(bfs) \times Ee(bfs) \times CO_2(Ee) \\ CO_2(bfs) &= 28,674 \text{ kg} \times 0,04364 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \times 0,385 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \\ CO_2(bfs) &= 0,482 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.38)$$

- ❖ Cálculo de la emisión de CO₂ debido al uso de combustible diésel para el transporte de la biomasa

$$\begin{aligned} CO_2(bmh) &= V(ds) \times CO_2(ds) \\ CO_2(bmh) &= 4 \text{ L} \times 2,596 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \\ CO_2 &= 10,384 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.39)$$

- ❖ Cálculo de la reducción total de emisión de CO₂

$$\begin{aligned}
e(CO_2) &= CO_2(bmh) - [CO_2(bg) + CO_2(bfs)] \\
e(CO_2) &= 10,384 - [17,352 \text{ kg} + 0,482 \text{ kg}] \\
e(CO_2) &= -7,45 \text{ kg}
\end{aligned}
\tag{3.40}$$

El resultado obtenido corrobora la hipótesis que plantean muchos de los estudiosos del tema del uso de los biodigestores y es que solamente para la instalación que estamos modelando se logra una reducción de emisión de más de 7 kg dióxido de carbono hacia la atmósfera por cada mes de funcionamiento, mediante el uso de los productos obtenidos de la digestión anaeróbica. Esto indica que la construcción de biodigestores, además de servir como herramienta para el manejo de muchos residuos orgánicos, y además de proveer un combustible natural con el cual puede sustituirse poco a poco la demanda de combustibles fósiles; colabora con las ideas actuales sobre la protección del medio ambiente y la lucha contra el cambio climático creado por el propio ser humano.

3.9.2. Cálculo del costo por daño al medio ambiente

Datos:

$$PCI(CH_4) = 49\,990,392 \text{ kJ/kg}$$

$$fm(CH_4) = 0,34816$$

$$\begin{aligned}
PCI(bg) &= PCI(CH_4) \times fm(CH_4) \\
PCI(bg) &= 49\,990,392 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 0,34816 \\
PCI(bg) &= 17\,404,655 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
\end{aligned}
\tag{3.41}$$

El valor obtenido de PCI para el biogás debemos referirlo al volumen obtenido, por lo tanto se multiplica por la densidad de este, obtenida en nuestros cálculos. Si se comprobó que el biogás obtenido posee una densidad de $1,130 \text{ kg/m}^3$ entonces el PCI(bg) sería $19\,667,260 \text{ kJ/kg}$.

Datos:

$$PCI(bg) = 0,020 \text{ GJ/m}^3$$

$$Eq(gn) = 0,65$$

$$CA(gn) = \$198,24/GJ$$

$$\begin{aligned} CA(bg) &= -[PCI(bg) \times Eq(gn) \times CA(gn)] \\ CA(bg) &= -\left[0,020 \frac{GJ}{m^3 \text{ de } bg} \times 0,65 \frac{m^3 \text{ de } bg}{m^3 \text{ de } gn} \times 198,24 \frac{\$}{GJ}\right] \\ CA(bg) &= -2,56 \frac{\$}{m^3 \text{ de } gn} \end{aligned} \tag{3.42}$$

Esto significa que por cada m³ de gas natural sustituido por biogás pudieran ahorrarse, de forma teórica, \$2,56 en daños al medio ambiente.

Conclusiones parciales del capítulo

Se realizaron los cálculos propuestos en la metodología y se obtuvieron los siguientes resultados:

- En el biodigestor modelado se producen $12,153\text{m}^3$ de biogás
- El biogás producido contiene en su composición química un 10,84% de C, 17,55% de H y 16% de O; si se compara con la composición total de la biomasa introducida, el resto de estos componentes pasa a formar parte de la composición del efluente
- Se obtuvo un rendimiento exergético del 19% para la instalación que limita la mayor producción de biogas
- Se calculó un factor exergoeconómico de 0,32 (32%)
- Es posible obtener una ganancia de \$639,57 al final de cada mes de funcionamiento de la instalación
- Se calculó para el biodigestor un período de recuperación de la inversión de un año y medio
- Es posible reducir la emisión de $7,45\text{ kg CO}^2$ si se utilizan los subproductos obtenidos del biodigestor

CONCLUSIONES

1. Se indagó acerca del comportamiento actual de las tecnologías derivadas del uso del biogás y los biodigestores a nivel mundial, así como los tratamientos que existen y deben de aplicarse al biogás para que pueda convertirse en un combustible de alto estándar.
2. Se elaboró una metodología que permitió evaluar un biodigestor anaeróbico rectangular de cúpula fija y realizarle un análisis termoeconómico para conocer su producción de manera teórica. Además mediante cálculos se determinó la eficiencia exergética del sistema y la factibilidad económica de su implementación.
3. Se valoró la importancia de la digestión anaeróbica de los residuos orgánicos para el medio ambiente mediante un análisis de sustentabilidad que calculó la reducción de emisión de CO₂ hacia la atmósfera, el cual arrojó que con la utilización de los productos obtenidos es posible reducir en 7 kg al mes este tipo de contaminación.
4. Con los productos obtenidos en el biodigestor estudiado (biogás y biofertilizantes) es posible obtener ganancias económicas que superan los \$600 mensuales, si se pudieran utilizar para sustituir el combustible y los fertilizantes industriales.
5. En la modelación se obtuvo una producción de biogás de 12,153 m³, la cual puede utilizarse para la cocción de alimentos o para sustituir aproximadamente 7 L de combustible diésel, combustible que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica o para la combustión en automóviles *dual fuel*.
6. El biodigestor modelado posee un rendimiento del 19% debido a que sólo se considera como utilizable, la energía calorífica del biogás producido. Cuando se comparan estos valores con los de rendimiento exergético obtenido para las plantas de biogás industriales, se nota una diferencia puesto que en los últimos existe un mayor aprovechamiento de la exergía proveniente de la materia orgánica y esto permite una producción unitaria de biogás superior partiendo de utilizar

removedores, calentamiento e inóculos, así como una biomasa de mayor potencialidad.

RECOMENDACIONES

1. Continuar con la investigación de la producción unitaria de biogás en un biodigestor anaeróbico en función de la cantidad de biomasa utilizada, su contenido energético, humedad y posibles combinaciones para la codigestión.
2. Investigar cómo se comporta el rendimiento exergético para los biodigestores anaeróbicos más utilizados en nuestro país.
3. Comprobar si existe la comercialización del biogás y los biofertilizantes obtenidos por los biodigestores dentro de nuestro país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELIDAKI, I., TREU, L., TSAPEKOS, P., LUO, G., CAMPANARO, S., WENZEL, H. & KOUGIAS, P. G. 2018. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 15.
- BENJAN, A., TSATSARONIS, G. & MORAM, M. 1997. Thermal design and optimization.
- CENDALES LADINO, E. D. 2011. *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable*. Máster, Universidad Nacional de Colombia.
- CEPERO, L., SAVRAN, V., BLANCO, D., DÍAZ PIÑÓN, M. R., SUÁREZ, J. & PALACIOS, A. 2012. Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes*. 2 ed. Estación Experimental de Pastos y Forrajes "Indio Hatuey".
- COLOMER MENDOZA, F. J., GALLARDO IZQUIERDO, A., ROBLES MARTÍNEZ, F., BOVEA, M. D. & HERRERA PRATTS, L. 2010. Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales. *Ingeniería* [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228512933>.
- CHACHA PUMASUNTA, J. M. & FLORES ERREYES, A. D. 2017. *Implementación de un biodigestor piloto unifamiliar para la obtención y caracterización de biogás de uso calorífico a base de estiércol vacuno*. Ingeniero, Universidad Técnica de Cotopaxi.
- CHEN, S., LIAO, W., LIU, C., WEN, Z., KINCAID, R. L., HARRISON, J. H., ELLIOTT, D. C., BROWN, M. D., SOLANA, A. E. & STEVENS, D. J. 2003. Value - Added Chemicals from Animal Manure. Final Technical Report. *Pacific Northwest National Laboratory United States Department of Energy*. Richland, Washington: Washington State University.
- FINANZAS Y PRECIOS, M. D. 2015. Resolución No. 236. In: PRECIOS, M. D. F. Y. (ed.). La Habana, Cuba.
- FREIRE MONTENEGRO, S. M. 2018. *Análisis geográfico para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia de residuos agropecuarios basados en criterios de sustentabilidad*. Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, L. E. 2015. *Evaluación de un sistema de codigestión anaeróbica de residuos orgánicos*. Máster en Ciencias Ambientales, Universidad Veracruzana.
- HOLM-NIELSEN, J. B., AL SEADI, T. & OLESKOWICZ-POPIEL, P. 2008. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100, 7.
- LAMBERT, M. 2017. Biogas: A significant contribution to decarbonising gas markets? Available: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2017/06/Biogas-A-significant-contribution-to-decarbonising-gas-markets.pdf>.
- LOZANO SERRANO, M. Á. 1997. Aplicaciones termoeconómicas del método exergético. *Departamento de Ingeniería Mecánica* [Online].
- LUQUE, R., KI LIN, C. S., WILSON, K. & CLARK, J. 2016. Handbook of biofuels production. In: RAFAEL LUQUE, C. S. K. L. & CLARK, K. W. A. J. (eds.) Segunda Edición ed. Amsterdam: Joe Hayton.

- MARTIN, M. & PARSAPOUR, A. 2012. Upcycling wastes with biogas production: An exergy and economic analysis. *Environmental Technology and Management*, 16.
- NUREÑA DÍAZ, M. J., SIFUENTES INOSTROZA, T. & DE LA ROSA BOCANEGRA, F. 2016. Estudio técnico - económico de generación de energía eléctrica - ciclo Brayton utilizando biogas, para autoabastecimiento de energía y disminuir el consumo de combustible en calderas de la empresa Danper S. A. C. – Trujillo. *Tecnología & Desarrollo*. 1 ed.: Universidad César Vallejo.
- PAGÉS DÍAZ, J. 2012. *Potencialidad de residuos agroindustriales para producir biogás*. Maestría Tesis de Maestría, CUJAE.
- PALA REYES, H. M. 2006. *Estudio del potencial energético a partir de los residuos sólidos en algunos distritos del cono norte de Lima Metropolitana*. Ingeniero Mecánico Científica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- PÉREZ-BORROTO CALDERÍN, L. 2014. *Diseño de un biodigestor para el tratamiento de excretas de cerdos y gallinas domésticas con fines energéticos*. Ingeniero, Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".
- PÉREZ GONZÁLEZ, Y. 2016. Evaluación ex post del proyecto biodigestores de geomembrana para el tratamiento de los residuales orgánicos en ecosistemas productivos de montaña. *Agrisost*, 23, 13.
- SAHOTA, S., SHAH, G., GHOSH, P., KAPOOR, R., SENGUPTA, S., SINGH, P., VIJAY, V., SAHAY, A., KUMAR VIJAY, V. & THAKUR, I. S. 2018. Review of trends in biogas upgradation technologies and future perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 48.
- SALAZAR CUAILA, J. L., AMUSQUIVAR COAQUIRA, C., LLAVE PEREZ, J. J. & RIVASPLATA CABANILLAS, C. 2012. producción de biogás y biol a partir de excretas de ganado: Experiencias en la ciudad de Tacna. *XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente*, 12.
- SÁNCHEZ PORTILLA, F. & VIZCÓN TOLEDO, R. 2017. La Codigestión de Residuos Orgánicos: una contribución energética, ambiental y de salud humana. *Revista de Ingeniería Energética*. 3 ed. Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas: Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría.
- SEBASTIÁN NOGUÉS, F., GARCÍA GALINDO, D. & REZEAU, A. 2018. *Energía de la biomasa II (Energías Renovables)*, Zaragoza, España, Universidad de Zaragoza.
- SERRATO MONROY, C. C. & LESMES CEPEDA, V. 2016. *Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el departamento de Cundinamarca*. Ingeniería Eléctrica Científica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- STARR, K., VILLALBA, G. & GABARRELL, X. 2015. Upgraded biogas from municipal solid waste for natural gas substitution and CO2 reduction – A case study of Austria, Italy, and Spain. *Waste Management*, 38, 105-116.
- SUÁREZ, J. E. A. 2011. Experiencias del proyecto BIOMAS-CUBA. Alternativas energéticas a partir de la biomasa en el medio rural cubano. *Pastos y Forrajes*. 4 ed. Estación Experimental de Pstos y Forrajes "Indio Hatuey".

- TAY LEÓN, M. M. 2017. *Rendimiento de biogás y biofertilizantes en la Digestión Anaerobia de estiércol de animales y rastrojos en Lambayeque*. Máster, Universidad Nacional "Pedro Ruiz Gallo".
- ULLAH KHAN, I. E. A. 2017. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilization and storage. *Energy Conversion and Management*, 150, 18.
- VALDIMARSSON, P. 2011. Basic concepts of thermoeconomics. In: UNIVERSITY, U. N. & PROGRAMME, G. T. (eds.) *Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants*. Santa Tecla, El Salvador.
- VEZIROGLU 2002. Economic estimation of environmental impact due utilization of fossil fuels. *SISJAE*.

ANEXOS

Anexo 1: Tecnologías para el mejoramiento del biogás

Table 1 Comparison of different pilot and commercial biogas upgrading technologies

	Cryogenic	Sabatier process	PSA	Water scrubbing	Physical scrubbing	Chemical absorption	Membrane separation
Consumption for raw biogas (kWh/Nm ³)	0.76	nf	0.23–0.30	0.25–0.3	0.2–0.3	0.05–0.15	0.18–0.20
Consumption for clean biogas (kWh/Nm ³)	nf	nf	0.29–1.00	0.3–0.9	0.4	0.05–0.25	0.14–0.26
Heat consumption (kWh/Nm ³)	nf	nf	None	None	< 0.2	0.5–0.75	None
Heat demand (°C)	– 196	270			55–80	100–180	
Cost	High	Medium	Medium	Medium	Medium	High	High
CH ₄ losses (%)	2	nf	< 4	< 2	2–4	< 0.1	< 0.6
CH ₄ recovery (%)	97–98	97–99	96–98	96–98	96–98	96–99	96–98
Pre-purification	Yes	Recommended	Yes	Recommended	Recommended	Yes	Recommended
H ₂ S co-removal	Yes	No	Possible	Yes	Possible	Contaminant	Possible
N ₂ and O ₂ co-removal	Yes	No	Possible	No	No	No	Partial
Operation pressure (bar)	80	8–10	3–10	4–10	4–8	Atmospheric	5–8
Pressure at outlet (bar)	8–10		4–5	7–10	1.3–7.5	4–5	4–6

nf: not found

Extract from Angelidaki, I., *Biotechnology Advances* (2018)

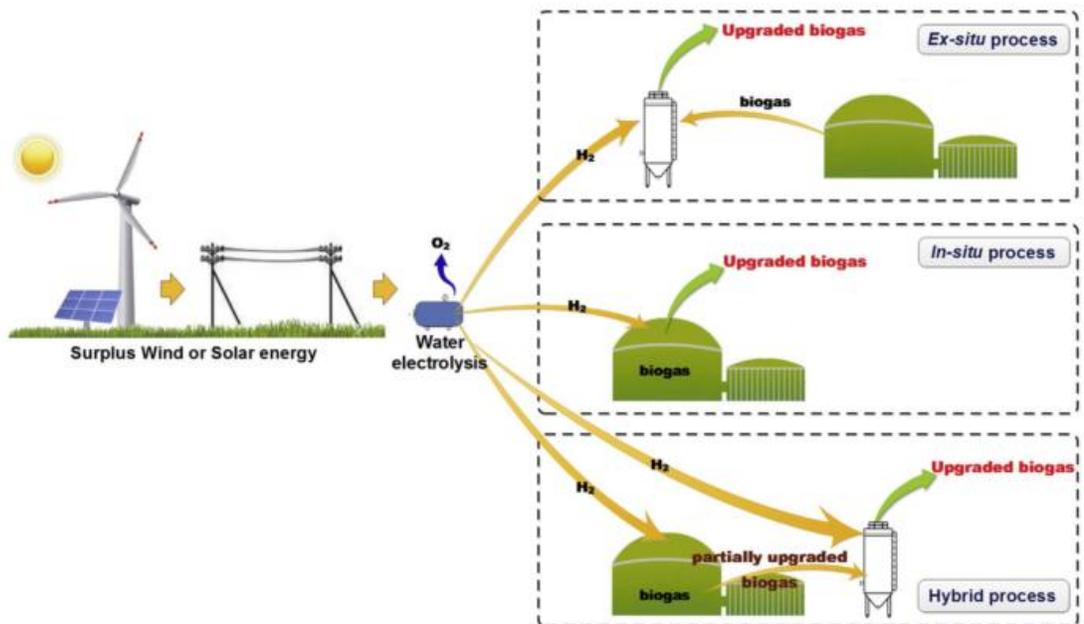


Fig 1 In-situ, ex-situ and hybrid biological biogas upgrading technologies based on hydrogen methanation. Extract from Angelidaki, I., *Biotechnology Advances* (2018)

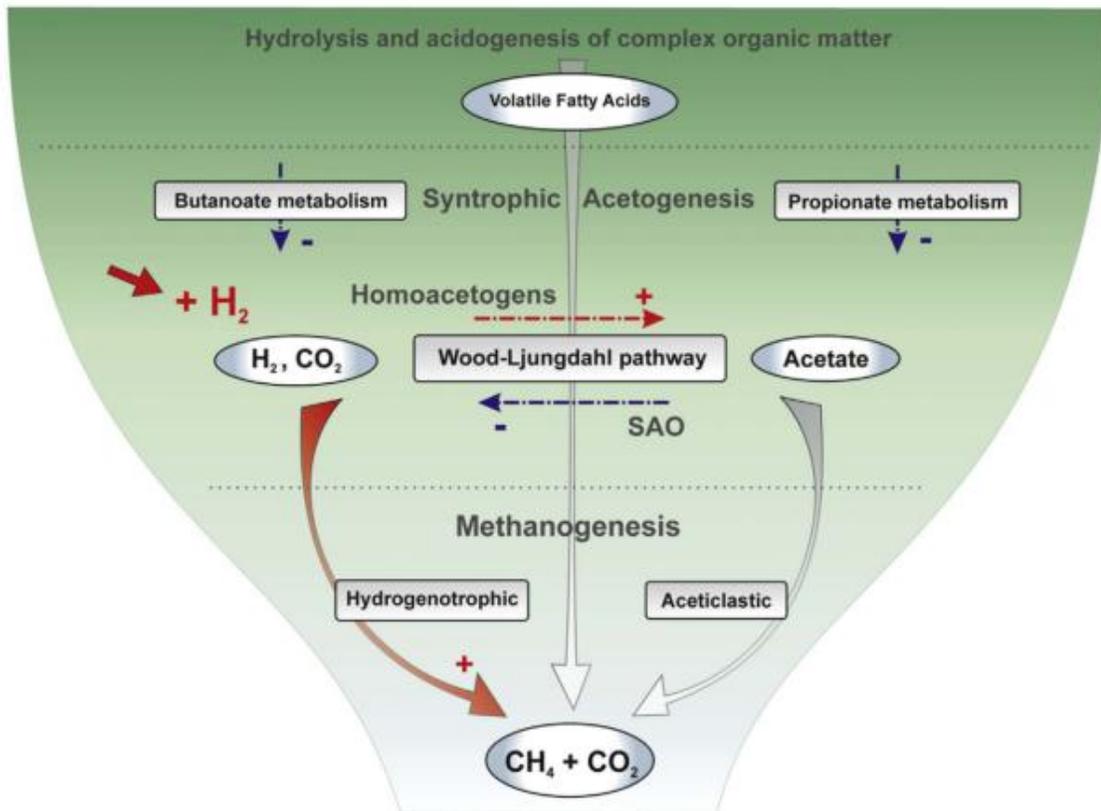


Fig 2 Metabolic pathways for hydrogen assisted methanogenesis. Extract from Angelidaki, I., *Biotechnology Advances* (2018)

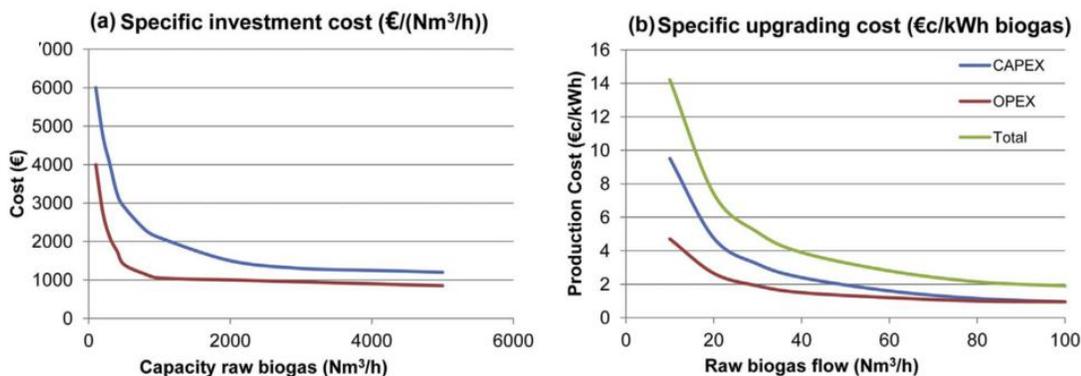


Fig 3 Economic feasibility of biogas upgrading; a) Cost data and economy-of-scale of the investment in physicochemical biogas upgrading. High-low interval including all existing upgrading technologies., b) Specific total biogas upgrading costs including amortized CAPEX and OPEX for small scale PSA units. Extract from Angelidaki, I., *Biotechnology Advances* (2018)

Anexo 3: Resultados de la investigación. Obtenidos mediante el empleo de EXCEL

Balance de masa	
Cantidad de biogás obtenido (m3)	12,153
Cantidad de biogás obtenido (kg)	13,738
Cantidad de biofertilizante sólido obtenido (kg)	28,674
Cantidad de biofertilizante líquido obtenido (kg)	1008,968

Balance de costos	
Costo del biogás producido (\$)	\$133,68
Costo del biofertilizante sólido obtenido (\$)	\$84,59
Costo del biofertilizante líquido obtenido (\$)	\$504,48
Costo del agua utilizada (\$)	\$5,16
Costo de la biomasa empleada (\$)	\$80,00
Ganancia (\$)	\$637,59

Balance de reducción de las emisiones de CO2	
Reducción de emisión de CO2 por sustitución del diésel por el biogás (kg de CO2)	17,352
Reducción de emisión de CO2 por la obtención de biofertilizantes (kg de CO2)	0,482
Emisión de CO2 por concepto de transporte de la biomasa (kg de CO2)	10,384
Reducción total de emisiones de CO2 (kg de CO2)	7,45

Balance de exergía	
Valor exergético de la mezcla introducida (kJ)	1278448,746
Valor exergético del biogás obtenido (kJ)	239125,081
Exergía perdida y destruida en el proceso (kJ)	1039323,665
Rendimiento exergético del biodigestor (%)	19%

Análisis de flujo de costo de producción	
Flujo de costo de inversión del biodigestor (\$/h)	0,12
Flujo de costo del agua utilizada (\$/h)	0,01
Flujo de costo de transporte de la biomasa (\$/h)	0,11
Flujo de costo de producción del biogás y los biofertilizantes (\$/h)	0,24

Análisis de costo exergoeconómico	
Costo exergoeconómico de inversión del biodigestor (\$/MJ)	0,21
Costo exergoeconómico del agua utilizada (\$/MJ)	0,02
Costo exergoeconómico de transporte de la biomasa (\$/MJ)	0,33
Costo exergoeconómico del biogás producido (\$/MJ)	0,56