



**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN BIORREACTOR
TIPO BATCH PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS Y
BIOFERTILIZANTES A PARTIR DE RESIDUOS
ORGÁNICOS (URBANOS Y AGRICOLAS)**

BRAYAN ELÍAS VARGAS NIÑO

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química

Pamplona, Colombia

2019

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN BIORREACTOR
TIPO BATCH PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS Y
BIOFERTILIZANTES A PARTIR DE RESIDUOS
ORGÁNICOS (URBANOS Y AGRICOLAS)**

BRAYAN ELIAS VARGAS NIÑO

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Químico

Director:

JACIPT ALEXANDER RAMON VALENCIA

INGENIERO QUIMICO

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química

Pamplona, Colombia

2019

Agradecimientos

“En primer lugar a Dios por abrir los caminos necesarios para que todo se desarrollara de la forma que siempre he necesitado... A mi familia, en especial a mi padre y mi madre por el apoyo incondicional y la fe y confianza que han puesto en mí, a las personas que han aportado conocimiento de todo tipo y apoyo incondicional en mi etapa de aprendizaje y madurez, a aquellos profesores y compañeros que supieron alentarme y motivarme permitiéndome amar esta hermosa carrera”.

“Agradezco enormemente al grupo de investigación de Biotecnología ambiental del semillero SIAAS, por el apoyo en el desarrollo y divulgación del proyecto en los diferentes eventos y seminarios a lo largo del territorio nacional, a sus integrantes los cuales participaron en los proyectos derivados de este, en especial a mi director Jacipt Alexander Ramon por su aporte profesional, experiencia y gestión en el desarrollo del proyecto y a mi compañera Darly Carolina Lenis, quien con su apoyo, ideas y conocimientos se logró llegar al termino que se había planteado”.

Resumen

El proyecto se centra en trabajar el proceso de biodigestión anaerobia de desechos orgánicos como un proceso con potencial industrial, con el fin de llevarlo desde un punto de vista de solución de desechos a un proceso que puede ofrecer productos de valor agregado como el biogás y los biofertilizantes que se hagan espacio en el mercado. Este proyecto se planteó inicialmente con la caracterización mediante análisis fisicoquímicos de los residuos orgánicos provenientes de la zona urbana y rural (desechos orgánicos urbanos y agrícolas), con el fin de establecer los compuestos volátiles y microorganismos que se puedan presentar en estos. Posteriormente se establecieron las cinéticas sobre las cuales se planteó un mecanismo de simulación por medio de la resolución de ecuaciones diferenciales (propias de la cinética del proceso obtenidas de la bibliografía) con el método iterativo de Runge-Kutta en Matlab; mecanismo con el cual se analizaron los comportamientos arrojados de la generación de productos y consumo de sustratos del proceso, la eficiencia del proceso en cuanto a sustrato consumido y productos generados y la selectividad del proceso hacia la producción de biogás; así mismo se planteó la optimización del proceso ajustando las variables de operación; a partir de todo lo anterior se desarrolló el diseño de un prototipo reactor biológico tipo batch a escala de laboratorio que opere a condiciones óptimas, establecidas por una metodología desarrollada con base a los análisis de sensibilidad de las simulaciones previas.

Palabras clave: residuos orgánicos, simulación, biogás, biorreactor

Lista de Tabla

Tabla 1 Tipo de fermentación y productos generados. ¹⁰	27
Tabla 2 Reacciones dadas durante el proceso de digestión anaerobia. ⁹	29
Tabla 3 Tabla de propiedades de reactor de tanque de agitación. Fuente: Guía del biogás republica alemana ¹²	31
Tabla 4 Propiedades de reactores de biogás con flujo pistón Fuente: Guía del biogás republica alemana.....	33
Tabla 5 Componentes de materias primas. Fuente: guía de biogás república alemana. ¹²	43
Tabla 6 Características de matrerías prima, varias. Fuente: Manual de biogás de Chile. ¹²	44
Tabla 7 Tipos de bacterias para el proceso de biodigestión anaerobia. Fuente: guía de biogás república alemana. ¹²	45
Tabla 8 Valores de los parámetros cinéticos citando a Lawrence y McCarthy. ²²	49
Tabla 9 Parámetros cinéticos y estequiometricos. ²²	49
Tabla 10 Parámetros cinéticos (día-1) para modelos de simulación dinámica ²³	53
Tabla 11 Constantes cinéticas (día-1) para modelos de simulación dinámica ²³	53
Tabla 12 . Variables de entrada para balance de masa ^{11, 12, 25}	57
Tabla 13 Condiciones de entrada de la materia prima.....	58
Tabla 14 Condiciones de entrada para balance de energía.....	60

Tabla 15 Condiciones arrojadas por la simulación A con desechos de jardinería y agrícolas.....	71
Tabla 16 Condiciones arrojadas por la simulación A con residuos de jardinería y agrícola.	72
Tabla 17 Condiciones arrojadas por la simulación A con residuos de curtiembres.	73
Tabla 18 Condiciones arrojadas por la simulación B con residuos de curtiembres.	74

Lista de Figuras

Figura 1 Digestión anaerobia tipo india, fuente: Manual de biogás de Alemania ¹²	12
Figura 2 Compostaje para el proceso aerobio. fuente: bortziriakzabor ¹⁸	13
Figura 3 Proceso de producción de biogás. Fuente: Guía del biogás republica alemana ¹²	20
Figura 4 Proceso de digestión anaerobio. Fuente: SPENA GROUP ¹⁹	22
Figura 5 Fases del proceso de digestión anaerobia: (1) hidrólisis, (2) acidogénesis, (3) acetogénesis, (4) metanogénesis, (5) sulfurogénesis. ³	25
Figura 6 Reactor de tanque de agitación. Fuente: Evaluación técnica y económica de una planta de biogás ¹³	31
Figura 7 Digestor de tanque horizontal. Fuente: Reactor de tanque de agitación. Fuente: (guía del biogás republica alemana) ¹²	32
Figura 8 Reactor de domo flotante. Fuente: (evaluación técnica y económica de una planta de biogás) ¹³	34
Figura 9 Reactor de domo fijo. Fuente: (evaluación técnica y económica de una planta de biogás) ¹³	35
Figura 10 Proceso anaeróbico de contacto (PAC). Fuente: (evaluación técnica y económica de una planta de biogás) ¹³	36
Figura 11 Reactor químico tipo batch con enchaquetado, escala laboratorio ¹⁶	39
Figura 12 Eficiencia de materia prima ¹⁷	42
Figura 13 Modelos para la determinación de las constantes cinéticas. ²¹	47
Figura 14 Constantes a, b, c y d para la determinación de Kt. ²¹	47

Figura 15 Esquema general de la metodología de optimización por análisis de sensibilidad.	50
Figura 16 Esquema general de la conservación de la masa y la energía. ²⁴	56
Figura 17 Balance de Masa de un Reactor Tipo batch.	56
Figura 18 Balance de materia global para el reactor Batch que se propone en este trabajo.	57
Figura 19 Representación gráfica genérica del balance de materia para el reactor tipo batch a trabajar.	58
Figura 20 Representación gráfica genérica del balance de materia para el reactor tipo batch a trabajar	59
Figura 21 Prototipo de reactor tipo Batch con enchaquetado. ²⁶	61
Figura 22 P&ID de un reactor tipo batch con sistemas de control integrados. ²⁸	63
Figura 23 Grafico del comportamiento de biodigestión caso 2.....	66
Figura 24 Grafico del comportamiento de biodigestión caso 3.....	67
Figura 25 Grafico del comportamiento de biodigestión caso 4.....	68
Figura 26 Grafico del comportamiento del proceso de acidogénesis caso 5.....	69
Figura 27 Comportamiento de la simulación A de digestión con residuos de jardinería y agrícolas.....	70
Figura 28 Simulación B del comportamiento de digestión con residuos de jardinería y agrícola..	71
Figura 29 Simulación A del comportamiento de digestión con residuos de curtiembres.	73
Figura 30 Simulación B del comportamiento de digestión con residuos de curtiembres.	74
Figura 31 Representación de reactor tipo batch con cargas másicas y flujos de calor calculados con los balances.	76

Nomenclatura

K_t = constante cinética de velocidad de reacción

O_2 = concentración de oxígeno

T = Temperatura

C = concentración de CO_2

M_c = porcentaje de humedad

μ = Constante específica de crecimiento celular

K_s = constante de saturación por

μ_{max} = máxima velocidad específica de crecimiento celular

S = sustrato

X = concentración de biomasa

t = tiempo

Y_{px} = rendimiento de biogás en función de la biomasa

Introducción

La biodigestión en muchas partes del mundo se ve asociada únicamente a la eliminación de residuos, por lo que no es común encontrar procesos de biodigestión técnicamente elaborados, ni mucho menos, estudios de reactores biológicos con diseños elaborados con características específicas, generados por estudios rigurosos que lleven el proceso de biodigestión a un plano industrial y que no solo se vea limitado por un proceso que soluciona un problema ambiental de residuos. Este proyecto se desarrolló con el fin de estructurar el diseño conceptual de un reactor biológico que opere de una forma óptima, controlada y eficiente para el proceso de biodigestión (biocompostaje), por medio de mecanismos de simulación y optimización de procesos, debido a que la biodigestión se perfila como una prometedora alternativa para la obtención de biocombustibles amigables con el medio ambiente. La biodigestión se fundamenta en la descomposición de desechos orgánicos por acción de microorganismos que se encargan de romper los enlaces de cadenas carbonatadas gigantes convirtiéndolas eventualmente en compuestos más simples, dichos procesos de descomposición se producen de forma progresiva hasta obtener compuestos de interés, por lo cual no requiere un permanente control externo, debido a que las reacciones de transformación se dan de forma espontánea, esta es la razón por la cual no es común realizar estudios exhaustivos para el planteamiento de metodologías técnicamente elaboradas del

proceso. El proyecto surge también con la necesidad de transformar el proceso de biodigestión, desde una simple alternativa para la eliminación de desechos a un proceso de transformación biológica industrialmente viable, con metodologías de operación técnicamente elaborados.

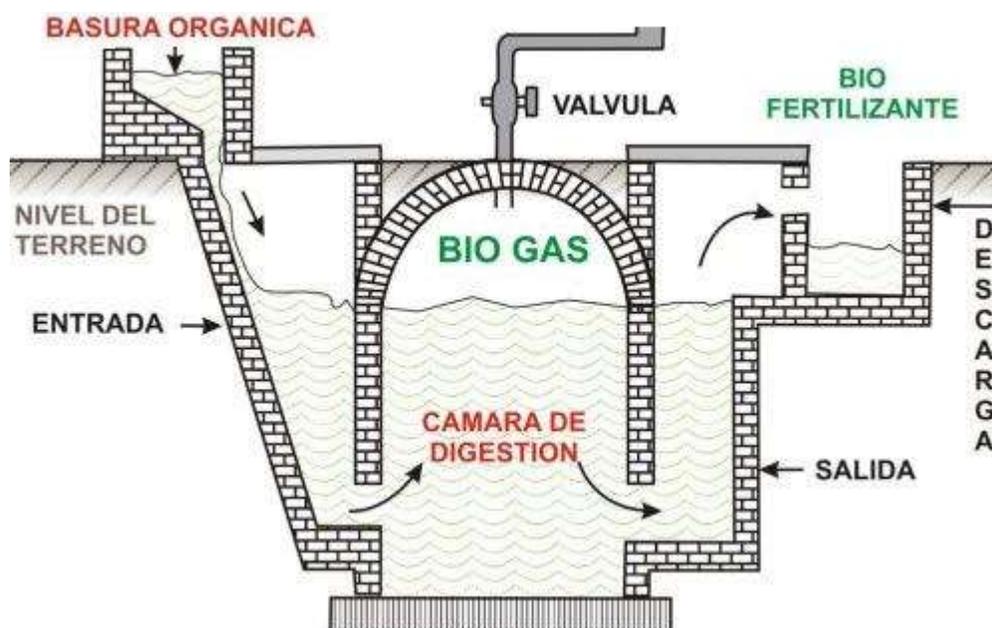


Figura 1 Digestión anaerobia tipo india, fuente: Manual de biogás de Alemania¹²

Un campo muy explorado es la obtención de biocombustibles producto de procesos biológicos, los cuales en su mayoría (como se mencionó anteriormente) son ejecutados en la misma naturaleza de manera espontánea pero que con el adecuado manejo, supervisión y control del ser humano pueden convertirse en un rentable y sostenible mecanismo de obtención de combustibles. Este proyecto analizará de forma detallada el diseño de un reactor biológico que desarrolle eficientemente el proceso de obtención de biogás y productos biofertilizantes y

posibles subproductos a partir de residuos orgánicos, a condiciones óptimas de operación. Las etapas de descomposición dependen del ambiente en el que trabajan los microorganismos, ya sea un ambiente aerobio (presencia de oxígeno) o anaerobio (ausencia de oxígeno), en los dos procesos se producen compuestos sólidos ricos en potasio (K) fósforo (P) y calcio (Ca) que son generalmente utilizados como biofertilizantes en la industria agrícola; la gran diferencia entre los dos procesos es que cuando se produce la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno se producen, además, gases como el metano el cual tiene innumerables aplicaciones en las industrias, principalmente su utilización como combustible. Un mecanismo de producción de combustibles que utiliza residuos orgánicos como materia prima, sin duda alguna, tiene lugar en la industria a granel, aportando soluciones no solo a problemas energéticos sino también, a problemas medioambientales.



Figura 2 Compostaje para el proceso aerobio. fuente: bortziriakzabor ¹⁸

Esta propuesta se centra fundamentalmente en el análisis de las variables que pueden llegar a incidir de forma directa o indirecta en el proceso de biocompostaje (biodigestión) con el fin de, posterior a un estudio detallado, ajustarlas debidamente para obtener la mayor eficiencia posible en el proceso.

Dicho análisis regirá desde el tipo de materia orgánica a descomponer (procedencia, composición, proporción) hasta las variables de proceso (pH, temperatura, concentraciones, humedad) y finalmente el posterior análisis de los productos obtenidos (pureza del biogás, composición de fertilizantes, adecuación y almacenaje de estos); todo esto con el fin del constante mejoramiento y optimización del proceso, aumentando de manera progresiva la eficiencia de este. Para el estudio se tendrán en cuenta las características de los desechos orgánicos. Partiendo de lo anterior surge la ineludible necesidad de buscar mecanismos que mejoren la eficiencia del proceso de forma significativa, es por ello por lo que se ha planteado en la propuesta establecer distintos mecanismos de adecuación del proceso en pro de llevarlo a un nivel mucho más beneficioso PRESERVANDO SIEMPRE LA IDEA DE TENER REPERCUSIONES POSITIVAS EN EL MEDIOAMBIENTE. Las implementaciones de dichos mecanismos de adecuación se irán ejecutando una vez se tenga el control absoluto del proceso de biodigestión y el extenso conocimiento de este que implica manipularlo. Como se mencionó antes, el proyecto busca el estudio de las variables que pueden incidir de forma directa e indirecta en la producción de biogás y biofertilizantes a partir de residuos orgánicos específicamente en un reactor biológico tipo batch. Inicialmente se estudia el proceso a profundidad con el propósito de conocerlo de forma detallada, analizando las cinéticas de generación de productos, consumo de sustratos y crecimiento celular. Así mismo las cinéticas de comportamiento del proceso de biodigestión que se dan lugar en un reactor tipo batch, están sujetas a parámetros y condiciones de operación, así como características fisicoquímicas

de las materias primas a utilizarlo cual brinda información robusta del proceso mismo y un camino sobre el cual se puede manipular en busca de configuraciones optimas de operación.

Objetivos

Objetivo General

Realizar un diseño conceptual un reactor biológico para la producción de biogás y biofertilizantes a partir de residuos orgánicos (urbanos y agrícolas) partiendo de la cinética del proceso de biodigestión anaerobia con el fin de plantear una metodología optima de operación del proceso.

Objetivos específicos

- Realizar una caracterización de los residuos orgánicos a utilizar como materia prima, a través de los parámetros fisicoquímicos e información obtenida de la literatura, para la determinación de compuestos volátiles y bioquímica presentes en estas.
- Realizar la simulación que represente el comportamiento del proceso de biodigestión.
- Establecer una metodología con base en configuraciones de operación óptima (parámetros cinéticos, pH, temperatura, humedad, % de oxígeno) para el proceso de Biodigestión para la obtención de biogás y biofertilizantes a partir de residuos orgánicos.

- Diseñar el prototipo de un reactor tipo batch para la degradación de materia orgánica utilizando ecuaciones y balances de materia y energía que gobiernan los procesos anaerobios para la obtención de biogás.

Capítulo 1: Marco teórico

1. PROCESO DE BIODIGESTION (CONCEPTOS, EQUIPOS, PROCESAMIENTO, IMPACTOS SOCIAL, ECONOMICO Y AMBIENTAL)

1.1. El proceso de biodigestión:

Cuando llenamos el digestor con materiales orgánicos y agua se desarrolla un proceso bioquímico que va descomponiendo gradualmente la materia orgánica, produciendo burbujas de biogás que suben a la parte alta del digestor donde el biogás se acumula, para ser luego consumido por nosotros¹, representa el correcto manejo de los residuos orgánicos se logra a través de diferentes tratamientos que implican un reciclaje de estas materias orgánicas, transformándolas en productos con valor agregado. El reciclaje de materia orgánica ha recibido un fuerte impulso con el alto costo de los fertilizantes químicos, con la búsqueda de alternativas no tradicionales de energía, así como también, la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos.²

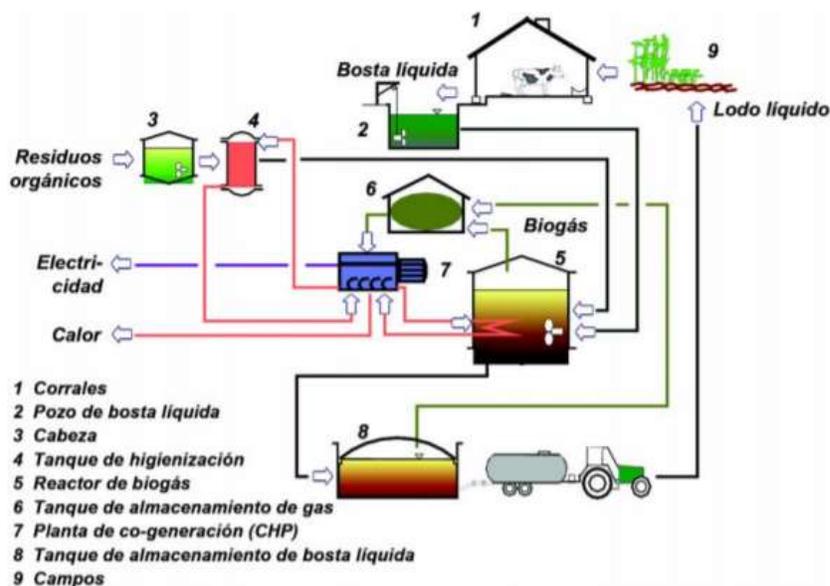


Figura 3 Proceso de producción de biogás. Fuente: Guía del biogás republica alemana¹²

Como fruto de este proceso se obtiene un gas combustible o biogás que posee aproximadamente 66% de metano y 33% de dióxido de carbono²⁷, el cual puede ser utilizado y convertido en forma de energía para sustentar algún requerimiento como calefacción, generación de energía entre otros. Adicionalmente el efluente generado es un compuesto rico en nutrientes y un fertilizante de importantes propiedades para el suelo. ¹

1.1.2. Digestión anaerobia:

Su aplicación tecnológica como fuente productora de energía data del siglo X a.C. en Asiria, donde se cree se utilizaba el biogás para calentar agua, al igual que en Persia en el siglo XVI. La primera referencia científica al biogás se sitúa en el s. XVII, cuando Jan Baptista van Helmont determinó que los gases inflamables

podían tener origen en la descomposición de la materia orgánica. ³Este proceso se aplica actualmente para el tratamiento de prácticamente cualquier residuo de origen orgánico y como proceso productor de energía renovable (el biogás) a partir de cualquier material orgánico, excepto la madera, es un proceso biológico complejo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores. Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. Debido a que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en biogás (CH₄, CO₂, H₂, H₂S, etc.) que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación, ⁴En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico.⁵

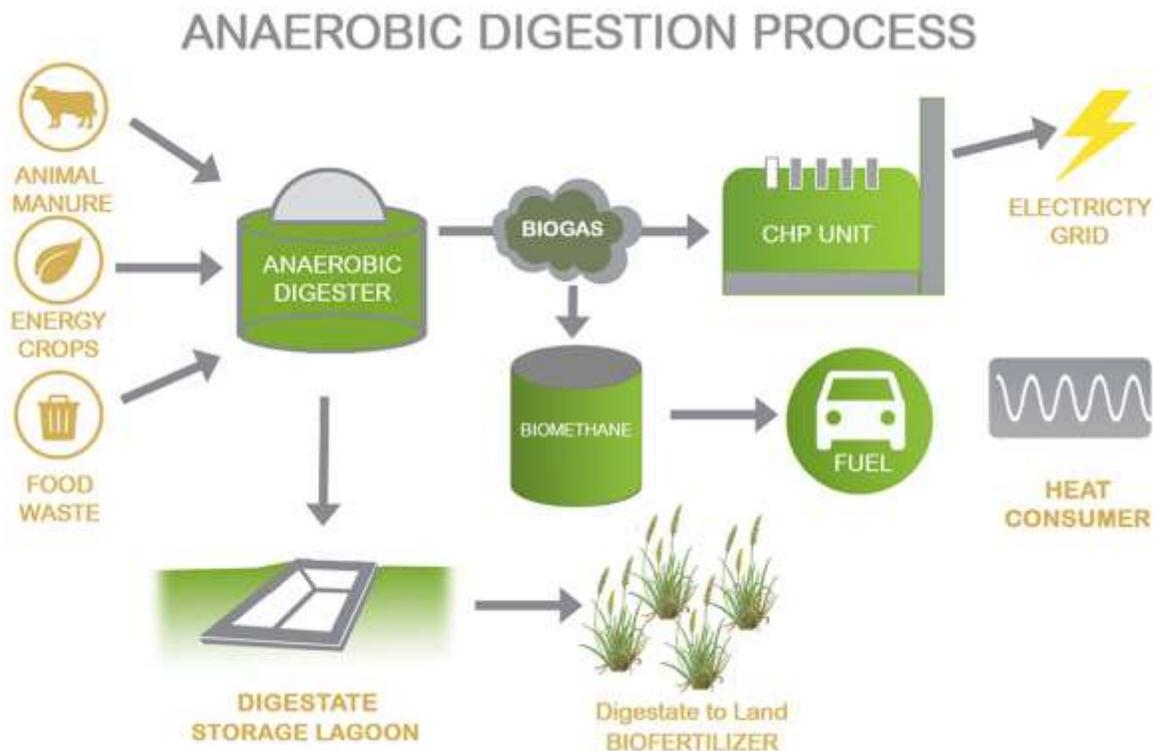


Figura 4 Proceso de digestión anaerobio. Fuente: SPENA GROUP¹⁹

1.1.2. Biomasa

Muchos productos se basan en el uso controlado de microorganismos: vino, chicha, cerveza, queso, yogurt, levaduras, compostaje, son todos productos de la acción de algún tipo de microorganismos. A la misma manera podemos dejar que los microorganismos del biogás trabajen para nosotros en depósitos cerrados llamados digestores ⁶

Es cualquier material de tipo orgánico proveniente de seres vivos que puede utilizarse para producir energía. Se produce al quemar biomasa, como madera o plantas. Utilizan tecnologías que dependen de la cantidad y clase de biomasa

disponible. Con los principales sistemas de transformación pueden obtenerse combustibles, energía eléctrica, fuerza motriz o energía térmica. Este tipo de energía emite poco dióxido de carbono y podría ser una solución a los métodos alternativos para eliminar desechos (entierro de basura y quema al aire libre).

En Colombia se tienen estudios de producción de biomasa con el bagazo de la caña, que se estima una producción anual de 1.5 millones de toneladas y de cascarilla de arroz, con la que se producen más de 457.000 toneladas al año. Las zonas más adecuadas para generar esta energía son los Santanderes, los Llanos Orientales y la Costa Atlántica.⁷

En general cualquier substrato puede ser utilizado como biomasa en cuanto contengan carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa como componentes principales. Para seleccionar la biomasa se deben tener en cuenta los siguientes puntos.⁴

- El contenido de sustancias orgánicas debe ser el apropiado para el tipo de fermentación elegido.
- El valor nutricional de la sustancia orgánica se relaciona directamente con el potencial de formación de biogás, por ende se busca que sea lo más alto posible. El substrato debe estar libre de agentes patógenos que puedan inhibir el proceso de fermentación.
- El contenido de sustancias perjudiciales o tóxicas debe ser controlado para permitir una tranquila evolución de la fermentación.

- Es importante que el resultado final del sustrato (después de haber aprovechado la fermentación para generar biogás) sea un desecho utilizable como por ejemplo fertilizante.

1.2. Etapas de degradación

La transformación de las moléculas que conforman la materia orgánica son dos, la fase no metanogénica (hidrólisis y acidogénesis) y la fase metanogénica (acetogénesis y metanogénesis) y esta clasificación corresponde a las poblaciones de microorganismos que desarrollan el proceso de degradación, ya sean bacterias facultativas o de índole netamente anaerobia. La diferencia fundamental es que la primera fase se puede desarrollar en presencia de oxígeno, la segunda es estrictamente anaerobia. ¹

Las cuatro etapas principales son: la hidrólisis (1), la acidogénesis (2), la acetogénesis (3) y la metanogénesis (4). También encontramos la sulfurogénesis como etapa alternativa (5)

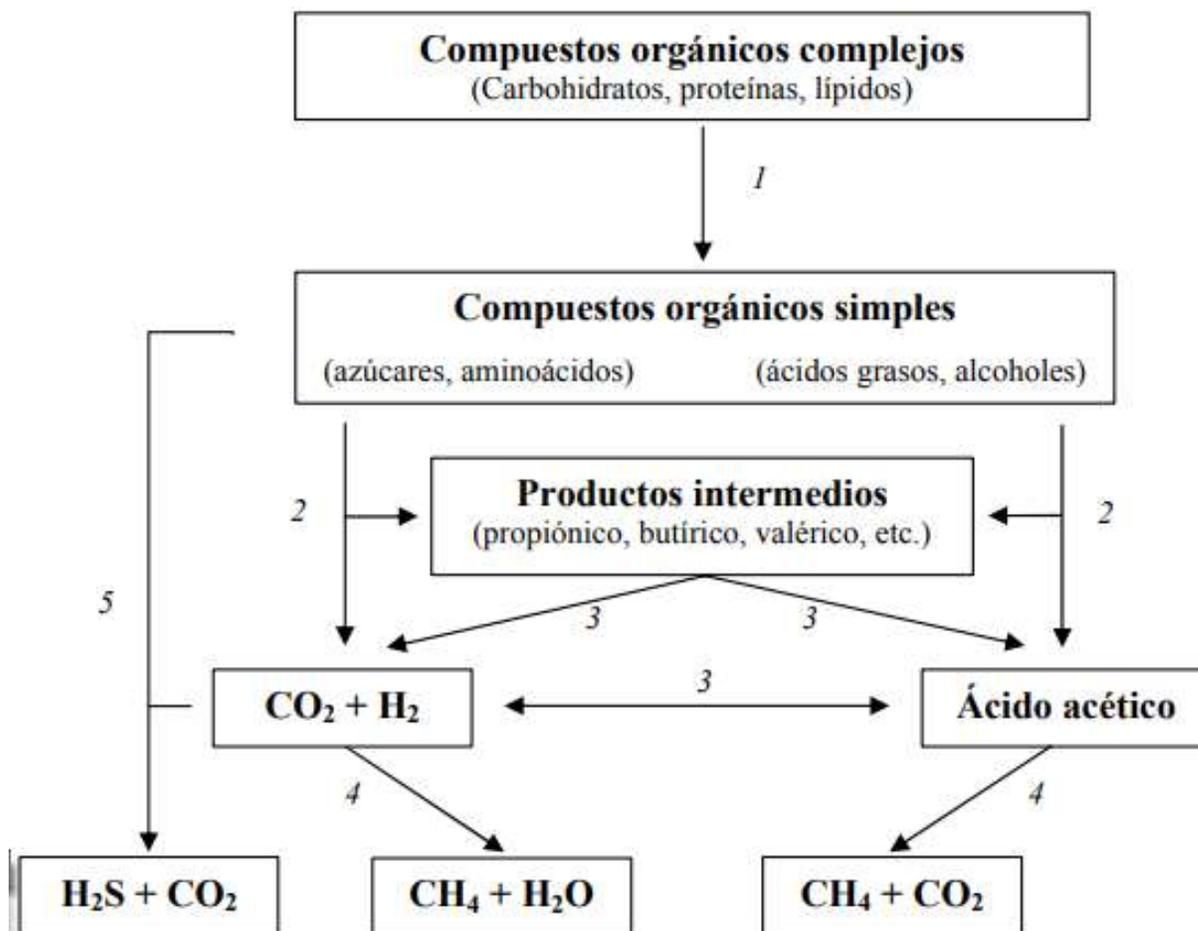


Figura 5 Fases del proceso de digestión anaerobia: (1) hidrólisis, (2) acidogénesis, (3) acetogénesis, (4) metanogénesis, (5) sulfurogénesis.³

1.2.1. Hidrólisis

En esta fase no tiene lugar ningún proceso de estabilización de la materia orgánica, sin embargo es un paso crucial, ya que se producirán los compuestos que servirán de alimento en las fases sucesivas. En la degradación anaerobia de compuestos complejos (lignocelulósicos o difícilmente biodegradables) la hidrólisis es la fase limitante del proceso, y la que determinará la capacidad de carga orgánica de un digester anaerobio.³ las bacterias que producen la hidrólisis

pueden ser anaerobias estrictas o facultativas, son muy numerosas, se desarrollan espontáneamente en el medio cuando las condiciones son favorables, o bien pertenecen a la flora de la sustancia orgánica a digerir. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no solo radica en el hecho que producen el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además, eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.⁴ Las bacterias de esta primera etapa toman la materia prima orgánica virgen con sus largas cadenas de estructura carbonada y las va rompiendo en cadenas más cortas y simples liberando hidrogeno y dióxido de carbono .⁸ La velocidad de descomposición durante la etapa de la hidrólisis depende de la naturaleza del sustrato. La transformación de celulosa y hemicelulosa generalmente es más lenta que la descomposición de proteínas .⁹

1.2.2. Etapa fermentativa o acidogénica

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, si no que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.¹¹

Tipo de Fermentación	Producto o productos
Fermentación láctica	Lactato
Fermentación alcohólica	Etanol, CO ₂
Fermentación ácida-mixta	Etanol, Succinato, Acetato, Formiato, Lactato, CO ₂ , H ₂
Fermentación butiléntrica	Butiléntrico, CO ₂
Fermentación aceto-butírica	Acetato, Acetona, Butirato, Butanol, Etanol, CO ₂ , H ₂

Tabla 1 Tipo de fermentación y productos generados. ¹⁰

Las bacterias anaerobias fermentativas utilizan rutas catabólicas de polisacáridos, aminoácidos y glicerol para la producción de glucosa, la cual puede ser utilizada en las rutas de fermentación alcohólica, láctica y acética. Como resultado de esta fermentación se obtienen alcoholes y ácidos grasos ¹⁰

1.2.3. Etapa acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H₂ y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH₃ COO⁻) e hidrógeno (H₂), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*.¹¹ Las bacterias homoacetogénicas son microorganismos anaerobios estrictos los cuales catalizan la formación de acetato a partir de hidrogeno (H) y dióxido de carbono (CO₂). La reducción del dióxido de carbono en todos los

homoacetógenos se produce por la ruta de la acetil-CoA, esta ruta también es útil para la fijación de carbono por las bacterias sulfatoreductoras y la fermentación de homoacetógenos para producir acetato como producto final.¹⁰

1.2.4. Etapa metanogénica

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización. Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2 / CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariotas. Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen H_2 / CO_2 y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas. Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor

de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanotrix*. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior.¹¹ Su metabolismo se caracteriza por integrar las vías biosintéticas y bioenergéticas para la producción de ATP, además en ausencia de hidrógeno, oxidan compuestos para la obtención de electrones.¹⁰

1.2.5. Reacciones presentes en la digestión anaerobia

El rendimiento de metano producido a partir de lípidos es mucho más alto que el de carbohidratos y proteínas. Sin embargo, los lípidos pueden física y químicamente interferir con la D.A , En la tabla 2 se detallan las principales reacciones que se presentan en la degradación anaeróbica.⁹

Etapa	Reacción
Acidogénesis	$C_6H_{12}O_6 + H_2O \longrightarrow 2CH_3COO^- + 2CO_2 + 2H^+ + 4H_2$
	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \longrightarrow 2CH_3CH_2COO^- + 2H_2O + 2H^+$
	$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2CH_2COO^- + 2CO_2 + H^+ + 2H_2$
Acetogénesis	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \longrightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 3H_2$
	$CH_3CH_2COO^- + 2HCO_3^- \longrightarrow CH_3COO^- + H^+ + 3HCO_3^-$
	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$
Metanogénesis	$CH_3COO^- + H_2O \longrightarrow CH_4 + HCO_3^- + 2H_2$
	$H_2 + \frac{1}{4}HCO_3^- + \frac{1}{4}H^+ \longrightarrow \frac{1}{4}CH_4 + \frac{3}{4}H_2O$
	$HCOO^- + \frac{1}{4}H_2O + \frac{1}{4}H^+ \longrightarrow \frac{1}{4}CH_4 + \frac{3}{4}HCO_3^-$

Tabla 2 Reacciones dadas durante el proceso de digestión anaerobia. ⁹

1.3. Equipos (Tipos de reactores)

1.3.1. reactores con tanque de agitación

Se utiliza reactores cilíndricos, verticales con tanque de agitación principalmente en las plantas agrícolas para la producción de biogás. En este momento (2009), este tipo se usa en aproximadamente el 90% de las instalaciones. El digestor consiste en un tanque con fondo de concreto y lados de acero o de concreto armado. El tanque se puede ubicar ya sea por completo o en parte bajo tierra o en superficie. La cobertura sobre el tanque es a prueba de fugas de gas, aunque las especificaciones del diseño pueden variar dependiendo de las necesidades y del modo de construcción. Las coberturas de concreto y de láminas de plástico son las más comunes. El sustrato es agitado por agitadores ubicados dentro o al lado del reactor. ¹² Este tipo de reactor consiste en un tanque, que opera de manera continua, con un sistema de agitación (mecánico, hidráulico o por burbujeo) que permite la mezcla entre los microorganismos y el sustrato alimentado, por lo que su TRH y su TRS son iguales, lo que implica la pérdida de microorganismos con la salida del flujo de materia por lo que su rendimiento en general es bajo. También, se requieren altos tiempos de retención debido a la lenta velocidad de metabolización de los sustratos por parte de los microorganismos metanogénicos. Para compensar la pérdida de materia orgánica del reactor, es posible la adición de una recirculación del flujo de salida lo que además disminuye el tiempo de retención de éste. En general, en este tipo de reactores se recomienda no superar el 15% de sólidos totales (ST), debido a que

aumentar los niveles de sólidos contribuye al aumento del consumo energético en agitación y transporte.¹³

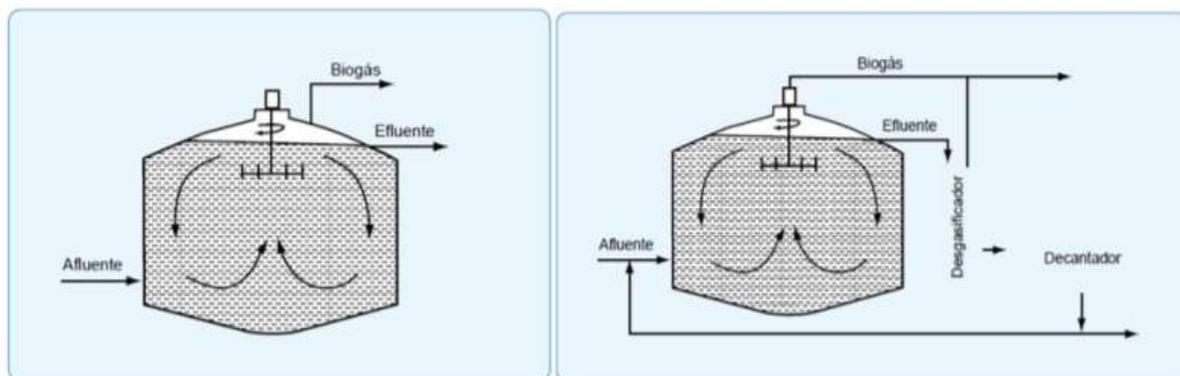


Figura 6 Reactor de tanque de agitación. Fuente: Evaluación técnica y económica de una planta de biogás¹³

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • Es posible llegar a tamaños de más de 6 000 m³ pero el control del mezclado y del proceso se hace más complejo a medida que el tamaño aumenta. • Generalmente están hechos de concreto o acero.
Conveniencia	<ul style="list-style-type: none"> • En principio es apto para todo tipo de sustratos, preferiblemente sustratos para bombeo con contenido bajo o mediano de materia seca. • El equipamiento de agitación y transporte debe ser adaptado al sustrato. • Proporciona retorno de digestato si el alimento es únicamente cultivo energético. • Es conveniente para alimentación continua, semi-continua e intermitente
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> + El diseño es económico cuando el volumen del reactor es de más de 300 m³. + La operación es variable en configuraciones de flujo continuo o tanque de flujo continuo/tampón. + Dependiendo del diseño, se puede dar servicio al equipo normalmente sin vaciar el digestor.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Los cortocircuitos del flujo son posibles de manera que no se puede establecer con seguridad el tiempo de residencia. - Se puede formar capas de escoria y sedimento.
Consideraciones especiales	<ul style="list-style-type: none"> • Se recomienda la remoción de sedimentos para algunos sustratos (por ejemplo, bostas de aves y sedimento de cal), piso de barrido con transportador de descarga en tornillo.
Diseños	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque cilíndrico vertical ya sea por encima de la superficie o parte superior a nivel del suelo • El equipo de mezclado debe ser muy potente. Si sólo se fermenta la bosta líquida en la circulación neumática del digestor, es viable la inyección de biogás. • Medios de re-circulación: agitadores de motor sumergible ubicados dentro del espacio cerrado del reactor, agitador axial en un ducto vertical central, re-circulación hidráulica con bombas externas, re-circulación neumática por inyección de biogás por un ducto vertical, re-circulación neumática por inyección de biogás en grandes áreas a través de boquillas en la parte inferior del reactor
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> • El pozo de acceso facilita el ingreso.

Tabla 3 Tabla de propiedades de reactor de tanque de agitación. Fuente: Guía del biogás republica alemana¹²

1.3.2. Procesos con reactores de flujo de pistón

Las plantas de biogás con flujo de pistón (la versión de digestión húmeda también se conoce como sistema de tanque de flujo continuo) usa el efecto de expulsión del alimento de sustrato fresco para crear un flujo de pistón a través de un digestor de sección redonda o cuadrada. Normalmente se logra el mezclado transversal en la dirección del flujo por medio de ejes con paletas o de desviadores especialmente diseñados. (guía del biogás republica alemana).

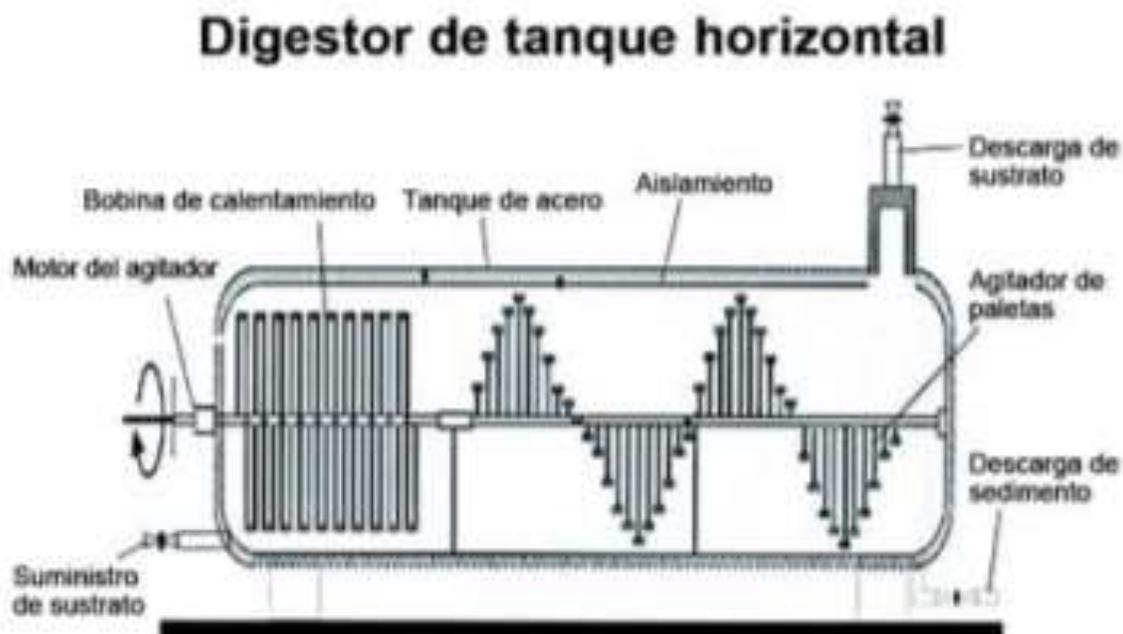


Figura 7 Digestor de tanque horizontal. Fuente: Reactor de tanque de agitación. Fuente: (guía del biogás republica alemana) ¹²

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño: digestores horizontales de hasta 800 m³, digestores verticales de hasta 2500 m³ • Material: principalmente acero y acero especial, también concreto armado
Conveniencia	<ul style="list-style-type: none"> • Digestión húmeda: conveniente para sustratos para bombear con alto contenido de materia seca • Digestión seca: equipamiento de agitación y transporte adaptable al sustrato • Diseñado para alimentación semi-continua o continua
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> + Es apto para plantas compactas, de diseño económico y tamaño reducido. + Las etapas de digestión están separadas en el flujo de pistón. + El diseño elimina la formación de escoria y las capas de asentamiento. + Los tiempos de residencia son tal como se prevén debido a que el diseño impide en gran medida cortocircuitos del flujo. + Los tiempos de residencia son cortos. + Se puede calentar eficazmente. El diseño compacto ayuda a minimizar las pérdidas de calor. + Digestión seca: se puede utilizar agitadores potentes, confiables y que ahorren energía
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Se necesita espacio para los tanques. - No hay inoculación del material fresco o la inoculación debe hacerse por retorno del digestato como material semilla. - Es económico solamente en pequeña escala. - El reactor debe vaciarse por completo si se requiere dar servicio al agitador.
Diseños	<ul style="list-style-type: none"> • Como reactores de flujo de pistón con sección transversal redonda o cuadrada • Puede ser horizontal o vertical, pero normalmente es horizontal. • En un reactor vertical, el flujo de pistón se establece usualmente por partes internas verticales y rara vez por partes internas horizontales. • Se puede operar con o sin equipo de mezclado.
Consideraciones especiales	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe contar con entradas para todos los dispositivos y tubos que requieran conexión. • Se tiene que instalar una válvula de alivio para la cámara de gas por razones de seguridad.
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario al menos un pozo de acceso para poder llegar al interior del reactor en caso de avería. • Se debe cumplir con los reglamentos aplicables de salud y seguridad para el trabajo dentro del digestor.

Tabla 4 Propiedades de reactores de biogás con flujo pistón Fuente: Guía del biogás republica alemana

1.3.3. Reactor de domo flotante

También conocido como reactor tipo India, se construye como un cilindro que posee una tapa flotante atrapa el gas que se va produciendo, es decir poseen un gasómetro integrado. La presión dentro del reactor normalmente es de 30 centímetros de columna de agua (0,03 [atm]). Este tipo de reactor se utiliza normalmente en el medio rural con una alimentación semicontinua. La eficiencia de este reactor está entre 0,5 y 1 [m³] de biogás por [m³] de digestor al día y su tiempo de retención está entre 10 y 30 días. ¹³

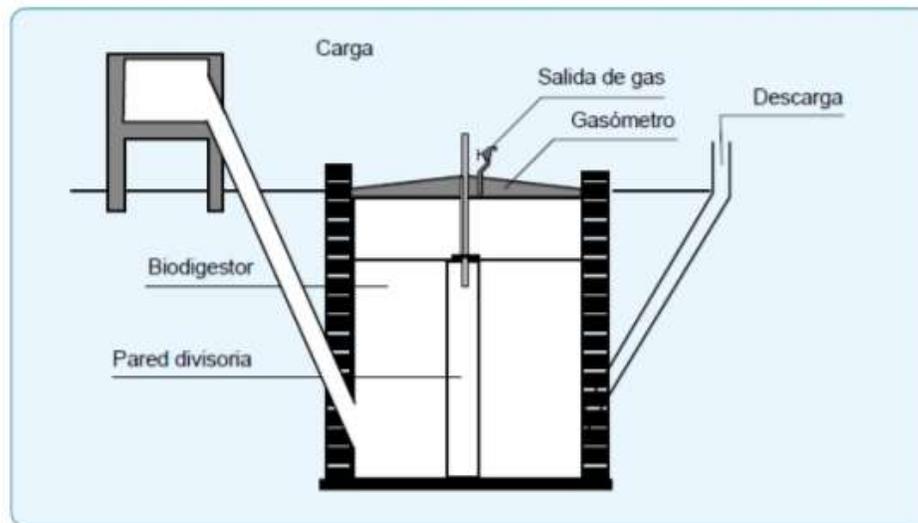


Figura 8 Reactor de domo flotante. Fuente: (evaluación técnica y económica de una planta de biogás) ¹³

1.3.4. Reactor de domo fijo

También conocido como tipo chino, este reactor a diferencia del anterior no posee un gasómetro integrado y, por lo tanto, a medida que aumenta la masa de gas la presión dentro del reactor también lo hace. En general, este tipo de reactores son cámaras construidas de hormigón, ladrillo o piedra en forma de semiesfera para tener mejor resistencia a las presiones generadas de 1 a 1,5 metros de columna de agua (0,1-0,15 [atm]) las que en general disminuyen la eficiencia del proceso, ya que dificultan la digestión. Este tipo de reactor posee tiempos de retención de 30 a 60 días y una eficiencia de 0,15-0,2 m³ de biogás por m³ de reactor por día por lo que son poco eficientes en la producción de gas, sin embargo, al tener altos tiempos de retención, son muy buenos productores de bioabono.¹³

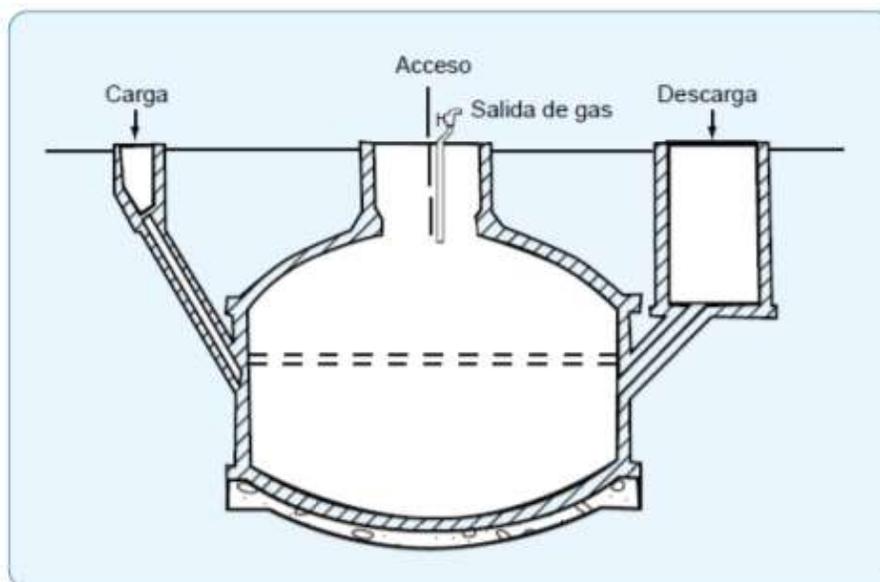


Figura 9 Reactor de domo fijo. Fuente: (evaluación técnica y económica de una planta de biogás)¹³

1.3.5. Proceso anaeróbico de contacto (PAC)

En este proceso se utiliza un reactor de mezcla completa, un desgasificador y un decantador para la producción de biogás. La primera operación unitaria tiene como fin la producción de biogás, la segunda poder separar los lodos desde el primer proceso del biogás remanente y así evitar que éstos floten y la tercera etapa que busca decantarlos y poder recircularlos al reactor principal con el fin de aportar materia orgánica y microorganismos disminuyendo el tiempo de retención y evitando el “arrastre” excesivo de los microorganismos. El tiempo de retención de sólidos es de 20 a 40 días en este tipo de procesos, siendo además muy útiles para alimentaciones con alta carga de sólidos suspendidos la que varía entre 0,5 a 10 [kg DQO/m³ día]. La concentración de biomasa es del orden de 4 a 6 [g/L], con un máximo de 30 [g/L], dependiendo de la habilidad para decantar del lodo.¹¹

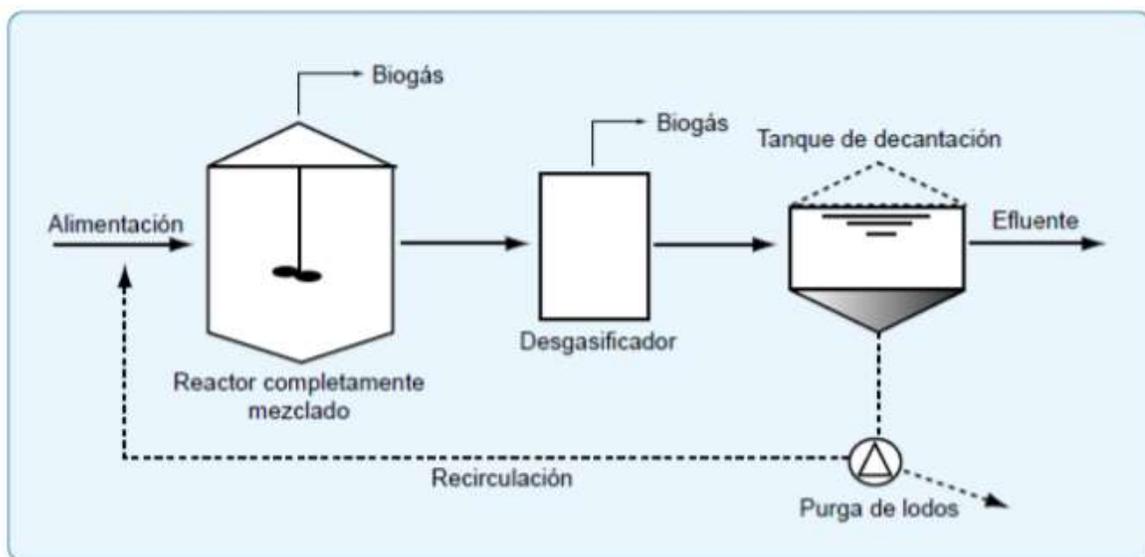


Figura 10 Proceso anaeróbico de contacto (PAC). Fuente: (evaluación técnica y económica de una planta de biogás) ¹³

1.4. Proyecciones de las energías renovables

“Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)”, hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009 establece: *“El desarrollo de las NAMA (procesos de generación de energías renovables por sus siglas en inglés) es aún un proceso joven, lo que dificulta el rastreo de todas las iniciativas NAMA alrededor del mundo. Un buen recurso en este contexto es la Base de Datos NAMA (2014), que proporciona un resumen general (pero no exhaustivo) del estado de desarrollo de las NAMA. Adicionalmente, el Registro NAMA de la CMNUCC (2014a) proporciona información sobre el estado del desarrollo NAMA mundial”* ¹⁵

Muchas corporaciones a nivel mundial desean promover la implantación y el uso generalizados y reforzados de las energías renovables con objeto de lograr un desarrollo sostenible, inspiradas por su firme convencimiento de que las

energías renovables ofrecen oportunidades incalculables para abordar y mitigar de forma gradual los problemas derivados de la seguridad energética y la inestabilidad de los precios de la energía, convencidas del papel crucial que las energías renovables pueden desempeñar en la reducción de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que contribuiría a la estabilización de los sistemas climáticos, y en la transición sostenible, segura y sin sobresaltos hacia una economía baja en carbono, deseosas de impulsar el efecto positivo que las tecnologías de las energías renovables pueden producir para estimular el crecimiento económico sostenible y la creación de empleo, movidas por el enorme potencial que las energías renovables ofrecen para el acceso descentralizado a la energía, sobre todo en los países en desarrollo, y para el acceso a la energía en regiones e islas aisladas y remotas, preocupadas por las graves consecuencias negativas que el empleo de combustibles fósiles y el uso ineficiente de la biomasa tradicional pueden acarrear para la salud, convencidas de que las energías renovables, combinadas con una mayor eficiencia energética, pueden absorber cada vez más el gran incremento mundial de las necesidades energéticas previsto para los próximos decenios, reafirmando su deseo de establecer una organización internacional para las energías renovables que facilite la cooperación entre sus Miembros y abra también camino a una estrecha colaboración con las organizaciones existentes que promueven el uso de las energías renovables.¹⁴

Capítulo 2: Metodología

1. Estudio general del proceso de biodigestión a trabajar

Para el estudio del comportamiento del proceso de biodigestión es fundamental conocer de antemano el proceso, la dinámica de reacción y la influencia de las variables y parámetros que gobiernan la biodigestión anaerobia de los desechos orgánicos urbanos y rurales en específico. Para esto se acudieron a fuentes bibliográficas de diferente tipo, desde artículos científicos, libros, y guías didácticas de apoyo; hasta testimonios de expertos en el área de las biorrefinerías y granjeros de basta experiencia en la reutilización de desechos. Teniendo en cuenta lo anterior se procedió a la escogencia del tipo de Biodigestión y de biorreactor a trabajar.¹⁶

Este proyecto se enfoca en la simulación y optimización del proceso de biodigestión anaerobio de diferentes configuraciones de materias primas, llevado a cabo en reactor tipo batch con enchaquetado y agitación intermitente.

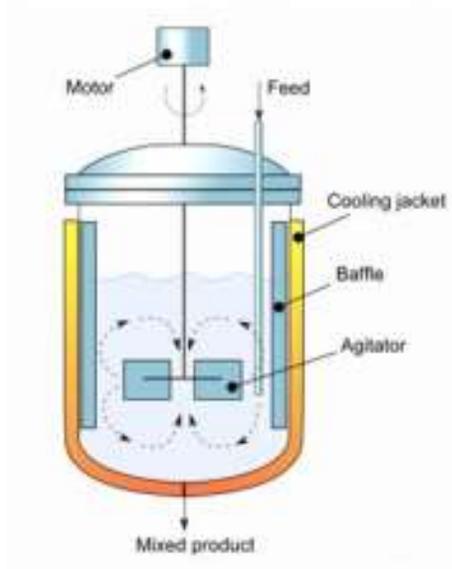


Figura 11 Reactor químico tipo batch con enchaquetado, escala laboratorio¹⁶

1.2. Modelos cinéticos que gobiernan el proceso de biodigestión anaerobia

En el proceso de digestión anaerobia se presentan una gran cantidad de reacciones químicas de forma simultánea e intermitentemente, entre unas y otras. Esto se da debido a que la materia orgánica proveniente de desechos contiene un gran complejo de microorganismo, los cuales varían en sus condiciones de proliferación y por ende su capacidad de metabolizar los nutrientes es variada. Es por esto que para la escogencia de los modelos cinéticos que gobiernan el proceso de biodigestión, se tuvo en cuenta aquellas que están sujetas a un comportamiento genérico del complejo de microorganismos que llevan a cabo el proceso de descomposición del material orgánico.

Los modelos cinéticos de complejos de microorganismos comúnmente representan el comportamiento global del proceso de descomposición, teniendo en cuenta principalmente condiciones sobre las cuales se lleva a cabo este (T, pH, %H, %O, carga de materia orgánica), las cuales son agrupadas en la constante de velocidad de reacción K_T .

A continuación, se presentan modelos cinéticos del comportamiento de procesos anaerobios comúnmente utilizados los cuales se tuvieron en cuenta como motivo de estudio para la adaptación a las condiciones de operación del biorreactor.

Primer orden

$$\mu = \frac{k S}{S_0 - S} - b ; \quad -\frac{dS}{dt} = kS ; \quad S = \frac{S_0}{1 + k \theta_c}$$

Monod, 1949

$$\mu = \frac{\mu' S}{K_s + S} - b ; \quad -\frac{dS}{dt} = \frac{\mu' X S}{Y (K_s + S)} ; \quad S = \frac{K_s (1 + b \theta_c)}{\theta_c (\mu' - b) - 1}$$

Contois, 1959

$$\mu = \frac{\mu' S}{B X + S} - b ; \quad -\frac{dS}{dt} = \frac{\mu' X S}{Y (B X + S)} ; \quad S = \frac{B Y S_0 (1 + b \theta_c)}{B Y (1 + b \theta_c) + \theta_c (\mu' - b) - 1}$$

Chen y Hashimoto, 1978

$$\mu = \frac{\mu' S}{K S_0 + (1 - K) S} - b ; \quad -\frac{dS}{dt} = \frac{\mu' X S}{K X + Y S} ; \quad S = \frac{K S_0 (1 + b \theta_c)}{(K - 1)(1 + b \theta_c) + \mu \theta_c}$$

Figura 12. Modelos de comportamiento cinético para procesos anaerobios²⁰

- 1.3. Estudio bibliográfico de metodologías tecnológicas y/o empíricas de biodigestión implementadas actualmente.
2. Determinación de materias primas a utilizar para la obtención del biogás y el tipo de biofertilizante que se desea obtener.

Partiendo del propósito de optar por un aprovechamiento general de los desechos orgánicos generados en los sectores agrícolas y urbanos, se planteó desarrollar matrices de digestión mixtas, donde la materia orgánica a degradar se compone de diversas fuentes de desechos (aceites y grasas, pastizal, excrementos curtiembres, entre otros. El proceso de selección y la determinación de las proporciones de estas matrices de fermentación mixtas, para este rubro, estuvieron sujetas a los aportes en

cuanto su rendimiento en producción de biogás y la proporción de compuestos como K, P, Na; estos últimos muy necesarios para una buena calidad del biofertilizante.

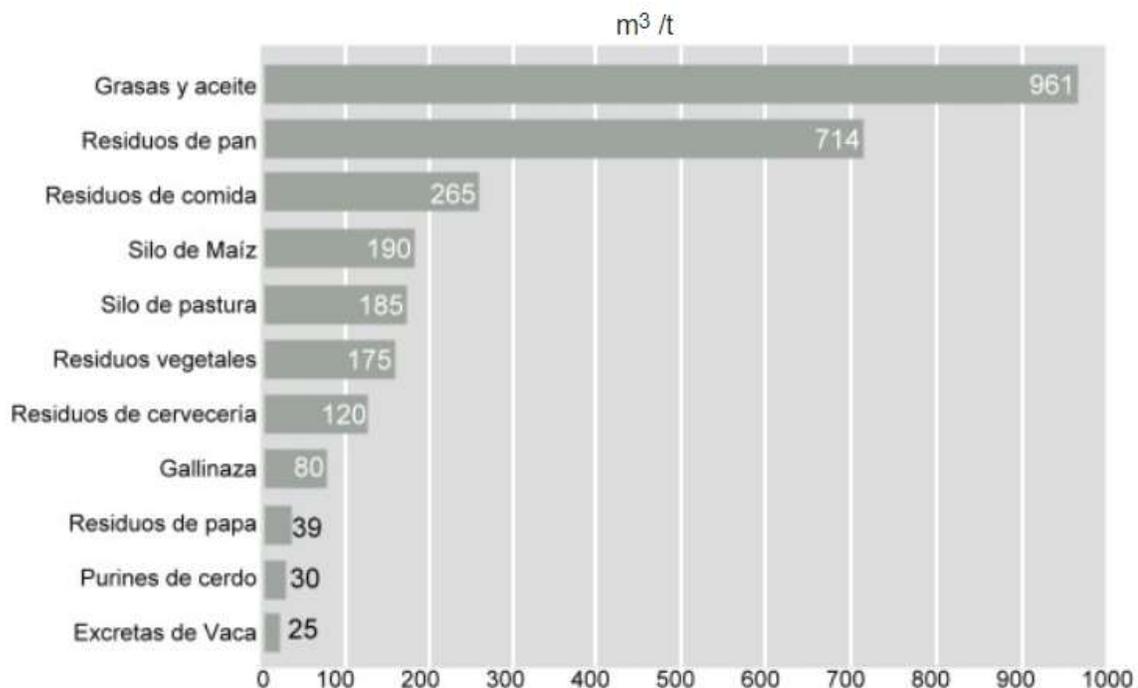


Figura 12 Eficiencia de materia prima¹⁷

compuestos complejos de cadenas carbonatadas grandes, como los lípidos presentes en abundancia en las grasas y aceites aportan una proporción importante de sólidos volátiles (SV) los cuales favorables principalmente para el proceso de producción del biogás, con una alta selectividad por el gas metano, por lo que en términos de calidad. Los compuestos presentes se escogieron para el estudio que se ejecuto en el presente proyecto debido a que su degradación, como se muestra en las tablas, presenta una alta selectividad hacia la producción de biogás

Parámetro	Unidad / nombre	Bosta cruda	Digestato			
		Principalmente bosta de ganado	Bosta de ganado y cultivos energéticos	Bosta de cerdo y cultivos energéticos	Cultivos energéticos	Residuos (y cultivos energéticos)
Materia seca	% de FM	9,1	7,3	5,6	7,0	6,1
Acidez	pH	7,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Proporción de carbono a nitrógeno	C:N	10,8	6,8	5,1	6,4	5,2
Sustancias que actúan de manera alcalina	kg CaO / t de FM	2,9	-	-	3,7	3,5
kg / t FM						
Nitrógeno	N _{total}	4,1	4,6	4,6	4,7	4,8
Nitrato de amonio	NH ₄ -N	1,8	2,6	3,1	2,7	2,9
Fósforo	P ₂ O ₅	1,9	2,5	3,5	1,8	1,8
Potasio	K ₂ O	4,1	5,3	4,2	5,0	3,9
Magnesio	MgO	1,02	0,91	0,82	0,84	0,7
Calcio	CaO	2,3	2,2	1,6	2,1	2,1
Azufre	S	0,41	0,35	0,29	0,33	0,32
Materia orgánica	OM	74,3	53,3	41,4	51,0	42,0

Tabla 5 Componentes de materias primas. Fuente: guía de biogás república alemana.¹²

2.2. Caracterización de los residuos orgánicos (determinación de compuestos volátiles y microorganismos presentes).

Una vez establecido los tipos de residuos orgánicos a trabajar se caracterizaron estos residuos teniendo en cuenta los compuestos, la composición de cada uno y el tipo de microorganismo que contiene, con el propósito de entender, con esta información, el aporte que podrían llegar a tener ciertas materias primas en el proceso de biodigestión. Esto debido a que los sólidos volátiles están directamente relacionados con la capacidad de generación de biogás y la composición de este mismo en relación con el metano, dióxido de carbono y otros compuestos en fase gaseosa. Así mismo la presencia de elementos alcalinos en los compuestos carbonatados de los residuos a trabajar representaran nutrientes a los sólidos obtenido postdigestión (Biofertilizante), elevando la calidad de este como abono.

Materia Prima	C (%)	N(%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO(%)	MgO (%)
Excretas:						
Bovino	17,4 – 40,6	0,3 – 2,0	0,1 – 1,5	0,10	0,35	0,13
Porcino	17,4 - 46,0	1,1 – 2,5	0,4 – 4,6	0,30	0,09	0,10
Caprino	35,0 – 50,0	1,0 – 2,0	0,2 – 1,5	2,30		
Equino	35,0 - 52,0	0,3 – 0,8	0,4 – 1,6	0,35	0,15	0,12
Ovino	35,0 – 46,0	0,3 – 0,6	0,3 – 1,0	0,15	0,33	
Conejos	23,0 - 35,0	1,0 – 1,9	0,9 – 1,8	2,10	0,45	0,15
Aves	28,0 – 35,0	1,4 – 2,0	2,0 – 2,8	1,40	0,80	0,48
Patos	29,0 - 41,0	0,6 – 0,8	1,0 – 1,5	0,40	0,80	
Pavos	17,4 – 41,0	0,6 – 0,8	0,5 - 0,8	1,10	0,80	
Humanas	2,5	0,8 – 1,0	0,5	0,30		
Mezclas:						
Porcino+paja	20,0 – 22,0	0,3 – 0,5	0,24	0,63	0,20	
Bovino+paja	44,0 – 46,0	0,3 – 0,5	0,79	1,55	0,30	
Rastrojo:						
Caña maíz	30,0 – 40,0	0,8 – 1,8	0,4 – 0,6	2,40	0,50	0,49
Paja de trigo	16,0 – 46,0	0,53	0,70	0,40	0,26	0,16
Paja de avena	22,0 – 29,0	0,53	0,40	0,30	0,40	
Paja cebada	58,0	0,64	0,19	1,07	0,33	0,33
Paja arroz	40,0 – 42,0	0,64	0,60	0,40	0,60	
Paja haba	28,0 – 33,0	1,5 – 1,9	0,40	2,30	1,35	
Tomate	27,0 – 30,0	2,60				
Papas	30,0	0,34	0,16	0,58	0,64	
Betarraga	30,0	2,00	0,70	5,30	1,95	0,83
Rabanitos	30,0	2,50				
Hojas secas	35,0 – 40,0	1,00	0,30	0,20	2,00	
Aserrín	44,0	0,06	0,01	0,01		

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

Tabla 6 Características de materias prima, varias. Fuente: Manual de biogás de Chile.¹²

Bacterias	Virus	Parásitos
Salmonella (CS, PS, PE)	Patógenos de la fiebre aftosa	Gusanos redondos
Escherichia coli (CS)	Fiebre porcina	Gusanos en empalizada
Bacterias del ántrax (CS)	Enfermedad vesicular porcina	Tremátodos
Bruceas (CS, PS)	Gripe porcina	Tremátodo hepático
Leptospiras (CS, PS)	Gastroenteritis transmisible (TGE)	Gusanos pulmonares
Micobacterias (CS, PS, PE)	Infecciones por rotavirus	Gusanos gastro-intestinales
Bacterias de la erisipela (PS)	Enfermedad de Teschen	
Clostridios (PE)	Enfermedad de Aujeszky	
Estreptococos	Gripe aviar atípica	
Enterobacter	Enfermedad catarral bovina	
	Retro-, parvo-, echo-, enterovirus	

CS: lodo líquido de ganado; PS: lodo líquido de cerdo; PE: excremento de aves

Tabla 7 Tipos de bacterias para el proceso de biodigestión anaerobia. Fuente: guía de biogás república alemana.¹²

2.3. Determinación de cinéticas de reacción a simular.

Las cinéticas que se establecieron para realizar la simulación en el software MATLAB fueron aquellas que proporcionaron tasas de consumo de sustrato, de generación de producto y biomasa de forma simultánea teniendo en cuenta variables de proceso como pH, temperatura (T), porcentaje de humedad (%C), carga de materia orgánica (MT), porcentaje de Oxígeno (%O), de forma que el comportamiento se pudiera simular en función de características generales del proceso.

Los modelos cinéticos empleados para el presente proyecto se basaron en la Cinética de Monod, la cual se define de la siguiente forma:

Fase exponencial

Es la fase del crecimiento de los microorganismos en cultivos discontinuos de mayor relevancia. La tasa de generación de microorganismos supera ampliamente a la de

muerte. Esta fase ha sido ampliamente estudiada y modelizada (Monod, 1949), debido a su mayor facilidad de seguimiento, y en ella se producen grandes cambios en las características del sistema.²⁰

$$\frac{dX}{dt} = \mu * X$$

X= concentración de biomasa
t= tiempo

La disminución de la velocidad de crecimiento debida al descenso en la concentración del sustrato limitante puede ser descrita a partir de la expresión de Monod (1949) que relaciona la velocidad específica de crecimiento “ μ ” y la concentración del sustrato limitante “S”:²⁰

$$\mu = \frac{\mu_{max} * S}{K_s + S}$$

μ = Constante específica de crecimiento celular

K_s = constante de saturación por

μ_{max} = máxima velocidad específica de crecimiento celular

S = sustrato

Constante cinéticas de velocidad de reacción

Es una constante de velocidad de reacción que está en función de condiciones propias de la operación del proceso como temperatura, porcentaje de humedad, porcentaje de CO₂, pH, carga de materia orgánica.

Model no.	Kinetic model	References
1	$k_T = k_{23} \cdot a^{(T-23)}$	Haug (1993) modified
2	$k_T = a \cdot \exp\{(b \cdot T) + (c \cdot \frac{M_c}{T})\}$	Külcu and Yaldiz (2004)
3	$k_T = a \cdot \exp\{b \cdot [(\frac{M_c - c}{d}) + (\frac{T-f}{g})]\}$	Ekinci et al. (2001)
4	$k_T = \frac{a}{1-(c/b)} \cdot \exp\{[(T \cdot c) - (d \cdot \frac{M_c}{T})]\}$	Külcu and Yaldiz (2004)
5	$k_T = a \cdot b^c \cdot \exp\{[(c \cdot T) - (d \cdot \frac{M_c}{T})]\}$	Külcu and Yaldiz (2004)
6	$k_T = e^{(V_0 - a)} \cdot k_{23} \cdot b^{(T-23)}$	Külcu and Yaldiz (2004)
7	$k_T = a \cdot b^{O_2} \cdot \exp[(c \cdot T) + (d \cdot \frac{M_c}{T})]$	This study
8	$k_T = a \cdot \exp[(b \cdot T) + (c \cdot \frac{O_2}{T}) - (d \cdot \frac{M_c}{T})]$	This study
9	$k_T = O_2^{(1-a)} \cdot b^{(T-23)} \cdot pH^c \cdot (\frac{M_c}{T})^d$	This study

Figura 13 Modelos para la determinación de las constantes cinéticas.²¹

Kt= constante cinética de velocidad de reacción

O₂= concentración de oxígeno

T= Temperatura

C= concentración de CO₂

Mc= porcentaje de humedad

a, b, c y d son constantes de proporcionalidad encontradas por el artículo.

Model no.	Kinetic models	Kinetic parameters	95% Confidence	R ²	R _{adj} ²	R _{cross}	Variance
1	$k_T = k_{23} \cdot a^{(T-23)}$	a = 0.0043	3×10^{-4}	0.9962	0.9960	0.00296	2×10^{-4}
2	$k_T = a \cdot \exp\{(b \cdot T) + (c \cdot \frac{M_c}{T})\}$	a = 1×10^{-5} b = -0.2118 c = 5.2777	0.0012 1.3607 11.0445	0.9974	0.9972	0.0024	2×10^{-4}
3	$k_T = a \cdot \exp\{b \cdot [(\frac{M_c - c}{d}) + (\frac{T-f}{g})]\}$	a = 0.0284 b = -14.8434 c = 38.5455 d = 17.5232 f = 54.5527 g = 16.7311	0.02071 1.9942 0.8456 0.5181 0.7913 0.4323	0.9973	0.9965	0.0025	2×10^{-4}
4	$k_T = \frac{a}{1-(c/b)} \cdot \exp\{[(T \cdot c) - (d \cdot \frac{M_c}{T})]\}$	a = 0.0108 b = -3.4750 c = 0.1405 d = -2.6421	2×10^{-5} 0.0225 4.995×10^{-4} 0.0006	0.5727	0.5053	0.0314	0.0273
5	$k_T = a \cdot b^c \cdot \exp\{[(c \cdot T) - (d \cdot \frac{M_c}{T})]\}$	a = 2×10^{-6} b = 0.7535 c = -0.0370 d = -4.7038	4×10^{-7} 0.1142 0.0082 0.0620	0.0975	0.9972	0.0024	1×10^{-4}
6	$k_T = e^{(V_0 - a)} \cdot k_{23} \cdot b^{(T-23)}$	a = -3.3005 b = 0.4118	0.0371 0.0564	0.9973	0.9972	0.0025	2×10^{-4}
7	$k_T = a \cdot b^{O_2} \cdot \exp[(c \cdot T) + (d \cdot \frac{M_c}{T})]$	a = 0.0384 b = 0.8206 c = -0.0032 d = 1.1536	1×10^{-7} 3×10^{-6} 1×10^{-7} 1×10^{-6}	0.9996	0.9995	0.0009	3×10^{-5}
8	$k_T = a \cdot \exp[(b \cdot T) + (c \cdot \frac{O_2}{T}) - (d \cdot \frac{M_c}{T})]$	a = 3.0338 b = -0.0949 c = -5.4244 d = -17.9943	9×10^{-5} 1×10^{-6} 0.0010 0.0004	0.9996	0.9995	0.0010	3×10^{-5}
9	$k_T = O_2^{(1-a)} \cdot b^{(T-23)} \cdot pH^c \cdot (\frac{M_c}{T})^d$	a = -0.4802 b = 0.9139 c = 0.0212 d = -2.9434	0.0006 0.0076 0.0025 0.0390	0.9999	0.9998	0.0005	8×10^{-4}

Figura 14 Constantes a, b, c y d para la determinación de Kt. ²¹

Tasa de Consumo de sustrato

Con la tasa de consumo de sustrato se obtiene una relación entre los parámetros microbiológicos y el metabolismo de consumo de sustrato en función del tiempo, con lo cual se puede representar la concentración de sustrato que se metaboliza por parte del microorganismo a medida que transcurre el tiempo.

$$\frac{dS}{dt} = (-\mu * Kt) * S$$

Tasa de Generación de producto

Con la tasa de generación de producto se representa la generación de biogás (CH₄) en función del tiempo y de la concentración de sustrato (S).

$$\frac{dP}{dt} = (\mu * Kt)(Y_{px} - 1) * S$$

Donde Y_{px} es un parámetro de rendimiento en del producto en función de la biomasa.

3. Simulación de las cinéticas del proceso de biodigestión en MATLAB.

Para la simulación de las cinéticas de comportamiento del proceso de biodigestión anaerobia se planteo un sistema de resolución de ecuaciones diferenciales, por lo que la escogencia del software de simulación dependió de la diversidad de opciones de resolución de ecuaciones diferenciales que este pudo ofrecer, es allí donde el operador matemático MATLAB, se perfiló como el software mas indicado, debido a la gran variedad de comandos que ofrece el operador para resolver ecuaciones diferenciales complejas, tales como Ode (Ode45, Ode35, Ode15s, Ode15l, difsolve,

entre otras). Para este proyecto se llegó a la escogencia de Ode45 como comando de resolución de ecuaciones diferenciales.

Ode 45

El comando Ode45 permite resolver paquetes de ecuaciones diferenciales en Matlab, para el caso particular de este proyecto ecuaciones diferenciales de primer orden, llevando a cabo operaciones iterativas por el método de Runge-Kutta.

3.2. Parámetros cinéticos inherentes al proceso.

Mediante un exhaustivo estudio bibliográfico del proceso de biodigestión anaerobia se pudo encontrar información relevante acerca de parámetros característicos del proceso, los cuales permiten, por medio de los modelos cinéticos representar el comportamiento del proceso.

Sustrato	Y (mg/mg)	B(d-1)	K (mg/mg.d)	K _s (mg/l)	T (°C)
Acetato	0.04	0.015	36	2130	20
	0.054	0.011	4.7	370	25
	0.058	0.037	4.3	333	30
Propionato	0.04	0.015		3860	20
	0.04	0.04	9.8	613	25
Estearato Palmitato	0.04	0.015	385	4620	20

Tabla 8 Valores de los parámetros cinéticos citando a Lawrence y McCarthy.²²

	i_m (d ⁻¹)	Y_{xs} g SSV/g DQO	K_s g DQO/l	r_s g DQO/g SSV.d
Acidogénicos (APOH)	2.0	0.15	0.2	13
Metanogénicos (Acetoclastos)				
Methanotrix sp.	0.16	0.05	0.037	2
Methanosarcina sp	0.45	0.05	0.350	9
Sulfato-reductoras (BSR)	4-6	0.10	0.007	50
Biomasa digestor anerobio*	0.1-0.45	0.18	0.1-1.4	0.5-2.5
Bacterias (genérico)	2.4-40	0.50		
Levaduras (aerobio)	48-80	0.5-0.8		

(*) Valores típicos para la biomasa de un digestor anaerobio que trate efluentes complejos

Tabla 9 Parámetros cinéticos y estequiometricos.²²

3.3. Ajustes de variables de proceso a analizar (temperatura, humedad, concentraciones, pH).

3.3.1. Análisis de sensibilidad

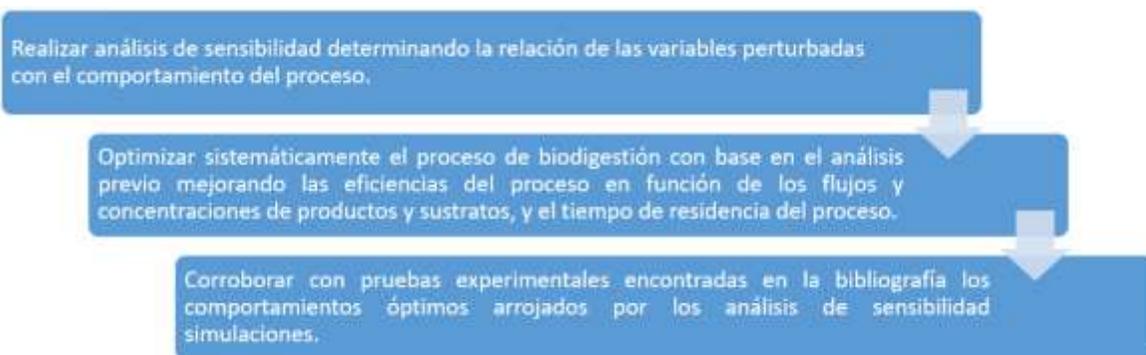


Figura 15 Esquema general de la metodología de optimización por análisis de sensibilidad.

Para el inicio se realizaron 4 casos de estudios donde se tuvieron en cuenta solo los parámetros propios del componente microbiano del proceso de biodigestión con el fin de realizar un análisis preliminar de la influencia de un parámetro sobre el otro y la repercusión sobre el proceso en general. Por lo que para en esta primera etapa de inicio se variaron μ_{max} y K_s , posteriormente se analizaron, variables de operación propias del proceso (pH, contenido de humedad, contenido de oxígeno y temperatura).

Caso 1:

Para valores de $\mu_{\max} = 0.6$, $K_s = 1.4$ y rendimientos de 0.5 de la biomasa con respecto al sustrato y del producto con respecto a la biomasa.

Caso 2.

Para un $\mu_{\max} < 1$, un $K_s = 1$ y rendimientos de 0,5 de la biomasa con respecto al sustrato y del producto con respecto a la biomasa.

Caso 3.

Para un $\mu_{\max} = 0.6$, un $K_s < 1$ y rendimientos de 0.5 de la biomasa con respecto al sustrato y del producto con respecto a la biomasa respectivamente.

Caso 4.

Para un $\mu_{\max} = 1$, un $K_s = 1$ y rendimientos de 0,5 de la biomasa con respecto al sustrato y del producto con respecto a la biomasa.

Caso 5. Simulación

Se llevo a cabo la simulación del proceso de acidogénesis, en donde gran parte de lípidos, carbohidratos y proteínas se convierten en ácidos orgánicos producto de la metabolización inicial del sustrato por parte del microorganismo. Para este apartado se tuvieron en cuenta dos cinéticas completamente diferente a la que se ejecutaron los casos de estudios acoplándolo a este proyecto con el propósito de evidenciar una de las etapas mas importantes en la digestión anaerobia, en donde, aun y siendo una metabolización inicial, se genera metano.

Los modelos que se tuvieron en cuenta fueron los planteados por A. J. Castro-Montoya y Eric Houbbron en su proyecto de simulación dinámica²², aplicando

condiciones características del actual trabajo. Los modelos se plantean de la siguiente forma:

Modelo 1:

Velocidad de consumo de sustrato:

$$\frac{dS1}{dt} = \frac{-b1 * y1}{b2 + y1}$$

Velocidad de producción y consumo de ácido acético:

$$\frac{da2}{dt} = b3 * S1 - b4 * a2$$

Velocidad de producción y consumo de ácido propiónico:

$$\frac{dp1}{dt} = b5 * S1 - b6 * p1$$

Velocidad de producción y consumo de ácido butírico

$$\frac{db}{dt} = b7 * S1 - b8 * yb$$

Velocidad de producción y consumo de ácido isovalérico

$$\frac{dl}{dt} = b9 * S1 - b10 * l$$

Velocidad de producción de metano

$$\frac{dM}{dt} = b4 * a2 + b6 * p1 + b8 * b + b10 * l$$

Modelo 2:

Velocidad de consumo de sustrato:

$$\frac{dS2}{dt} = \frac{-K1 * S1}{K2 + S1} - K3 * S1$$

Velocidad de producción de metano:

$$\frac{dM2}{dt} = \frac{-K1 * M2}{b2 + M2}$$

Los autores del trabajo que sirvió como acople para este trabajo ofrecieron los valores de las constantes para cada ecuación de cada modelo²², valores obtenidos producto de una gran variedad de pruebas experimentales y se presentan a continuación:

Parámetro	Valor
b ₁	1.1044e-2
b ₂	2.5779e-2
b ₃	2.0887e-2
b ₄	6.402e-3
b ₅	1.1316e-2
b ₆	2.53e-4
b ₇	1.745e-3
b ₈	8.562e-3
b ₉	6.98e-4
b ₁₀	2.351e-3

Tabla 10 Parámetros cinéticos (día-1) para modelos de simulación dinámica ²³

Parámetro	Valor
K ₁	6.9832e-4
K ₂	1.1250e-2
k ₃	2.1670e-2

Tabla 11 Constantes cinéticas (día-1) para modelos de simulación dinámica ²³

Para la última parte de las simulaciones se hizo uso de los modelos para la determinación de la constante de velocidad de reacción Kt, la cual está en función de condiciones de operación como pH, Temperatura, porcentaje de Humedad entre otros.

3.3.2. Optimización

Una vez se realizó el análisis de sensibilidad se obtuvieron comportamientos sobre los cuales se hizo una idea de cuál era el camino a seguir en pro de la optimización del proceso, tomando los comportamiento que presentaron mejores eficiencias de producción de metano con respecto al consumo de sustrato y los parámetros microbianos los cuales mostraran un menor impacto negativo en la generación de biogás por digestión anaerobia; se realizaron nuevos análisis de sensibilidad con el fin de llevar optimizar de forma iterativa los mejores resultados de cada análisis y llegar a un punto de convergencia en las condiciones de operación del proceso que ofrezca un proceso de digestión controlado y eficiente.

3.3.3. Contrastes entre pruebas experimentales y los comportamientos óptimos arrojados por las simulaciones.

Con los valores obtenidos en las simulaciones iniciales, así como las simulaciones en donde las condiciones de operación convergen en uno punto óptimo, se realizó un análisis cualitativo con el fin de observar la diferencia entre los comportamientos iniciales y los óptimos producto de las simulaciones iterativas.

4. Establecer las especificaciones de operación optimas.

Cada análisis representó un comportamiento basal u óptimo para cada materia prima por lo que una vez obtenidos los resultados de las condiciones óptimas de

operación se relacionaron con las diferentes materias primas con el fin de evidenciar las materias primas que mejores beneficios brindan al proceso.

- 4.2.** Establecer materias primas optimas (especificar pretratamientos, si así lo requieren).

Para este caso en específico se tuvieron en cuenta características de las materias primas en relación con el proceso como: generación de Metano en relación a la carga total de materia prima; acceso a la materia prima, oferta de la materia prima; relación oferta de materia prima con demanda de biogás, eficiencias de proceso en Kg de metano producidos y eficiencia en tiempos de residencia.

- 4.3. Especificar posibles variables de perturbación en el proceso.**

En el proceso de biodigestión hay muchos factores que pueden afectar de forma directa o indirecta el proceso. Por lo que para este caso se tuvo en cuenta información bibliográfica. Características como la presencia de desechos los cuales contienen microorganismos que realizan procesos de metabolización que inhiben la digestión y como resultado la generación de biogás. Otra característica que se tuvo en cuenta fue el estado en el cual se analiza la materia prima. Este ítem se realizó a partir de información bibliográfica y personales.

- 4.4. Balances de Materia y energía**

Con ayuda del software Microsoft Excel se realizó un esquema del reactor tipo batch operado en condiciones óptimas, se tuvo en cuenta información bibliográfica encontrada en diferentes fuentes, las cuales hicieron parte vital de

este proyecto y que ayudaron a robustecer el mismo. Los balances se realizaron teniendo en cuenta el funcionamiento cotidiano que tendría este.

$$\text{SALIDAS} - \text{ENTRADAS} + \text{ACUMULACIÓN} = \text{GENERACIÓN}$$



Figura 16 Esquema general de la conservación de la masa y la energía.²⁴.

4.4.1. Balances de materia.

Se tuvo en cuenta el balance general de materia de un reactor tipo batch.

Debido a que a un reactor tipo Batch no entra ni sale materia se tiene:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Tasa de} \\ \text{Materia} \\ \text{ACUMULADA} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Tasa de} \\ \text{Materia} \\ \text{ENTRANTE} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Tasa de} \\ \text{Materia} \\ \text{SALIENTE} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Tasa de} \\ \text{Materia} \\ \text{REACCIONANTE} \end{array} \right)$$

(Las flechas rojas con '0' indican que las tasas de entrada y salida son cero.)

Figura 17 Balance de Masa de un Reactor Tipo batch.

para realizar el balance de materia y determinar los valores masicos de lo que se acumula y de lo que reaccionó, se consideró el proceso como un proceso en flujo estacionario con acumulación, debido a que bajo otra perspectiva se puede asumir que el reactor puede operar a flujo semicontinuo. Es por lo anterior que se obtuvo el siguiente balance sobre el cual se trabajó:



Figura 18 Balance de materia global para el reactor Batch que se propone en este trabajo.

Se establecieron las variables de entrada para desarrollar el balance y establece las variables a encontrar.

Variables	Magnitud	Unidades
carga (M.P.)	7	Kg
lípidos	60	%
carbohidratos	20	%
proteínas	20	%
densidad CH ₄	0,656	KgCH ₄ /m ³ CH ₄
ef. CarbH.	0,37	m ³ CH ₄ /KgST
ef. Lip.	1,44	m ³ CH ₄ /KgST
ef. Prot.	0,49	m ³ CH ₄ /KgST
humedad (mix. S-L)	50	%
H ₂ O(v)	7	%

Tabla 12 . Variables de entrada para balance de masa^{11, 12, 25}.

Con la ecuación general se puede relacionar las masas totales con las específicas de cada componente de flujo.

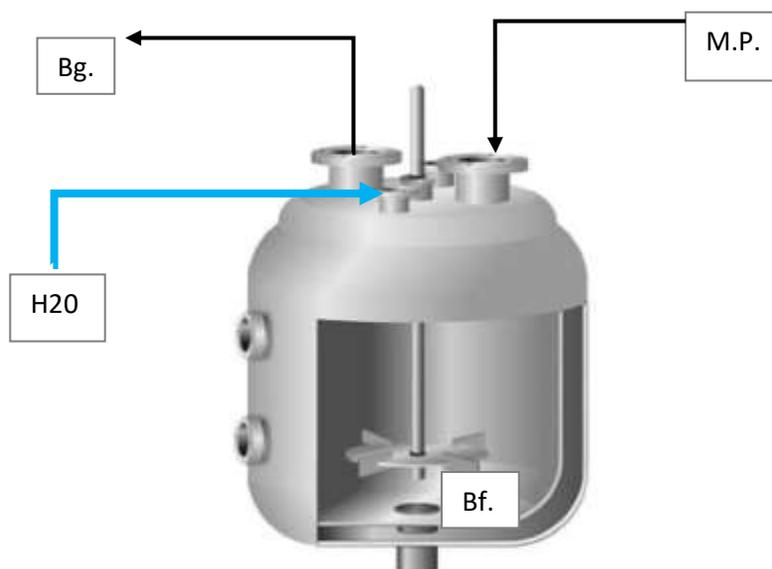


Figura 19 Representación gráfica genérica del balance de materia para el reactor tipo batch a trabajar.

M.P.		
carga (M.P.)	7	Kg
lípidos	60	%
carbohidratos	20	%
proteínas	20	%
humedad	20	%

Tabla 13 Condiciones de entrada de la materia prima

Con las ecuaciones de balance se calcularon los valores masicos de metano y dióxido de carbono generados, así como las cargas de cada componente de la materia prima y en la corriente de salida del gas, también se calculó la cantidad de materia que se acumula dentro del reactor, la cual representa el biofertilizante generado de la biodigestión con un remanente de agua líquida. Las masas de cada uno de estos componentes postdigestión se calcularon y se presentaran más adelante en el capítulo 3 de análisis y resultados.

4.4.2. Balances de energía.

Para el balance de energía se tuvo en cuenta, como primera medida que el flujo de calor es estacionario con acumulación de calor, siendo análogo al balance, con la diferencia que en este se tiene flujos masicos en lugar de cargas másicas, se asume que la generación de energía por reacciones exotérmicas es compensada con reacciones endotérmicas y que la diferencia es despreciable. Por lo que la ecuación para el balance general de transferencia de calor es el mismo mostrado en la figura 17.

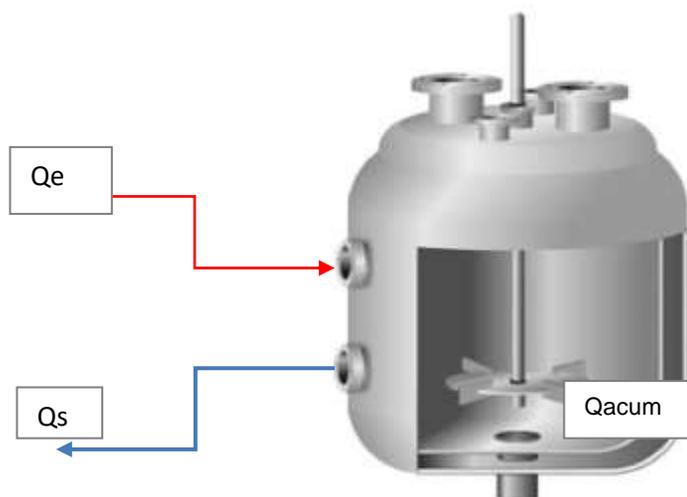


Figura 20 Representación gráfica genérica del balance de materia para el reactor tipo batch a trabajar

condiciones de entrada		
H2O e	10	Kg/min
Cp. H2O	4,18	KJ/Kg.K
Tin(°c)	50	
A.T.	0,9393362	m
Esp.	0,004	m
K. acero	13,4	J/min*m*K

Tabla 14 Condiciones de entrada para balance de energía.

- 5. Diseño de un prototipo de reactor biológico a escala para el proceso de biodigestión.**
- 5.2. Establecer el tipo de reactor batch a diseñar con sus ecuaciones de diseño.**

Como ya se ha mencionado con anterioridad los reactores tipo batch son comúnmente conocidos por su amplio uso en procesos que involucran reacciones biológicas y/o asociadas a catalizadores microbianos, es por esto que en este proyecto se planteó el diseño de un reactor tipo batch con enchaquetado que se acople a un proceso con condiciones óptimas obtenidas por las simulaciones y previos análisis de sensibilidad. Se escoge además el uso de un reactor tipo batch con enchaquetado debido a que también son comúnmente utilizados para procesos que requiera altas demandas de producto. En este caso el reactor tipo batch es idóneo para corroborar experimentalmente el estudio cinético por simulaciones y los análisis de sensibilidad para la optimización progresiva del proceso.

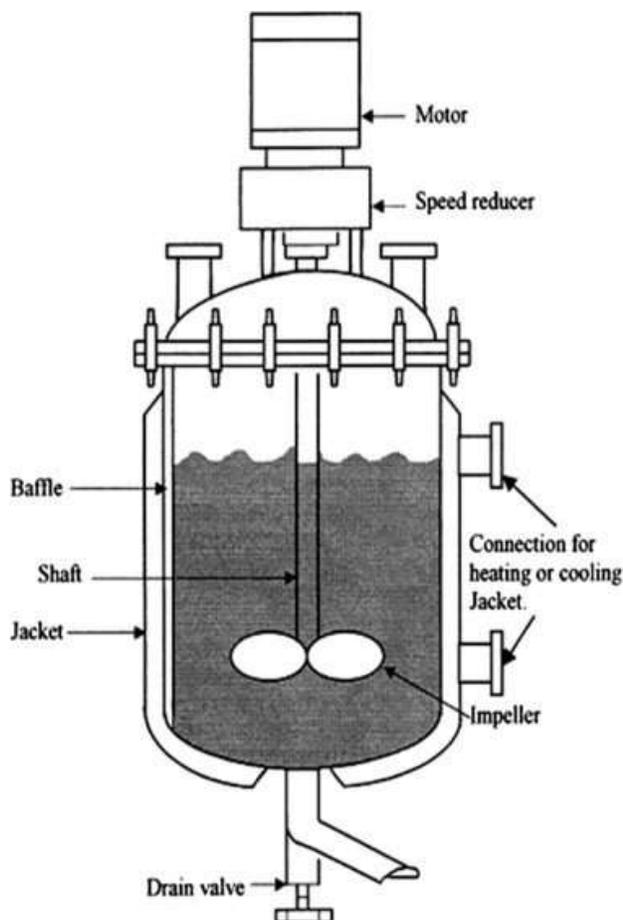


Figura 21 Prototipo de reactor tipo Batch con enchaquetado. ²⁶

En este punto es fundamental hablar de ecuaciones de diseño del reactor tipo batch para estimar el tiempo de residencia en función de la conversión, el flujo molar y el volumen. También es útil en muchos casos obtener el tiempo de residencia expresándolo en términos de C_{A0} .

$$t = N_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A V} \quad 27$$

Ecuación de diseño de un reactor batch en términos de conversión para el cálculo de tiempo de residencia.

$$t = C_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} = - \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{r_A} \quad 27$$

Ecuación de diseño de un reactor batch en términos de concentración del reactivo limite para el calculo del tiempo de residencia.

Donde t es el tiempo de residencia. V es el volumen del reactor C_{A0} es la concentración inicial del reactivo limite. X_A es la conversión del reactivo limite y r_A es la velocidad de reacción en términos del reactivo limite.

5.2.1. Especificaciones de sistemas de control (temperatura y presión).

Temperatura

Para los sistemas de control de la temperatura se realizó un análisis de sensibilidad en el cálculo de Kt , con el fin de observar la influencia en el comportamiento del proceso. Dependiendo de la respuesta en la gráfica se consideró el margen de tolerancia sobre el cual se debe manejar el sistema de control de temperatura.

Presión.

El sistema de control de presión se propone desde un punto de vista del criterio del operador, por términos de economía, en donde se ubica un manómetro junto con una alarma sonora en la parte superior del reactor, en la zona de extracción del gas por despresurización ligera (ya que el objetivo es mantenerlo lo mas cerca posible a presión atmosférica) con el propósito de indicar la despresurización del reactor cuando lo requiera.

Agitación

Se plantea un programador de agitación en el cual se programen agitaciones esporádicas de 2 minutos cada 10 con el fin de garantizar la homogeneidad del complejo de digestión. La configuración de agitación está sujeta a cambios producto de las observaciones obtenidas.

A continuación, se presenta el P&ID del diseño completo de un reactor tipo batch con sistemas de control integrados

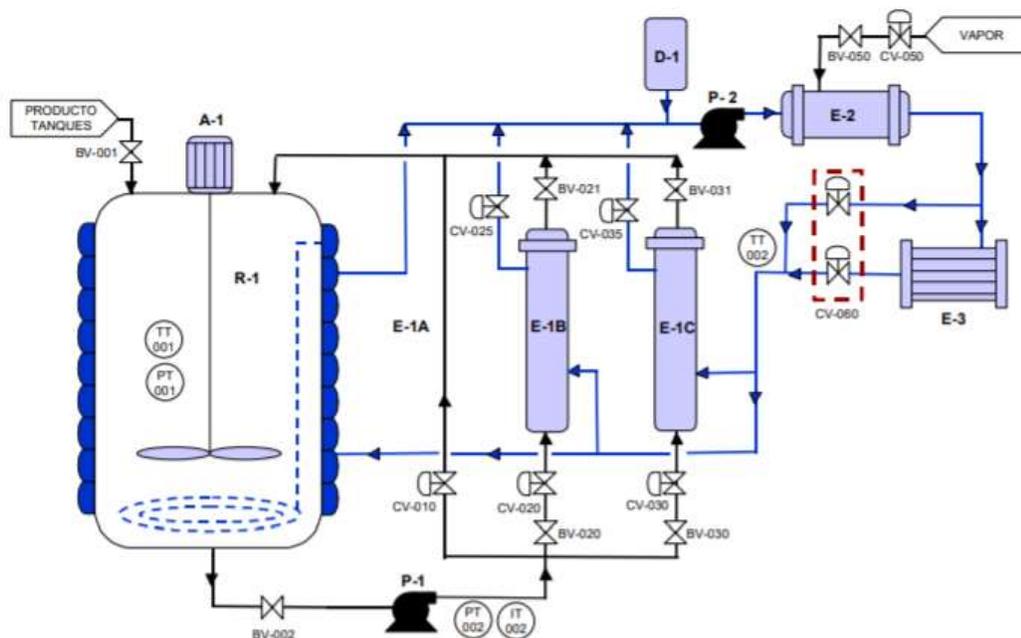


Figura 22 P&ID de un reactor tipo batch con sistemas de control integrados.²⁸

Capítulo 3: Resultados y Análisis

Simulaciones

Para los 4 primeros casos se realizaron simulaciones de modelos cinéticos genéricos en donde se asume que el sustrato es totalmente consumido por el microorganismo, por lo que el análisis se centra en la influencia que tienen los parámetros propios de los microorganismos en el proceso, en otras palabras, la influencia que tienen los agentes microbianos en el proceso general.

Caso 1:

Para el primer caso se planteó una simulación que mostrara el comportamiento en parámetros microbianos extremos y poco realista con el fin de identificar los extremos opuestos, donde el proceso fracasa, para este caso específicamente se tomaron condiciones de $\mu_{max} = 0.6$, $K_s = 1.4$ y rendimientos fijos de 0.5. en la gráfica se observa un proceso en el que el proceso de inoculación es amplio cercano a los 8 días donde la generación de productos es mucho menor con relación a la cantidad de sustrato utilizado (15Kg/L para este primer caso). Cabe resaltar que la producción de biogás es cerca de apenas 15% del total de sustrato utilizado.

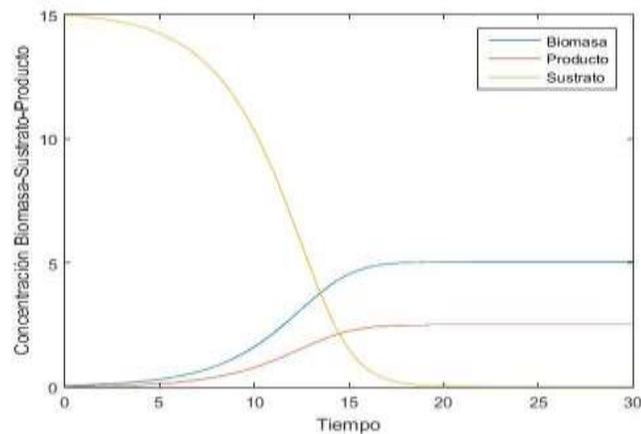


Figura 21. Gráfico del comportamiento de biodigestión caso 1.

Caso 2.

Para el caso 2 se considera la variación medida de los parámetros con el propósito de encontrar patrones de comportamiento con respecto a rangos predeterminados de variación. Para un $\mu_{\text{máx.}} < 1$, un $K_s = 1$ y rendimientos fijos en 0.5, se observa que la producción de biogás aumento considerablemente con respecto a la cantidad de sustrato utilizado, alcanzando tiempos de residencia de 10 a 15 días. Para una carga de 7 kg de material orgánico húmedo, se alcanzó una generación de biogás del 30% con respecto a la carga de biomasa utilizada.

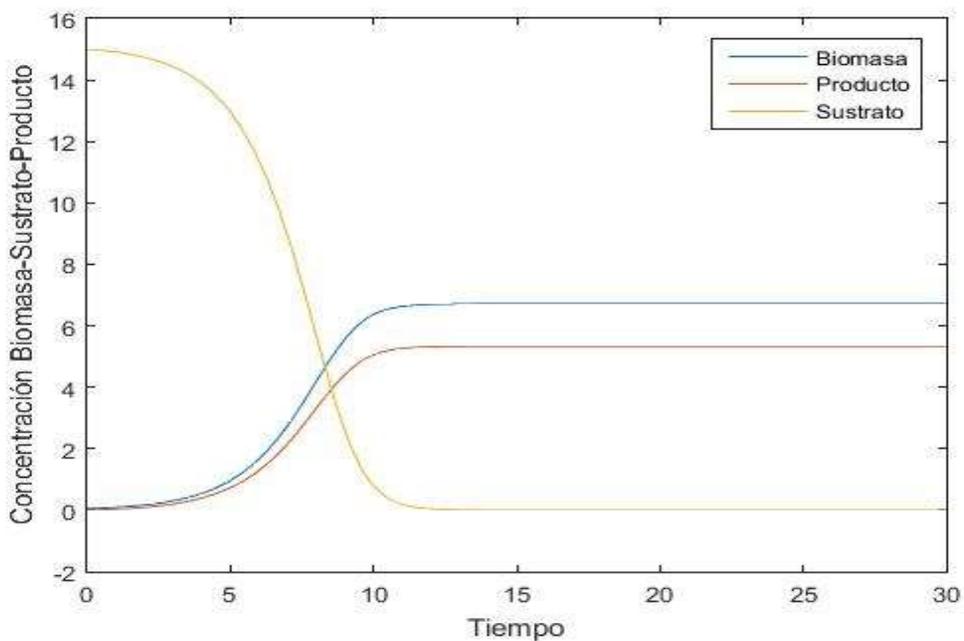


Figura 23 Grafico del comportamiento de biodigestión caso 2.

Caso 3.

Siguiendo con lo planteado en el caso 2. Se variaron los valores de K_s , siguiendo la tendencia de variación que hasta este caso se ha tenido con la única diferencia de que el μ_{max} se fijo en el mismo valor que en el caso 1 con el fin de observar, para este caso, con mayor detenimiento la influencia de la disminución de K_s en el comportamiento del proceso. Para un $\mu_{max} = 0.6$, un $K_s < 1$ el comportamiento es similar al esperado, la generación de biogás es del 30% con relación a la cantidad de sustrato utilizado, aunque el tiempo de residencia y de inoculación se redujo. El tiempo de residencia es cercano esta entre los 7 y 10 días.

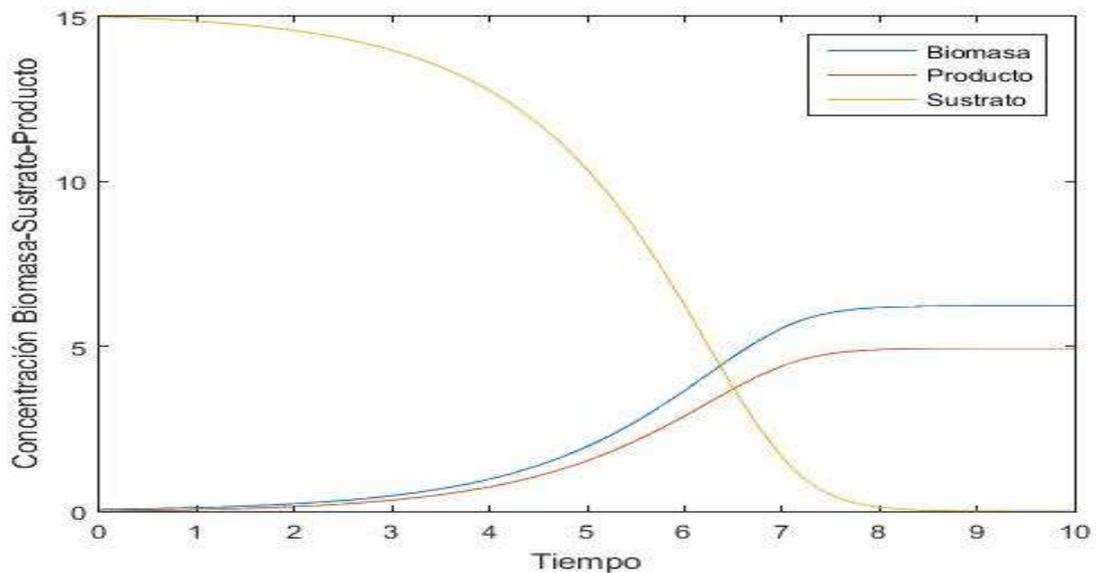


Figura 24 Gráfico del comportamiento de biodigestión caso 3.

Caso 4.

En el caso 4 se establece un sistema donde el parámetro K_s se fija en 1 con el fin de observar, para esta ocasión la influencia del aumento de μ_{max} en el comportamiento del proceso la generación de biogás cae por debajo del 15 % del total del sustrato seco utilizado y el tiempo de residencia se redujo insignificadamente. También se puede observar que los tiempos de estabilización cuando μ_{max} aumenta son mas prolongados a pesar de que el tiempo de inicio de consumo de sustrato se reduzca.

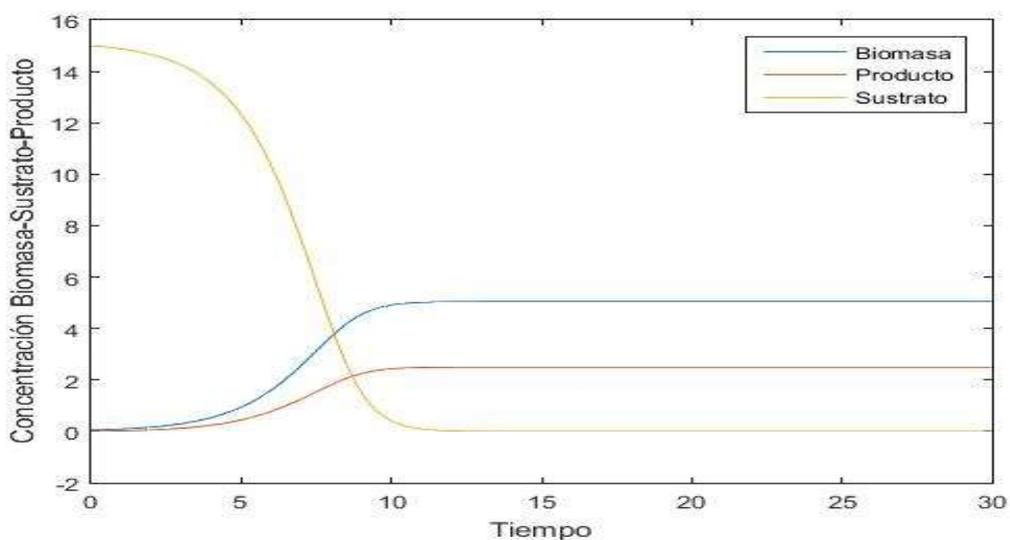


Figura 25 Grafico del comportamiento de biodigestión caso 4.

Caso 5

En el caso 5 se simula el proceso de acidogénesis, el primer proceso de descomposición de materia orgánica bajo concentraciones iniciales cercanas al cero, a excepción de la glucosa. Con este grafico se puede observar la generación de productos intermedios que facilitan la metabolización de los nutrientes por parte de los microorganismo, cumpliendo

una función de auto catálisis para el proceso, en donde se genera productos como el ácido acético, ácido butírico y ácido isovalérico, que se forman a partir de una ruptura previa de una cadena carbonatada más grande, permitiendo que la degradación aumente exponencialmente en el tiempo, aumentando a su vez la velocidad de reacción global del proceso favoreciendo la generación de biogás.

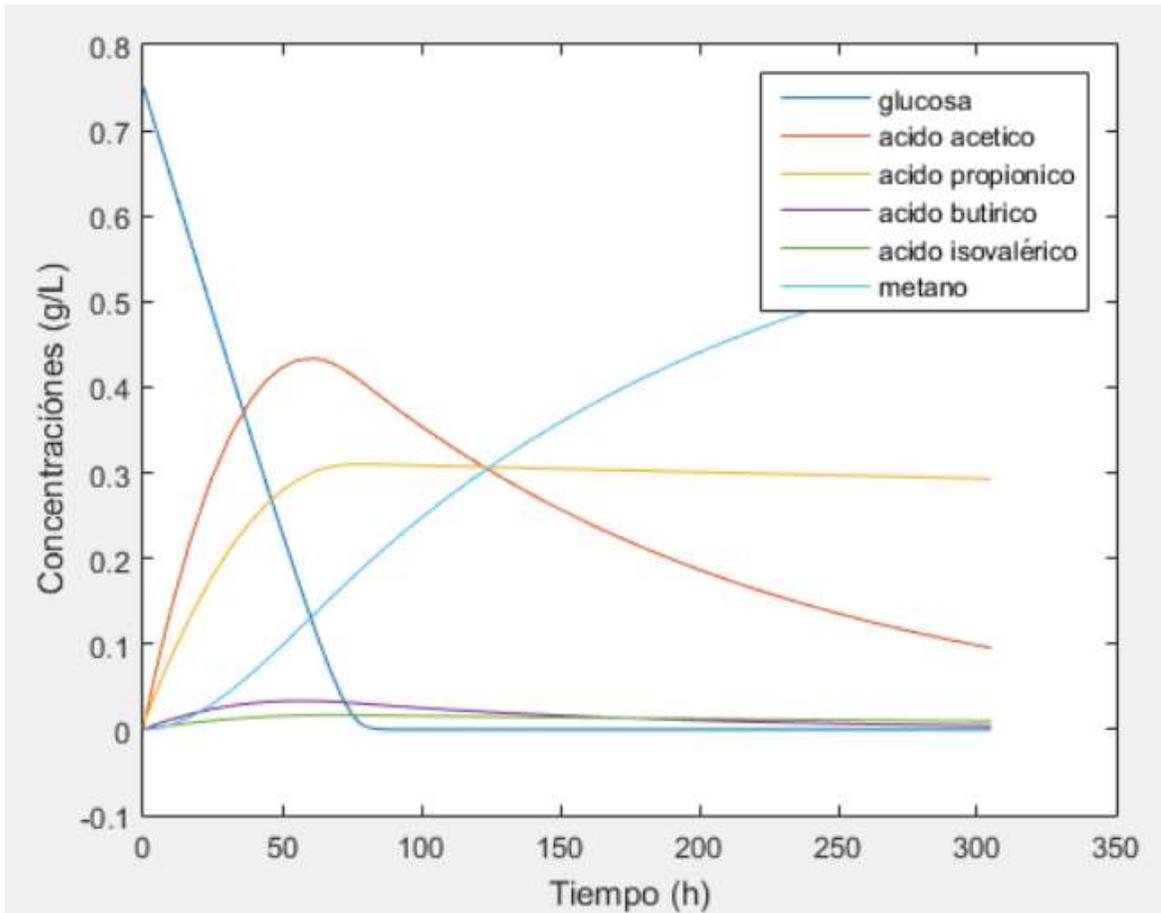


Figura 26 Gráfico del comportamiento del proceso de acidogénesis caso 5.

Simulación del proceso de biocompostaje con el modelo que incluye la constante cinética K_t .

Para este apartado, se tuvieron en cuenta 2 materias primas principalmente, para el análisis de sensibilidad de las condiciones óptimas de operación para cada una. A cada materia prima se le realizaron dos simulaciones producto de la optimización por iteración antes mencionada en donde se varió una o máximo dos condiciones con respecto de la otra con el propósito de observar las repercusiones y la influencia de la variable modificada en el proceso general de digestión para cada materia prima.

Residuos de jardinería y agricultura

Para este estudio se modificaron las temperaturas y la humedad global del complejo de degradación.

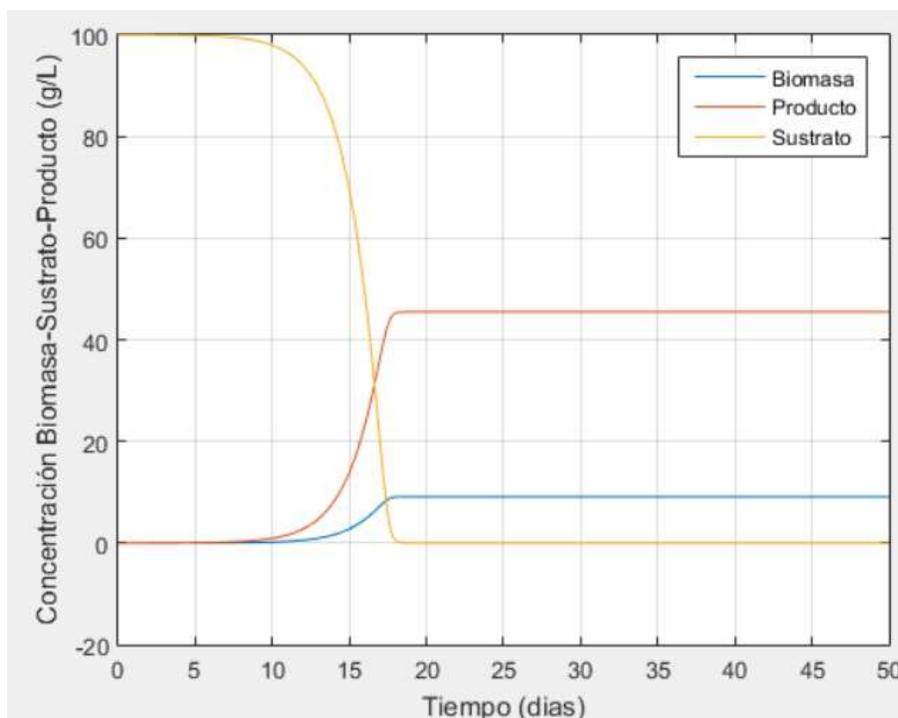


Figura 27 Comportamiento de la simulación A de digestión con residuos de jardinería y agrícolas

Variable	valor
%HUMEDAD (Mc)	50
% OXIGENO	5
TEMPERATURA (°C)	50
pH	6
Tiempo residencia (días)	18

Tabla 15 Condiciones arrojadas por la simulación A con desechos de jardinería y agrícolas

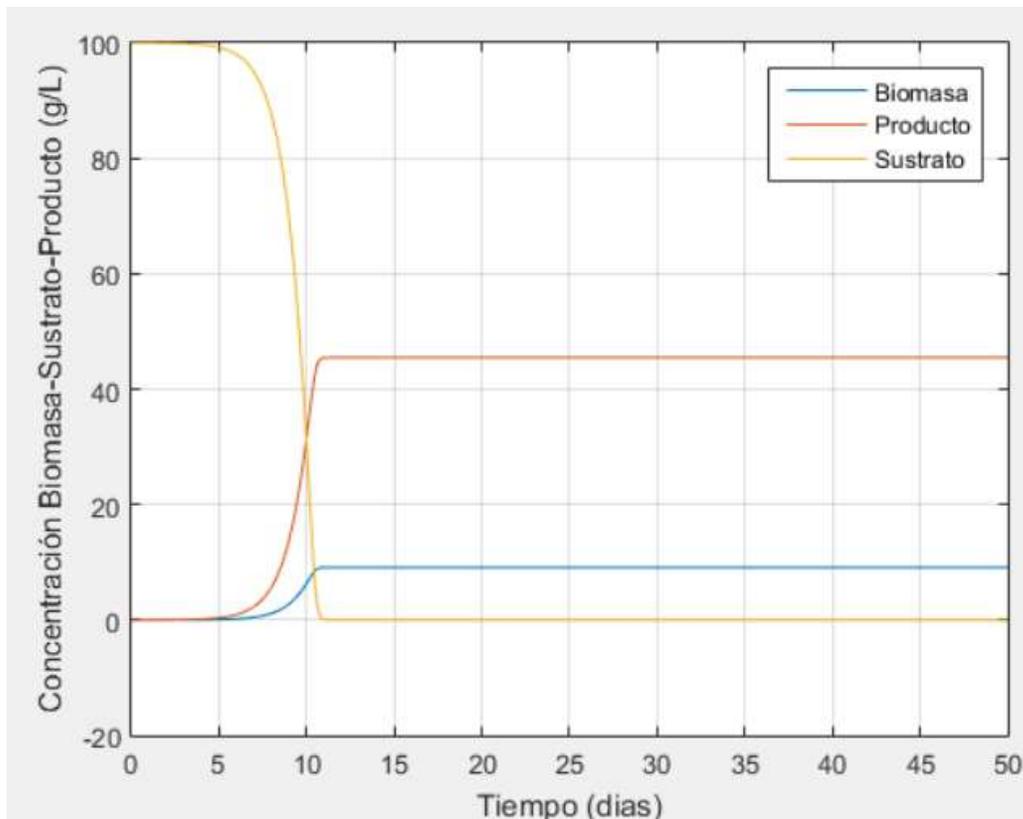


Figura 28 Simulación B del comportamiento de digestión con residuos de jardinería y agrícola.

variable	valor
%HUMEDAD (Mc)	30
% OXIGENO	5
TEMPERATURA (°C)	40
pH	6
Tiempo residencia (días)	11

Tabla 16 Condiciones arrojadas por la simulación A con residuos de jardinería y agrícola.

A pesar de que las dos simulaciones ofrecen información muy similar en cuanto a generación de producto y biomasa, como es notorio, la principal variación se presenta en el tiempo de residencia de la digestión, teniendo en cuenta que se presentaron dos variaciones en la temperatura y la humedad, siendo mas bajas las condiciones del experimento B, siendo este ultimo el experimento con menor tiempo de residencia (11 días) en comparación con el experimento B (18 días). Esto puede ser debido a que el exceso de agua y temperatura puede ser contraproducente para la formación de biogás, debido a que estas condiciones pueden inhibir el complejo de microorganismos que llevan a cabo la degradación de la materia prima con selectividad hacia la producción de biogás. En este caso específico la selectividad no se vio afectada mas si, el tiempo de inoculación y generación de productos.

Residuos de curtiembres

Para el estudio con esta materia prima se siguió con el mismo procedimiento que con la materia prima anterior.

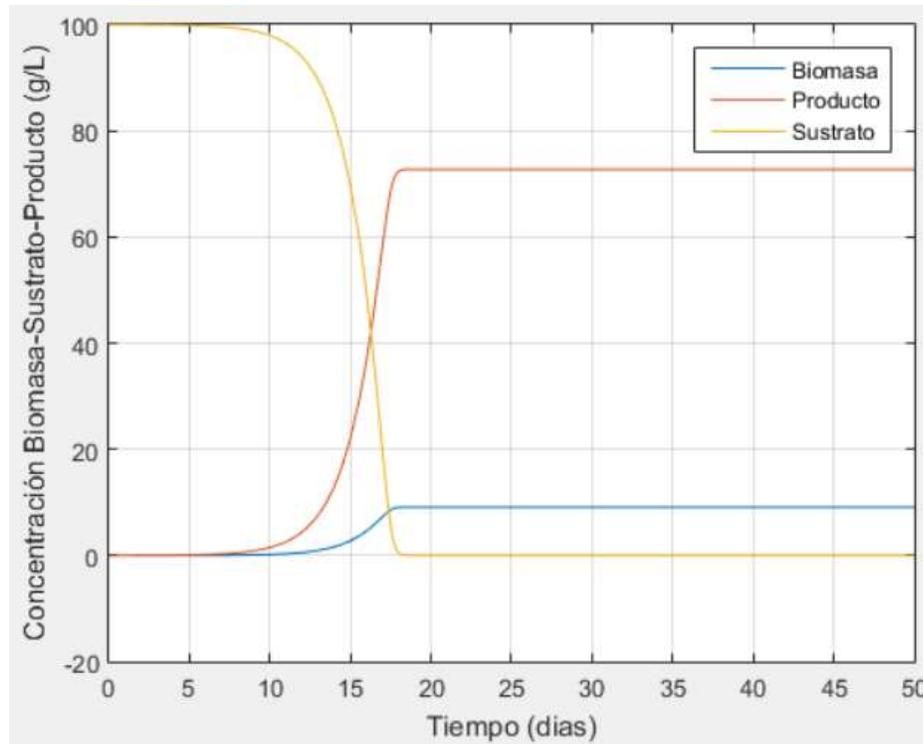


Figura 29 Simulación A del comportamiento de digestión con residuos de curtiembres.

Variable	valor
%HUMEDAD (Mc)	50
% OXIGENO	5
TEMPERATURA (°C)	50
pH	6
Tiempo residencia (días)	18

Tabla 17 Condiciones arrojadas por la simulación A con residuos de curtiembres.

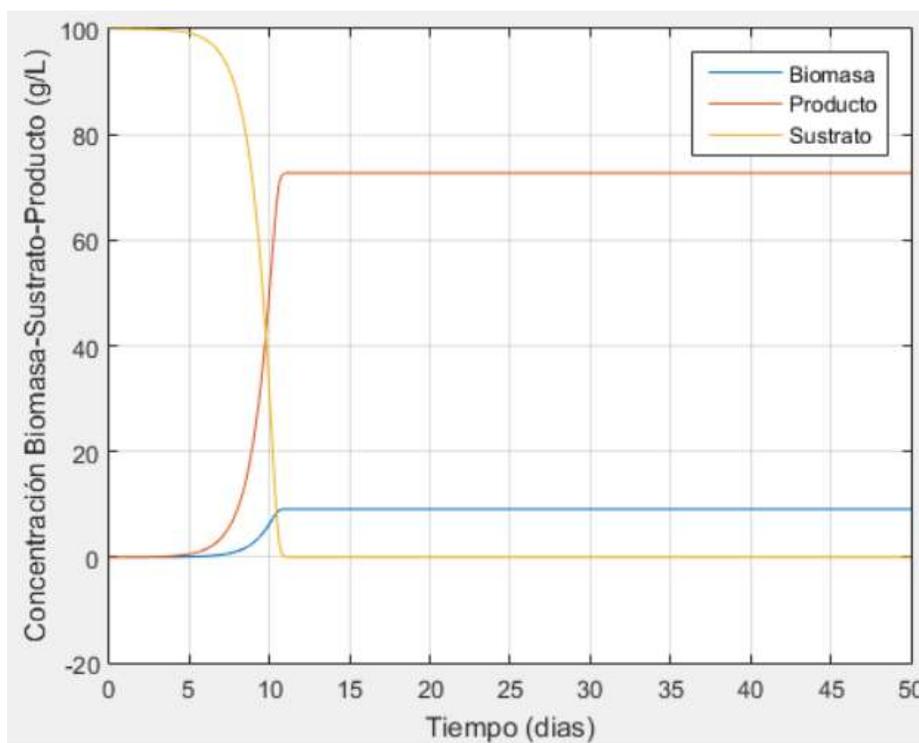


Figura 30 Simulación B del comportamiento de digestión con residuos de curtiembres.

Variable	valor
%HUMEDAD (Mc)	40
% OXIGENO	5
TEMPERATURA (°C)	40
pH	6
Tiempo residencia (días)	11

Tabla 18 Condiciones arrojadas por la simulación B con residuos de curtiembres.

En el segundo estudio se pudo observar un comportamiento similar que en el estudio anterior, con la diferencia que la disminución de las dos variables (humedad y temperatura fue gradual), como consecuencia se redujo de forma considerable el tiempo de residencia a 11 días con respecto del experimento A, esto debido, posiblemente a que las curtiembres están cargadas de grasa y proteínas insolubles en agua lo cual, en exceso puede retrasar la inoculación de los microorganismos, y/o el acondicionamiento de estos en los focos de reproducción (cepas). Cabe resaltar que para este tipo de residuos compuestos es vital la homogenización del mismo con el fin de que la degradación se lleve a cabo de forma homogénea, en muchos casos las simulaciones no tienen en cuenta los perfiles de temperatura en el caldo de fermentación y además las variaciones en el pH, las variaciones en las concentraciones de sustrato y de las cepas mismas de los microorganismos, por lo que en una gran parte de los casos solo se esta simulando una parte o segmento de del caldo de fermentación y arrojando datos erróneos con los cuales la investigación puede tomar diferentes rumbos. Por otra parte este proyecto pretendió tener en cuenta materias primas compuestas, es decir, materias primas que tuvieran diferentes proporciones de diferentes residuos, con el fin de optimizar el proceso de degradación a provechando en lo posible la disponibilidad de los desechos con el fin de satisfacer una eventual demanda industrial en un futuro.

Balances de Masa y Energía

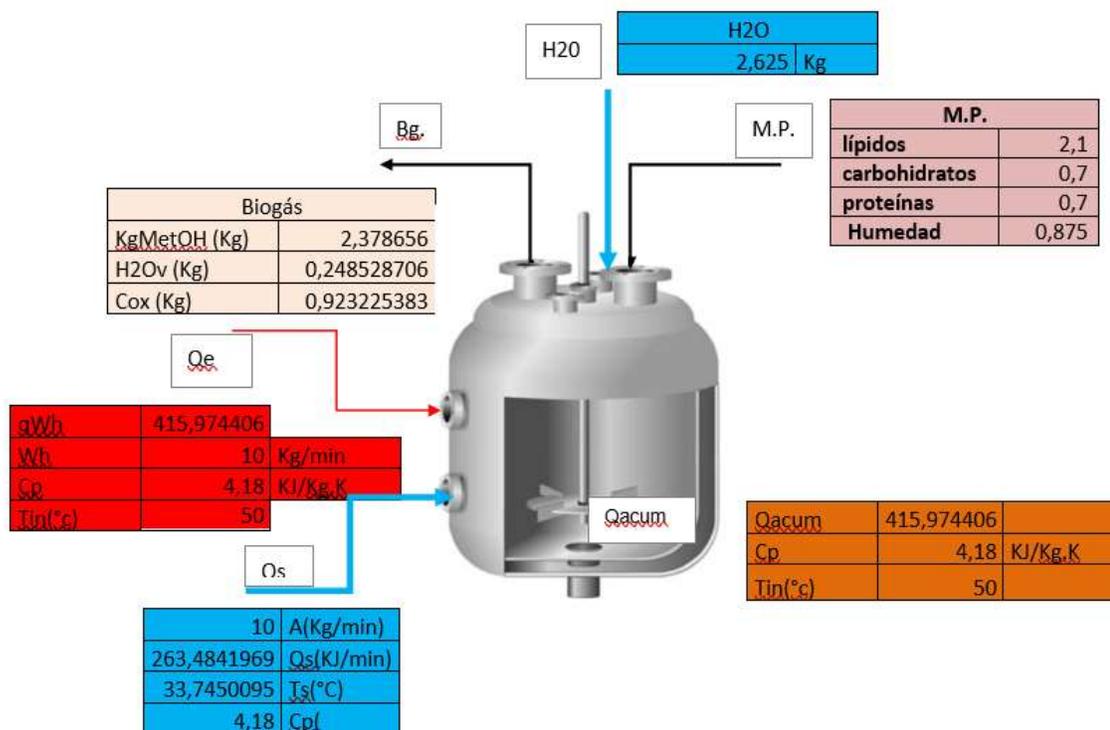


Figura 31 Representación de reactor tipo batch con cargas másicas y flujos de calor calculados con los balances.

Con ayuda de los balances planteados anteriormente se calcularon las cargas másicas, flujos de calor y temperaturas del sistema de calefacción del enchaquetado. Las temperaturas de la parte externa e interna del reactor es prácticamente la misma debido a que el espesor de la pared del reactor es el necesario para que no se forme un perfil de temperatura, o gradiente de temperatura de gran magnitud.

Con el balance de materia y energía se encontraron condiciones de operación relevantes, como el hecho de que la entrada y salida de agua de calefacción debe estar seccionadas por material aislante con el propósito de que no se generen sumideros de calor y se generen gradientes de temperatura en el reactor.

Conclusiones

Con las simulaciones que se realizaron de diferentes modelos de simulación de comportamiento cinético del proceso de digestión aerobia de residuos orgánicos se observó la influencia significativa de los parámetros cinéticos de en el comportamiento del proceso en cuanto a generación de productos consumo de sustratos y tiempos de residencia. Por lo cual se determinó que los parámetros cinéticos óptimos para llevar a cabo el proceso de digestión en el reactor batch, parámetros de μ_{max} y K_s menores que 1 permitirán una mayor generación de producto en menor tiempo, es decir, que la presencia de microorganismos específicos que se caractericen por presentar parámetros cinéticos menores que 1, actuaran como catalizadores biológicos en el proceso. De lo anterior se puede inferir que microorganismos que presenten estos parámetros serán los adecuados para el proceso, teniendo en cuenta que en el caldo de fermentación se presentan complejos de microorganismos, es recomendable la caracterización de las materias primas a profundidad, realizando análisis ya sea desde un punto únicamente bibliográfico o desde un punto de vista de análisis instrumental con equipos especializados, es especial para llevar a cabo caracterizaciones de tipo microbiológicos.

Por otra parte, se encontró que para el proceso de biodigestión son favorables materias primas provenientes de residuos de grasas y aceites, que se componen en su gran mayoría de lípidos los cuales presentan altas conversiones en metano (del 90-99 %). Estas conversiones se logran por lo general por otros mecanismos no biológicos, sin embargo no es un limitante que estas conversiones no se puedan alcanzar por mecanismos biológicos, los inconvenientes para llegar a estas conversiones resultan de la característica que tienen los desechos de poseer grandes complejos de microorganismos con características variadas, lo cual en muchos casos es la razón por la cual hay metabolizaciones que inhiben el proceso de producción de biogás, esto sumado al hecho de que los lípidos en muy remotos casos se encuentran con altos grados de pureza debido al hecho mismo de obtenerlos como desechos. En este trabajo se propone la digestión de materias primas mixtas, compuestas de diferentes residuos orgánicos que presenten leves variabilidades en las condiciones y parámetros cinéticos, previniendo en cierto grado la sensibilidad a perturbaciones ajenas al proceso; además se presenta un abanico de posibilidades en cuanto a materias primas a descomponer manteniendo un

equilibrio entre los beneficios de una materia prima en el proceso y la disponibilidad que se tenga de esta.

Por otra parte, se encontraron condiciones límites de operación del proceso de biodigestión de residuos agrícolas y urbanos en donde temperaturas por encima de 50 afectarían de forma directa el tiempo de residencia y las fases de inoculación previas al proceso de descomposición; así mismo una humedad por encima del 50% pueden traer repercusiones en los tiempos del proceso, el más notorio para este caso es el tiempo de residencia.

Con el análisis de las materias primas en función de la constante cinética calculada a partir de variables de operación, se obtuvieron resultados al contrastar las dos materias primas (residuos de jardinería y curtiembres para este caso en específico) entendiendo que a pesar de que las curtiembres en uno de los casos presentó el menor tiempo de residencia (11 días), es la materia prima que mayor tratamiento requiere previo al proceso de biodigestión ya que sus desechos son principalmente pieles y cueros provenientes de reses y otros animales de granja por lo que resultaría poco rentable desde el punto de vista económico y de practicidad, aunque cabe resaltar la enorme importancia que representa tener en cuenta los residuos de las curtiembres en este proceso, debido a que estos desechos se han convertido en un verdadero problema ambiental y sanitario, por lo que su acople con el proceso de biodigestión profesa un enorme desarrollo en este ámbito, además que en términos de eficiencia resulta viable debido a que presenta altos rendimientos en periodos cortos de tiempo, con el debido pretratamiento, lo que marca uno de los caminos del desarrollo de estas tecnologías. Para el diseño se encontró que la carga ideal del reactor es de 7 Kg de materia prima en húmedo, con tiempos de residencia de 10-15 días, y cargas de agua equivalentes al 40% en peso con respecto a la materia orgánica seca cargada, logrando conversiones de sólidos totales en gas metano del 65-80% en periodos cortos de residencia como se mencionó anteriormente.

Bibliografía

- [1]. BOLÍVAR, H. RAMÍREZ, E. "PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA GENERADA EN LOS FRIGORÍFICOS DE BOGOTÁ" Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá D.C., 12 de Junio de 2012, Pag. 20-23.
- [2]. California Compost Quality Council (CCQC). 1999. CCQC Registered Compost. (Online). Disponible <http://www.crra.com/ccqc/>. California Compost Quality Council, San Francisco, California.
- [3]. RAMOS SUAREZ, J. "PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE BIOMASA DE LA MICROALGA *Scenedesmus* sp. PROCEDENTE DE DIFERENTES PROCESOS", Universidad Politécnica De Madrid, 2014, Pag. 12 – 15.
- [4] NAVARRO ARANGO, L. " DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAERÓBICO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA Y USO EXPERIMENTAL PARA LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA", Ocaña, 2015. Pag. 23 – 26.

-
- [5]. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XXXIX, núm. 1, 2005, pp. 35-48
- [6]. ZEA, J. BERNAL, J. CARVAJAL, D. 'BIODIGESTORES DE ESCALA A 50 LITROS, UNA SOLUCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE GAS, ABONO Y APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.' Corporacion Universitaria Minuto De Dios, Soacha, 2015, Pag. 14 – 17.
- [7]. CVN - Colombia una potencia en energías alternativas. (n.d.). Retrieved July 21, 2019, from <https://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/article-117028.html>.
- [8]. ARCE CABRERA, J. 'Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del Litoral' Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, Guayaqui, Ecuador, Agosto 2011, Pag. 11 – 24.
- [9.] Parra Huertas, Ricardo Adolfo. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159. Retrieved December 07, 2019, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014&lng=en&tlng=es
- [10]. Corrales, L. Romero D. Macías, J. Vargas, A. 'Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta' Articulo de revisión, 2019, desde

- <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>, 06/12/19, hora 8:45 am. Pag, 58 – 60.
- [11]. MANUAL DE BIOGÁS, Santiago de Chile, © FAO 2011, ISBN 978-95-306892-0
- [12] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Guía sobre el Biogás, Deutsches BiomasseForschungsZentrum, Quinta edición completamente revisada, Gülzow, 2010.
- [13]. CARRASCO ALLENDES, J. 'EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE BIOGÁS PARA AUTOABASTECIMIENTO ENERGÉTICO: UNA ESTRATEGIA PARA DIFERENTES CONTEXTOS' Universidad De Chile, Santiago De Chile, 2015.
- [14]. RELATORIA – instituto internacional de energías renovables. (n.d). Retrieved July 21, 2019, from www.corteconstitucional.gov.co/RELATORIA/2014/C-332-14.htm
- [15]. NAMA Database (2014), "Nationally Appropriate Mitigation Actions (NAMAs)", Wiki, www.nama-database.org/index.php/Main_Page (accessed 15 September 2014).
- [16]. MINOR P.,ESTEBAN 'Reactor Homogéneo Batch Y Semibatch' Visto desde <https://reactorquimico.wordpress.com/reactores-homogeneos-ideales-isotermicos/reactor-homogeneo-batch-y-semibatch/>, 06/12/19, 10:30 am.

- [17.] Energía en equilibrio con la naturaleza, BioWorks copyright 2012, visto desde <https://www.bioworks.com.mx/TBiogas.aspx> 06/12/19, 06/12/19,10:30 am.
- [18.] Factores que influyen en el compostaje, Mancomunidad de Residuos Domésticos de Cinco Villas Bortziriak, 2019 (c), visto desde <http://www.bortziriakzabor.com/es/factores-que-influyen-en-el-compostaje/>, 06/12/19,11:00 am.
- [19.] Sistema de digestión anaeróbica para purines y subproductos, SPENA GROUP, visto desde <http://spenagroup.com/sistema-digestion-anaerobica-purines-subproductos/> 06/12/19,11:30 am.
- [20.] Fernández Güelfo, L. "CARACTERIZACIÓN CINÉTICA DE LA DEGRADACIÓN ANAEROBIA TERMOFÍLICA SECA DE LA FORSU. EFECTO DE DIFERENTES PRETRATAMIENTOS SOBRE LA BIODEGRADABILIDAD DEL RESIDUO" Universidad de Cádiz, Cádiz 2008.
- [21.] Petric, I. "EVOLUTION OF PROCESS PARAMETERS AND DETERMINATION OF KINETICS FOR CO-COMPOSTING OF ORGANIC FRACTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE WITH POULTRY MANURE" Universidad de Tuzla, Tuzla (Bosnia y Herzegovina) 2012.
- [22.] Lorenzo Acosta, Y. "LA DIGESTION ANAEROBIA. ASPECTOS TEORICOS PARTE 1." Instituto Cubano de investigaciones de los derivados de la caña de azúcar, La Habana (2005).

-
- [23] Castro-Montoya, A. J.; Houbron, E. "MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA" Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, México.
- [24] Tarrazo J. "BALANCES MACROSCOPICOS DE MATERIA". Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- [25] Nature, ed. (12 de enero de 2006). "Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions". Consultado el 7 de septiembre de 2019.
- [26] Ahmed E. M. "HIDROGEL: PREPARACION, CARACTERIZACION Y APLICACIONES: UNA REVISION" centro nacional de investigaciones, Egipto (2013).
- [27] Lopez I., Borzacconi L. "INTRODUCCION AL DISEÑO DE REACTORES" Universidad de la Republica, Uruguay (2009).
- [28] Cajamarca J., Valverde J. "DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL CONTROL DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD PARA EL REACTOR QUIMICO DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL USADO EN LA ELABORACION DEL 5-HIDROXIMETILFURFURAL A PARTIR DE LA MELAZA DE CAÑA PARA LA OBTENCION DE BIOCOMBUSTIBLE" Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Cuenca, Ecuador (2012).