

CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA BASADA EN MATLAB
PARA EL MODELAMIENTO DEL PROCESO ANAEROBIO



MOISES ELIAS SILVA DAZA
JOHAN SEBASTIAN DIAZ RINCON



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2019

CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA BASADA EN MATLAB
PARA EL MODELAMIENTO DEL PROCESO ANAEROBIO

MOISES ELIAS SILVA DAZA
JOHAN SEBASTIAN DIAZ RINCON

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor
PhD. Ing. CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA
Doctor en Ingeniería Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2019

Autoridades Académicas

P. JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O. P.

Rector General

P. EDUARDO GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota de Aceptación

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decano de Facultad

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Director Trabajo de Grado

JONATHAN STEVEN MURCIA FANDIÑO

jurado

IBETH ELIANA CALDAS LUJAN

jurado

Villavicencio, abril, 2020

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida.

A mis padres por el apoyo incondicional durante todo el tiempo de formación académica, por haberme formado buenos sentimientos, hábitos y valores, los cuales me ayudaron a salir adelante en los momentos con mayor dificultad.

A mi familia en general que me brindó su apoyo en todo momento para salir adelante en mi proceso de formación profesional.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros padres, por su esfuerzo y por la confianza que nos brindaron durante todo este tiempo de aprendizaje.

Gracias a nuestro director el Doctor Christian José Rojas Reina, por la dedicación, esfuerzo, tiempo, conocimiento y experiencia que nos brindó siempre durante todo el desarrollo de la investigación, siempre muy atento guiándonos correctamente hasta este momento.

A Julieta Daza, por el apoyo incondicional y persistencia, por tener la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos y formarme como persona

A Reina Luz, no me alcanzan las palabras para expresar lo agradecido que estoy por tu apoyo incondicional durante todo este tiempo de aprendizaje.

A todo el personal de la Universidad Santo Tomás, en especial a la Facultad de Ingeniería Ambiental y su personal docente, por los conocimientos brindados, durante todos estos años.

Finalmente, gracias a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto

Contenido

Pág.

Resumen	12
Abstract	13
Introducción	14
1. Planteamiento del problema	16
1.1. Descripción del problema.....	16
2. Objetivos	19
2.1. Objetivo general	19
2.2. Objetivos específicos.....	19
3. Justificación	20
4. Alcance del proyecto	21
5. Antecedentes	22
6. Marco referencial	25
6.1. Marco teórico	25
6.2. Marco conceptual	26
6.2.1. Biodigestor	26
6.2.2. Sustrato:	27
6.2.3. Factores que influyen en la digestión anaerobia:	27
6.2.4. Biogás:	27
6.2.5. Sólidos Totales (ST):	27
6.2.6. Sólidos Volátiles (SV):	27
6.2.7. Demanda química de oxígeno (DQO).	28
6.2.8. Digestor.....	28
6.2.9. Cinética de primer orden.....	28
6.2.10. Cinética de Monod.	29
6.2.11. Procesos de transferencia en líquido-gas.	31

6.3. Marco legal.....	32
7. Metodología.....	33
7.1. Fase 1: Recolección información primaria para estimación de reacciones biológicas ..	33
7.2. Fase 2: Construcción del modelo para un proceso anaerobio	33
7.3. Fase 3: Simulación y validación del proceso anaerobio	34
8. Resultados	35
8.1. Modelación de la digestión anaeróbica	35
8.1.1. Modelación del proceso de conversión bioquímica.....	35
8.2. Implementación del modelo en Matlab/Simulink	36
8.2.1. Procesos bioquímicos.....	36
8.2.2. Procesos fisicoquímicos.....	36
8.2.3. Parámetros.....	37
8.2.4. Implementación en MATLAB ®/SIMULINK.	43
Conclusiones	52
Recomendaciones	53
Referencias bibliográficas	54
Anexos	59

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Diferentes modelos matemáticos para el proceso anaerobio.....	17
Tabla 2: Marco legal para la implementación y operación de biodigestores.....	32
Tabla 3: Ecuaciones de tasas cinéticas,.....	36
Tabla 4 Valores iniciales para las diferentes configuraciones	40
Tabla 5 Datos de parametrización del modelo.....	47
Tabla 6: Resultados de la simulación en las dos corridas	48
Tabla 7: Valores de concordancia para cada día simulado de la configuración 3.	49

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Línea de tiempo de los estudios internacionales y nacionales.	24
Figura 2 Curva de comportamiento de las cinéticas de las reacciones	31
Figura 3 Flujograma de la metodología.	34
Figura 4 Etapas de la digestión anaerobia para producción de biogás.	35
Figura 5 Estructura del modelo en Simulink.	44
Figura 6 Simulación con bloques para la fase de la hidrólisis.	45
Figura 7 Simulación en bloques para la fase del Acidogénesis y Acetogénesis.	45
Figura 8 Diagrama de bloques para la fase de la Metanogénesis.	46
Figura 9 Diagrama de bloques para Ley de transferencia de líquido a gas.	46
Figura 10 Método del trapecio	47
Figura 11 Comportamiento del proceso anaerobio en las diferentes configuraciones	50
Figura 12 Comparación de los valores de biogás simulados vs los reales.	51

Lista de Ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1 Ecuación para la hidrolisis	28
Ecuación 2 Ecuación de la cinética de Monod	29
Ecuación 3 Ecuación de la acidogenesis y acetogenesis	29
Ecuación 4 Ecuación para la metanogenesis	30
Ecuación 5 Ecuación de transferencia Liquido a Gas	31
Ecuación 6 Factor de conversión de la DQO.....	38
Ecuación 7 Calculo de la biomasa	38
Ecuación 8 Conversión de unidades del Factor DQO	38
Ecuación 9 Ecuación de producción de KgDQO/día.....	39
Ecuación 10 Ecuación de la hidrolisis	39
Ecuación 7 Método del trapecio	48

Lista de Anexos

	Pág
Anexo 1. Tabla biogas vs tiempo primera configuración	59
Anexo 2. Tabla biogas vs tiempo segunda configuración	60
Anexo 3. Tabla biogas vs tiempo tercera configuración.....	61

Resumen

Una de las problemáticas de la producción del ganado porcino es el desaprovechamiento de las excretas las cuales no son dispuestas de forma adecuada, generando impactos ambientales considerables. En la actualidad existen tratamientos de digestión anaerobia para la producción de biogás con altos contenidos de metano, por tal motivo se desarrolló un modelo matemático dinámico del proceso anaerobio aplicable al uso de excretas porcino e implementado en el software Matlab R2015a 8.5.0.184244 por medio de la herramienta Simulink. El modelo del proceso anaerobio consideró tres fases, siguiendo una cinética de 1er orden para la Fase 1: hidrólisis, una cinética de Monod para la Fase 2: acidogénesis y acetogénesis y Fase 3: metanogénesis. Este modelo permitió simular con un sustrato en específico (excretas porcinas para este proyecto), las cantidades teóricas de biogás producido, logrando una primera aproximación para la producción de biogás simulada con respecto a los datos reales obtenidos para el inicio del funcionamiento de un biodigestor. Sin embargo, es necesario considerar otros procesos adicionales, para simular procesos de decadencia e inhibición que ocurren en el mismo. Así mismo se entregó información sobre el proceso anaerobio y de las diferentes reacciones biológicas fundamentales que afectan la producción de biogás, presentando información para su aplicación en las condiciones locales.

Palabras Clave: Biogás, digestión anaerobia, energía renovable, modelo dinámico.

Abstract

One of the problems of pig production is the waste of excreta, which can be subjected to anaerobic digestion treatment for the production of biogas with high methane content. For this reason, a dynamic mathematical model of the anaerobic process was developed and implemented in the software Matlab R2015a 8.5.0.184244 by means of the Simulink tool. The model of the anaerobic process considered three phases, following a 1st order cycle for Phase 1: hydrolysis, a Monod kinetics for Phase 2: acidogenesis and acetogenesis and Phase 3: methanogenesis. This model allowed to simulate with a specific substrate (pig excreta for this project), the theoretical amounts of biogas produced, achieving a first approximation for the production of simulated biogas with respect to the real data obtained for the start of operation of a biodigester. However, it is necessary to consider other additional processes, to simulate processes of decline and inhibition that occur in the same. Information on the anaerobic process and the different fundamental biological reactions that affect biogas production was also provided, presenting information for application in local conditions.

Key Word: Biogas, anaerobic digestion, renewable energy, dynamic model.

Introducción

La economía global es dependiente de la producción de combustibles fósiles los cuales están en constante agotamiento, una de las alternativas para la sustitución de los combustibles fosiles son las energías alternativas las cuales pueden ser obtenidas por medio de la utilización de los residuos organicos (Huertas, 2015), una primera clasificación de los residuos se puede realizar en función de su origen, distinguiendo los residuos procedentes del sector primario (residuos agrícolas, ganaderos y forestales), los procedentes del sector secundario, residuos industriales (agroalimentarios, textiles, etc.) y finalmente los procedentes del sector terciario o de servicios, constituidos por residuos sólidos urbanos (RSU) y lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (Pomares, 1998). Una buena opción para la valorización económica de los residuos es por medio del proceso de digestión anaerobia en especial la de purines de cerdo, de esta manera se puede producir un gas aprovechable (Cendales Ladino, 2011).

La digestión anaerobia es un proceso dependiente de la temperatura donde los fenómenos de transferencia de materia, energía y cantidad de movimiento se ven influenciados por las condiciones atmosféricas de su entorno y por la configuración del biodigestor en el cual se desarrolla. Es por ello que surge la motivación de estudiar y evaluar los efectos que tiene las diferentes reacciones biológicas sobre todo el proceso de digestión anaerobia. La modelación y simulación matemática de procesos es una disciplina creada para el desarrollo de un mejor nivel de entendimiento de las partes de un sistema y de todo el sistema como conjunto (Jana, 2016).

Los digestores anaerobios son reactores biológicos en los que se ponen en contacto, en las condiciones adecuadas, la alimentación del proceso, que contiene los sustratos necesarios, con una microbiota muy compleja formada por un amplio conjunto de grupos de microorganismos, cuya actividad coordinada permite metabolizar los nutrientes en ausencia de oxígeno molecular disuelto en el medio, dando lugar a nuevos microorganismos, el digerido (o residuo ya digerido) y a un producto gaseoso, denominado biogás, formado principalmente por metano y dióxido de carbono (Angelidaki, Ellegaard, & Ahring, 1999).

Los digestores anaerobios se realizan utilizando los fundamentos básicos de ingeniería necesarios (procesos químicos y/o biológicos), con el objeto de determinar el volumen mínimo del digestor requerido para tratar aguas servidas, con el objetivo de aprovechar la biomasa para la producción de biogas. Así, para establecer el modelo matemático representativo del proceso se requiere, en primer lugar, plantear las ecuaciones de balance aplicables a las diferentes propiedades del sistema y, posteriormente incluir en ellas las expresiones adecuadas de las ecuaciones constitutivas, así como las expresiones de los flujos de entrada y salida de estas propiedades, dando lugar a las ecuaciones de diseño para el birreactor considerado (Kristiansen, 1991); dichos modelos son necesarios para estimar las producciones teóricas de biogás, optimizando el diseño y construcción del biodigestor en función de la producción del biogás, ahorrando tiempo y dinero en su construcción.

Por este motivo el objetivo principal de este trabajo es la construcción de un modelo matemático para su aplicación en el diseño de un biodigestor anaerobio de mezcla completa con el programa Matlab R2015a 8.5.0.184244, con el fin de estimar las reacciones biológicas fundamentales para crear un modelo del proceso anaerobio que pueda simular la producción de biogás, pero manteniendo la caracterización del sustrato en niveles aplicables.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

Aunque actualmente existen modelos matemáticos para simular el proceso de digestión anaerobia, estos conllevan un alto nivel de complejidad. Un resumen de los modelos más relevantes se encuentra en la Tabla 1. Se observa que los diferentes modelos creados aumentan en complejidad y tienen diferencias en las fases del proceso anaerobio, si bien su objetivo es el mismo: la simulación de las cantidades de Dioxido de carbono (CO_2) y Metano (CH_4) que se generan en el proceso anaerobio. Los primeros modelos como los de Andrew y Hill, presentan un número pequeño de variables a considerar para el modelamiento, las cuales fueron aumentando para modelos posteriores hasta alcanzar ya 35 variables para el modelo Anaerobic Digestion Model (ADM1), el cual es uno de los más usados actualmente, pero presenta gran dificultad en su implementación, debido a la cantidad de datos que necesita para su calibración (Cabrera, 2015).

También se observó que los sustratos empleados para la calibración difieren entre sí, los que los hace inviables para su uso, si el sustrato difiere de las condiciones iniciales. Para la determinación de estos datos se requiere un trabajo de análisis profundo, para determinar las concentraciones necesarias para cada uno de estos modelos. Por ejemplo, en los modelos de Batstone (2002) y Zaher (2009), es necesaria una caracterización del sustrato en buena parte de las variables requeridas para tener una buena simulación con el modelo. Una vez seleccionado el modelo es necesario implementarlo en un software informático. En la actualidad hay programas especializados para la simulación de biodigestores como el software “Biodigestor-pro” elaborado por un grupo de ingenieros en Alemania denominado AquaLimpia Engineering. Otras aplicaciones similares se pueden encontrar con los programas Simba, LabView y Aspen. Estas aplicaciones requieren un proceso de formación especializado para la utilización del modelo lo que junto con el precio del software y modelo en sí incrementan. En el caso del programa Simba tiene un valor de 600 US dólares, Labview con un costo de 7200 US dólares y Aspen siendo el más costoso con un valor de 30000 US dólares al año, sin considerar que el código corre en ambiente Matlab, lo que incrementa el costo 500 US dólares, sin contar los costos de capacitación (ifak Systems, 2015).

Debido a la complejidad intrínseca de la medición de los parámetros en los sustratos disponibles para realizar la digestión anaerobia, que dificulta el modelamiento en el área de biodigestores en Colombia. Por consiguiente, la construcción de los biodigestores se realiza de forma empírica, sin emplear este tipo de herramienta, que es de gran ayuda, sí el sustrato es bien caracterizado para evitar sobredimensionamiento. Un modelo matemático del proceso anaerobio que está fundamentado en las reacciones biológicas fundamentales (degradación de lípidos, proteínas y carbohidratos) suficientes para simular las condiciones y sustrato locales, permitió la simulación de las cantidades teóricas de biogás producido, ofreciendo una herramienta confiable y con bases científicas para el diseño de biodigestores que no puede ser satisfecha actualmente con los modelos existentes, de gran complejidad y costos.

Tabla 1: Diferentes modelos matemáticos para el proceso anaerobio.

Año	Nombre	Características
1971	Andrews and Graef	<ul style="list-style-type: none"> - No asume ningún tipo particular de sustrato, calibra el modelo con ácido acético - La hidrólisis no es considerada - Asume solo un grupo de microorganismos anaerobios (metanógenos), es decir transformación en una sola fase - El pH se asume constante pH=7 - La temperatura se fija en 38°C - 5 variables: concentración de microorganismos anaerobios, Concentración de Sustrato, CO₂ en fase líquida, CO₂ en fase gaseosa y Alcalinidad (Andrews & Graef, 1971)
1977	Hill and Barth	<ul style="list-style-type: none"> - Calibrado con sustratos de origen animal: excretas de aves y cerdos - Incluye la hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis - Las reacciones incluyen la influencia de la temperatura (relación de Arrhenius) - 9 variables: Concentración de sustancias volátiles, concentración de ácidos volátiles como acetatos, concentración de bacterias acidogénicas, concentración de bacterias metanogénicas, CO₂ en fase líquida, CO₂ en fase gaseosa, Concentración de amoníaco (NH₃⁺) en fase líquida y gaseosa, Concentración de cationes (Hill D. a., 1977).
1983	Hill	<ul style="list-style-type: none"> - Calibrado con excretas porcinas, bovinas y avícolas considerando su biodegradabilidad y constante ácida. - El paso de la Hidrólisis no se considera, considera la acidogénesis y la metanogénesis - Rango de temperatura de 20 a 60 °C (Relación de Hashimoto) - 4 variables: Concentración de Volátiles biodegradables, Concentración de ácidos grasos volátiles como acetato, concentración de bacterias acidogénicas y concentración de bacterias metanogénicas (Hill D. , 1983).

Tabla: Continuación

Año	Nombre	Características
1998	Husain	<ul style="list-style-type: none"> - Actualización del modelo de Hill con más reacciones químicas. - Inclusión de la tasa de decaimiento de las bacterias acidogénicas y metanogénicas por medio de la cinética de Monod y no asociadas a las tasas de reacción como hizo Hill - Las mismas 4 variables que utilizó Hill (Husain, 1998).
2002	Batstone <i>et al.</i> (ADM1)	<ul style="list-style-type: none"> - El más complejo de todos, necesita una calibración para cada sustrato. - Considera reacciones fisicoquímicas y biológicas, incluye 5 fases: Desintegración, Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis. - 35 Variables y 100 Parámetros, entre ellos 5 grupos de bacterias. - Las reacciones incluyen la influencia de la temperatura (relación de Arrhenius) (Batstone, y otros, 202).
2009	Zaher <i>et al.</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Calibrado con desechos domésticos en reactores batch a diferentes temperaturas - Se considera la Hidrólisis, Acidogénesis y Metanogénesis. Incluye bacterias Hidrogenotróficas y Acetotróficas - 15 variables: 5 grupos de microorganismos el resto variables para caracterizar el sustrato (Zaher, Pandey, & Chen, 2009).

Nota: Diferentes modelos matemáticos realizados para los procesos anaerobios. Por Silva & Diaz, 2019.

Por consiguiente, se plantea la siguiente pregunta problema: ¿Es posible simular el proceso anaerobio en condiciones regionales, usando un modelo simplificado empleando herramientas básicas de MATLAB R2015a para tener una primera estimación de producción de biogás con datos de caracterización del sustrato como ST y SV?

En base a esto se crea la siguiente Hipótesis: Será posible describir el proceso base de producción de biogás. Sin embargo, hay que matizar que ocurren una gran cantidad de reacciones dentro del reactor, y para crear el modelo se asumirán condiciones básicas para la 1era versión del modelamiento. En base a esto se determinará que otros procesos son aún necesarios para obtener una versión mejorada del modelo en el futuro.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Construir un modelo matemático para su aplicación en el diseño de un biodigestor anaerobio de mezcla completa.

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Estimar las reacciones biológicas fundamentales para crear un modelo del proceso anaerobio que pueda simular la producción de biogás, pero manteniendo la caracterización del sustrato en niveles aplicables.
- ✓ Construir el modelo del proceso anaerobio con el programa Matlab R2015a 8.5.0.184244.
- ✓ Calibrar el modelo con excretas porcinas como sustrato y las condiciones locales
- ✓ Ejecutar el lenguaje de programación por medio del programa Matlab R2015a 8.5.0.184244

3. Justificación

Con la construcción de una herramienta informática desarrollada por medio de Matlab, se puede evaluar de forma eficiente el diseño de un biodigestor en términos de producción de biogás, así mismo se explorará un campo de poca investigación en el país como es la modelación y simulación ambiental enfocada en el área de biodigestores. A nivel nacional son muy pocas las investigaciones dirigidas a la simulación de biodigestores, entre ellas se puede mencionar la simulación del proceso anaerobio usando excretas bovinas y residuos cítricos (Cendales & Jimenez, 2014) y la digestión de aguas residuales y lixiviados (Zorro Roa, 2016). Ambos trabajos emplearon el modelo ADM1. En el primero se logró una simulación aceptable de la producción de biogás y en el segundo solo se alcanzó a simular aceptablemente la remoción de materia orgánica en el reactor. En ambos trabajos se encontró dificultad en caracterizar el sustrato, y los cambios en los mismos no eran bien representados en la simulación.

Debido a esto los biodigestores fueron construidos de forma empírica, especialmente en las regiones rurales, ocasionando como consecuencia que sean menos eficientes. Las ventajas de la aplicación de modelos numerico son claras, son un instrumento que permite con una cantidad mucho menor de tiempo y dinero, simular condiciones reales siendo esto de gran utilidad para la toma de decisiones, cuando no es posible realizar la experimentación necesaria para recrear un evento (Zorro Roa, 2016).

Los biodigestores son sistemas complejos en su funcionamiento por tal motivo, el óptimo funcionamiento no puede depender de la observación de los operadores, existen variables, claves que son difíciles de monitorear, para evitar cualquier afectación en el proceso anaerobio de descomposición de materia orgánica, en este caso al contar con una con una herramienta de modelación, se pueden analizar estas variables, antes de la construcción y así optimizar el diseño del biodigestor antes de invertir para su construcción (Cabrera, 2015).

4. Alcance del proyecto

Este proyecto se basó en la construcción de un modelo dinámico para la simulación del proceso anaerobio, que pueda ser aplicado en el diseño de un biodigestor. Este modelo está enfocado en evaluar la producción de un biodigestor en términos de la producción de biogás, utilizando para la caracterización del sustrato (excretas porcinas), variables de fácil determinación como los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), relación DQO/SV, entre otros. Adicionalmente se tomaron otros datos de la literatura, los cuales fueron difíciles de determinar, pero que son relativamente homogéneos para cada tipo de sustrato, como la composición en proteínas, carbohidratos y lípidos, pH, contenido de Nitrógeno, etc. Para la simulación del proceso se determinó las condiciones locales, especialmente la temperatura, que en el área del departamento del Meta se encuentra dentro del rango mesofílico. Las reacciones elementales se construyeron en base a esta caracterización, para posteriormente construir el modelo en MATLAB R2015a 8.5.0.184244

El presente modelo servirá como punto de inicio, para que otros investigadores puedan continuar con la labor de modelación y simulación con sustratos diferentes al que se trabajara en el proyecto.

5. Antecedentes

La realización de modelos matemáticos ha evolucionado de manera constante de modelos sencillos a los modelos más complejos, como se evidenció en la Tabla 1. En la

Figura 1 se observan diferentes tipos de trabajos realizados en esta área que ejemplifican la gran variedad de sustratos y tipos de procesos anaerobios en los cuales se ha trabajado con modelamiento.

En 1999 la investigadora Angelidaki *et al.* desarrolló un modelo dinámico que describía la degradación anaeróbica del material y la codigestión de diferentes tipos de desechos, basado en un modelo previamente descrito por la autora en 1993 sobre “la digestión termófila anaeróbica de los desechos del ganado: el efecto del amoníaco”, el modelo fue calibrado con una planta de biogás que utilizaba estiércol bovino y aguas residuales que contienen alta carga proteica (Angelidaki, Ellegaard, & Ahring, 1999). En este trabajo se comparó la codigestión de diferentes tipos de desechos para determinar si el sustrato a implementar era factible como alimento para un biodigestor.

Sossa *et al.* en su investigación implementó el modelo ADM1 de la International Water Association (IWA), el cual es uno de los modelos más usados actualmente para las simulaciones de proceso anaerobio y dinámicas complejas, ya que describen procesos bioquímicos y fisicoquímicos (Sossa & Alvarez, 2016). En este estudio se usó para la modelación y simulación el tratamiento anaerobio de los efluentes industriales de un matadero en el año 2016. Se construyó el modelo matemático para poder simular las condiciones de tratabilidad del reactor, además se calibró y validó con información extraída de un reactor UASB, anteriormente construido por los autores. El modelo matemático simula el comportamiento del pH, la reducción de materia orgánica

y la producción de biogás, simulando los efluentes del matadero Municipal de La Paz, para así poseer información para el diseño de la planta de tratamiento (Sossa & Alvarez, 2016).

En 2017 Franco Valladares-Carnero, realizó un modelo matemático del proceso de digestión anaeróbica de estiércol bovino y cáscara de cacao, el cual consistió en calibrar un modelo matemático propuesto por Angelidaki *et al.* en 1999, para la producción de biogás y el tratamiento de residuos orgánicos utilizando dichos sustratos (Valladares-Carnero, 2017).

El investigador Núñez Pintado realizó un modelo matemático donde ejecutó un control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, utilizando el modelo ADM1, el cual es implementado como planta virtual en el software Simulink de Matlab, asimismo el modelo se validó con respecto a un biodigestor en el campo académico e industrial desarrollado por la Universidad de Lund, Suecia (Núñez Pintado, 2017). Esto con el fin de obtener una base de información para realizar el modelo matemático implementado en el software, así mismo, evaluar la aproximación que tiene estos programas para simular los fenómenos en los biodigestores.

En el 2016 el ingeniero Jairo Alonso Zorro Roa en la Universidad Nacional de Colombia realizó un trabajo de maestría, en el que desarrolló el modelo matemático ADM1 para simular una codigestión anaerobia, la cual utilizó como sustrato aguas residuales domésticas y lixiviados, en el que logró simular un digestor anaerobio. En la simulación se evaluó la remoción teórica de materia orgánica a diferentes concentraciones de aguas residuales y además la cantidad de gas producido en la codigestión anaerobia (Zorro Roa, 2016). Sin embargo, este trabajo demostró las dificultades de usar este tipo de modelo tan complejo, ya que la discrepancia de los datos simulados y experimentales fue mayor al 30 % en la mayoría de las simulaciones.

En el año 2014 Cendales *et al.* Desarrollaron un trabajo de modelamiento computacional para la producción de energía renovable a partir de biogás mediante la codigestión anaerobia de una mezcla de residuos cítricos y estiércol bovinos, con el fin de evaluar la viabilidad de generación de energía renovable con la codigestión de estos residuos. Se usó el modelo ADM1, el cual se calibró con datos experimentales de laboratorio. Con los resultados obtenidos, se implementó un modelo simplificado para la evaluación de energía producida en una planta piloto

(Cendales & Jimenez, 2014). El proyecto se centró en la viabilidad para la producción de biogás y por ende la generación de energía eléctrica.

En la línea del tiempo se presenta el inicio de la investigación en modelos matemáticos para el modelamiento del proceso anaerobio, el cual identifica los modelos históricos e investigaciones de interés del área de modelamiento matemático.

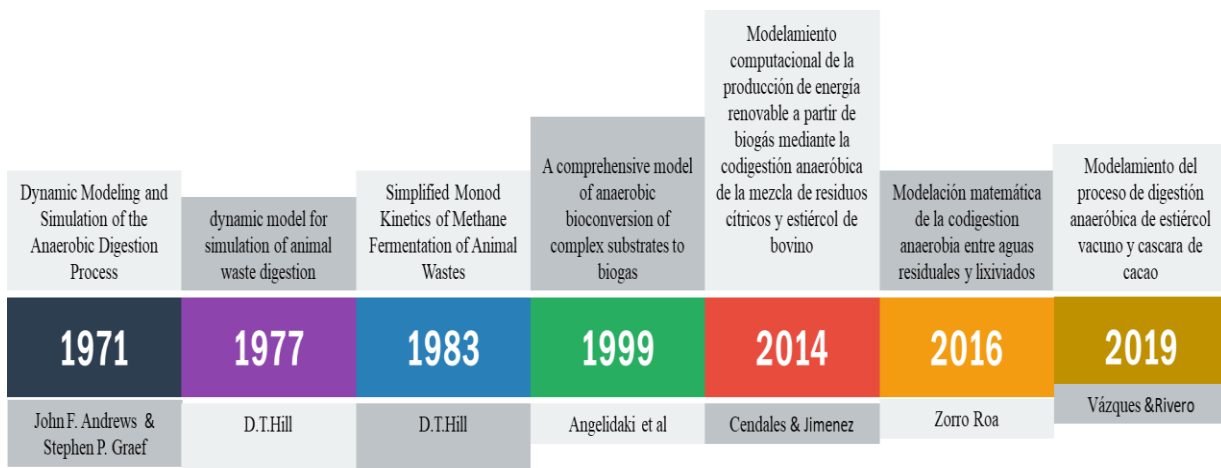


Figura 1 Línea de tiempo de los estudios internacionales y nacionales. Por Silva & Diaz, 2019

6. Marco referencial

6.1. Marco teórico

La digestión anaerobia es un proceso donde se descompone material orgánico por medio de bacterias anaeróbicas en un medio con ausencia de oxígeno (Núñez, 2017); el proceso de digestión anaerobia se compone de cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Es un proceso complejo que demanda condiciones estrictas de ausencia de oxígeno, depende rigurosamente de la actividad microbiana que transforma el contenido de materia orgánica en biogás, compuesto en su mayoría por metano y dióxido de carbono, aparte de trazas de Oxígeno (O_2), Hidrógeno (H_2) y Ácido sulfhídrico (H_2S) (Fiotto, 2013).

La hidrólisis es la fase inicial de todo el proceso de digestión anaerobia y se basa fundamentalmente en la degradación de los carbohidratos, lípidos y proteínas, transformándolos en agregados simples como azúcares, ácidos grasos de cadena larga y aminoácidos (Ortiz Cabrera, 2015).

La segunda fase es llamada acidogénesis. En esta fase los microorganismos transforman los productos de la fase anterior a través de un proceso denominado fermentación, en el cual se producen diferentes tipos de ácidos, como el ácido butírico, ácido propiónico, ácido valérico, ácido láctico, ácido acético entre otros, dependiendo del tipo de sustrato (Fernández, 2013).

La acetogénesis es una fase primordial para la degradación de los ácidos orgánicos como el propionato (ácido propiónico) y butirato (ácido butírico), convirtiéndolos principalmente en ácido acético e hidrógeno, gracias a las bacterias acetogénicas (Shao, 2015).

Por último, en la metanogénesis, se llega al paso final de la descomposición de la biomasa, la metanogénesis se encarga de eliminar todos los productos de los procesos anteriores, principalmente ácido acético e hidrógeno, para hacer parte de la formación y producción de metano, dióxido de carbono y trazas de otros compuestos (Campos, 2001).

Para la simulación de dichos procesos se emplea el modelamiento numerico, que refiere a la descripción de problemas cotidianos y se representan de forma numérica, mediante ecuaciones matemáticas; sus elementos son variables y la funciones que se relacionan entre ellos, con el fin de resolver problemas, comprender la dinámica de los procesos, mejorar la mecánica de los mismos y predecir fallos en el diseño (Maldonado, 2013)

Para el diseño de estos modelos es necesario simular el proceso con software que se basan en procesos de simular fenómenos matemáticos con el fin de graficar y representar operaciones a través de la simulación sin necesidad de realizar dicha operación y prever fallas en los sistemas. Estos softwares se usan para diseñar fenómenos, equipos que estén lo más cerca a la realidad y se encarga se simular las ecuaciones matemáticas que modelan algún tipo de proceso. (García Sánchez & Ortega Mier, 2006).

Para el diseño de los modelos es utilizado el software Matlab que es un entorno que permite el cálculo numérico y la estructuración del lenguaje de programación, en el que permite el desarrollo de manipulación matricial, trazado de funciones y datos, para crear scripts que, combinados con códigos, puedan ejecutarse para realizar análisis de datos (The MathWorks, 2020). Este software posee una extensión basada en Matlab, en el que modela y simula sistemas dinámicos y su principal interfaz es una herramienta gráfica de diagramación de bloques (Bodemann, 2011).

6.2. Marco conceptual

A continuación, se presentan una serie de conceptos relacionados con el proceso anaerobio analizado en este trabajo. Al ser un tema extenso sólo se abordan los ítems que son necesarios para comprender el presente modelamiento.

6.2.1. Biodigestor

Es un tipo de contenedor cerrado herméticamente el cual presenta condiciones anaerobias en su interior, presenta un crecimiento y proliferación de bacterias anaerobias, las cuales descomponen

los residuos ingresados, generando biogás. Este puede ser utilizado para generar energía térmica directamente mediante la combustión del biogás o para producción de energía eléctrica usando un motor de combustión (Chungandro Nacaza & Manitio Cahuatijo, 2010).

6.2.2. Sustrato:

Es todo aquel material de desecho orgánico que se introduce dentro de un biodigestor para su degradación, con el fin de generar biogás a través de la fermentación llevada a cabo por los microorganismos presentes en el mismo (Vásquez Garavito & Riveros Jiménez, 2013).

6.2.3. Factores que influyen en la digestión anaerobia:

Dentro del proceso de biodegradación de la materia orgánica, se debe tener en cuenta las condiciones de funcionamiento del biodigestor, estas se relacionan directamente con los parámetros ya que estos determinan el éxito que tiene la producción de biogás como lo son; la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, el pH, entre otras (López Pérez, 2018).

6.2.4. Biogás:

Es el resultado de la fermentación del sustrato generado en la digestión anaerobia del biodigestor, el cual es condicionado por los parámetros físico-químicos y que puede ser utilizado para generación de energía y cocción de los alimentos. Se compone mayormente de metano, dióxido de carbono y pequeñas concentraciones de H_2 , O_2 y H_2S (Currie, Varnero, & Santibanez, 1992).

6.2.5. Sólidos Totales (ST):

Los sólidos totales incluyen los sólidos disueltos y solidos suspendidos, es decir el material inorgánico y todos los materiales disueltos, donde están incluidos el nitrógeno, sulfatos y otros. (Campos, 2001)

6.2.6. Sólidos Volátiles (SV):

Es la cantidad de solidos que se encuentran en suspensión y que son de fácil volatilización tras ser sometidos a las altas temperaturas, y así calcular la cantidad de materia orgánica presente del agua. (Campos, 2001)

6.2.7. Demanda química de oxígeno (DQO).

La DQO posibilita conocer las concentraciones de las fracciones que son biodegradables como no biodegradables de la materia orgánica, es decir el contenido orgánico e inorgánico presente en las aguas residuales (Núñez, 2017).

6.2.8. Digestor.

Es un sistema de digestión, en el que se le ingresa materia orgánica, en el que ayuda a la descomposición de esta materia, mediante la fermentación anaerobia de los microorganismos, produciendo gas metano como producto del proceso de la fermentación (Campos, 2001).

6.2.9. Cinética de primer orden.

Es utilizada para la simulación de la hidrólisis ya que simula la desintegración de los compuestos particulados como carbohidratos, proteínas y lípidos presentes en el sustrato; ya que asume, que la desintegración de estos compuestos es proporcional a la concentración del compuesto (Cendales Ladino, 2011).

6.2.9.1. Hidrólisis.

En esta fase los componentes estructurados de la materia prima, principalmente: carbohidratos, proteínas y grasas son desintegrados a componentes más simples. Estos son descompuestos a monosacáridos, y las proteínas y grasas son descompuestos en aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga; los cuales son realizados por microorganismos que intervienen en la digestión anaerobia (Núñez, 2017).

La hidrólisis de compuestos, es descrita basada en reacciones de primer orden según el modelo matemático ADM1. A continuación, la representación matemática.

$$\rho_{des} = K_{des} \cdot X$$

Ecuación 1 Ecuación para la hidrolisis

Donde:

ρ_{des} : Tasa de proceso de desintegración de compuestos complejos [kgCOD/Lt/día]

K_{des} : Tasa de desintegración [1/d]

X : Concentración de compuesto complejo [kgCOD/Lt]

6.2.10. Cinética de Monod.

El crecimiento bacteriano, puede ser descrito por una ecuación simple para determinar esta tasa se utiliza la ecuación de Monod, esta permite al modelo describir la no linealidad entre la tasa del crecimiento y la concentración del sustrato y determina la velocidad de crecimiento microbiano (Monod).

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

Ecuación 2 Ecuación de la cinética de Monod

μ : Tasa de crecimiento específica de los microorganismos [KgCOD/ KgCOD]

μ_{max} : Tasa de crecimiento específica máxima de los microorganismos [KgCOD/ KgCOD]

S : Concentración del sustrato limitante para el crecimiento. [kgCOD/Lt].

K_s : Constante de media velocidad [kgCOD/Lt].

Esta ecuación es utilizada para determinar el crecimiento bacteriano que fluye en el biodigestor en función de la concentración del sustrato con el fin de tasar las velocidades de crecimiento de biomasa y de consumo de sustrato a partir de los datos experimentales que se encuentran en la biomasa introducida inicialmente en función del tiempo.

6.2.10.1. Acidogénesis y acetogénesis.

Los compuestos experimentan un proceso de fermentación, que origina diferentes ácidos orgánicos, por el cual los monosacáridos y aminoácidos se degradan a compuestos más simples. Esta etapa, es una de las más importante ya que rompe los biopolímeros complejos en polímeros solubles o monómeros, ya que los microorganismos presentes en esta fase realizan la depuración solamente sobre materia orgánica disuelta (PEREZ, 2010).

Posteriormente, estos productos de la anterior fase, sirven como sustrato para la formación de otras bacterias, las cuales son sometidas por la acetogénesis para convertirse en ácido acético y otros ácidos; los cuales pueden ser convertidos directamente en metano por microorganismos. La ecuación siguiente representa la tasa de estos procesos.

$$\rho_{ac} = \frac{X}{Y} * \frac{S}{K_s + S} * X_{aa}$$

Ecuación 3 Ecuación de la acidogenesis y acetogénesis

Donde:

ρ_{ac} : Tasa para la reacción de acidogénesis y acetogénesis [kgCOD/Lt /día].

Y : Tasa específica de crecimiento [KgCOD/ KgCOD]

X : Población bacteriana de crecimiento específica [KgDQO/Lt]

S : Materia orgánica soluble [kgCOD/Lt].

KS : Constante de saturación media para la acidogénesis y acetogénesis [kgCOD/Lt].

X_{ac} : Bacteria presentes en la acidogénesis y acetogénesis [kgCOD/Lt].

6.2.10.2. *Metanogénesis.*

En esta etapa los productos resultantes de la acetogénesis (acetato, H₂ y CO₂), son transformados en metano y dióxido de carbono. Para esta etapa se genera el producto final de la degradación anaerobia en el cual se forma el metano, simplificando la representación matemática de esta fase, se considera que el metano obtenido será a partir del ácido acético e hidrógeno (Núñez, 2017).

Para este proceso se tiene en cuenta la siguiente ecuación matemática:

$$M_e = \frac{X}{Y} * \frac{S_a}{K_s + S_a} * B_m$$

Ecuación 4 Ecuación para la metanogénesis

Donde:

M_e : Tasa para la reacción de metanogénesis [kgCOD/Lt /día].

Y_m : Tasa específica de crecimiento [KgCOD/ KgCOD]

X_m : Población bacteriana de crecimiento específica [KgDQO/Lt]

S_a : Materia orgánica soluble [kgCOD/Lt].

KS : Constante de saturación media para la acidogénesis y acetogénesis [kgCOD/Lt].

B_m : Bacterias presentes en la metanogénesis [kgCOD/Lt].

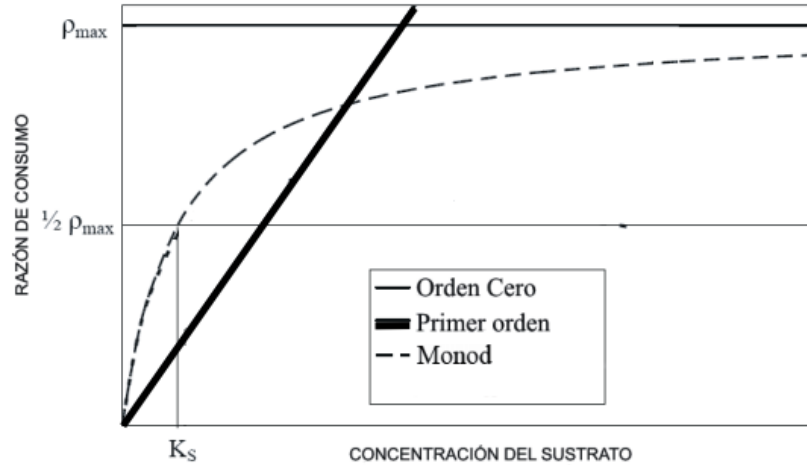


Figura 2 Curva de comportamiento de las cinéticas de las reacciones (Jana, 2016).

6.2.11. Procesos de transferencia en líquido-gas.

El biogás es una mezcla gaseosa que contiene metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O(g)) además de trazas de otros gases como Hidrógeno (H₂), Nitrógeno (N₂) y ácido sulfhídrico(H₂S) (Cendales Ladino, 2011). Sin embargo, al salir de la fase metanogénicas, este compuesto se presenta en su fase líquida, por lo que se debe modelar la transferencia de masa para así simular la generación de estos gases durante el desarrollo del proceso de digestión anaeróbica (Solera del Río, 2014).

Para este proceso se tiene en cuenta la siguiente ecuación matemática:

$$r_T = K_i * (S_i - K_h P_{gas})$$

Ecuación 5 Ecuación de transferencia Líquido a Gas (Cendales Ladino, 2011)

Donde:

K_i: Constante de transferencia Líquido/Gas [d⁻¹].

S_i: Concentración actual del gas en la fase líquida [moles/Lt*atm].

K_h: Constante de Henry [moles/Lt*atm].

P_{gas}: Presión parcial del gas [atm].

6.3. Marco legal

Actualmente no existe normatividad que señale explícitamente las normas para la construcción de una herramienta informática para diseñar un biodigestor, sin embargo, la producción de biogás, como energía renovable o el subproducto líquido del proceso, sí se ven afectados por la reglamentación vigente en el país.

Tabla 2: Marco legal para la implementación y operación de biodigestores.

Ley	Artículo	Descripción	Análisis
Ley 697 del 2001	1	Declárase el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.	Señala el interés que tiene la nación para promover el uso eficiente de las energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales; ya que busca el abastecimiento energético pleno, contribuyendo a una energía autosuficiente.
Ley 1259 del 2008	1	La finalidad de la presente ley es crear e implementar el Comparendo Ambiental como instrumento de cultura ciudadana, sobre el adecuado manejo de residuos sólidos y escombros, previendo la afectación del medio ambiente y la salud pública, mediante sanciones pedagógicas y económicas a todas aquellas personas naturales o jurídicas que infrinjan la normatividad existente en materia de residuos sólidos; así como propiciar el fomento de estímulos a las buenas prácticas ambientalistas.	Esta normativa brinda la información requerida para el manejo de los desechos generados por el biodigestor y su disposición final, los cuales son tratados como vertimientos en la normativa actual.
Ley 1715 del 2014	1	La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda.	Esta normativa asociada a las energías renovables busca regular y conectar dichas energías al sistema energético nacional y así tener participación en el mercado eléctrico ayudando a interconectar a zonas sin este servicio.

Nota. Normativa legal vigente nacional para la implementación y operación de biodigestores .Por Silva & Diaz, 2019

7. Metodología

7.1. Fase 1: Recolección información primaria para estimación de reacciones biológicas

En la primera fase del proyecto se realizó una recolección de información primaria, relacionadas con las expresiones matemáticas utilizadas para simular las fases del proceso anaerobio, esto comprende la cinética y tasa de transformación de cada fase. Para las reacciones biológicas se siguió el modelo de Monod, mientras que para la cinética de las reacciones biológicas se implementó la cinética de Michaelis-Mentis (Rea, 2014).

En el caso de la hidrólisis se consideró en principio una reacción enzimática sencilla de 1er orden, del análisis inicial se decidió la complejidad mínima que tuvo el modelo (fases de degradación).

Se planteó el modelo del proceso anaerobio considerando la mezcla completa y las condiciones de temperatura locales, determinando la estructura inicial (reacciones) del modelo matemático, donde se determinó las entradas y salidas del biodigestor en función de estas reacciones, y la caracterización del sustrato en las variables más usadas como lo son los sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV), el resto de propiedades se tomó de composiciones promedio para las excretas porcinas.

7.2. Fase 2: Construcción del modelo para un proceso anaerobio

Se construyó el modelo matemático en ambiente Matlab (R2015a 8.5.0.184244), la cual se desarrolló de forma individual cada uno de los sistemas, por separado y desarrollando los estándares que permitiera la unión de los subsistemas, posteriormente se realizó la calibración del modelo matemático utilizando datos obtenidos de un biodigestor que se encontraba en funcionamiento en la Universidad Santo Tomás en el Laboratorio de Conversión de energía, el cual tiene una capacidad de 7 litros y es alimentado con excretas porcinas. A este reactor se le midió la producción de biogás en función del tiempo.

7.3. Fase 3: Simulación y validación del proceso anaerobio

Las reacciones del proceso fueron codificadas en MATLAB/SIMULINK en forma de ecuaciones algebraicas diferenciales, las cuales fueron resueltas en cada intervalo de tiempo seleccionado (time step) por el “OrdinaryDifferentialEquations” o ODE. Al ser las ecuaciones que se plantearon de 1er orden, se empleó el ODE45 inicialmente para la resolución de las ecuaciones. Esta herramienta de MATLAB usa el método matemático de Runge-Kutta el cual está desarrollado por el método Euler mejorado.

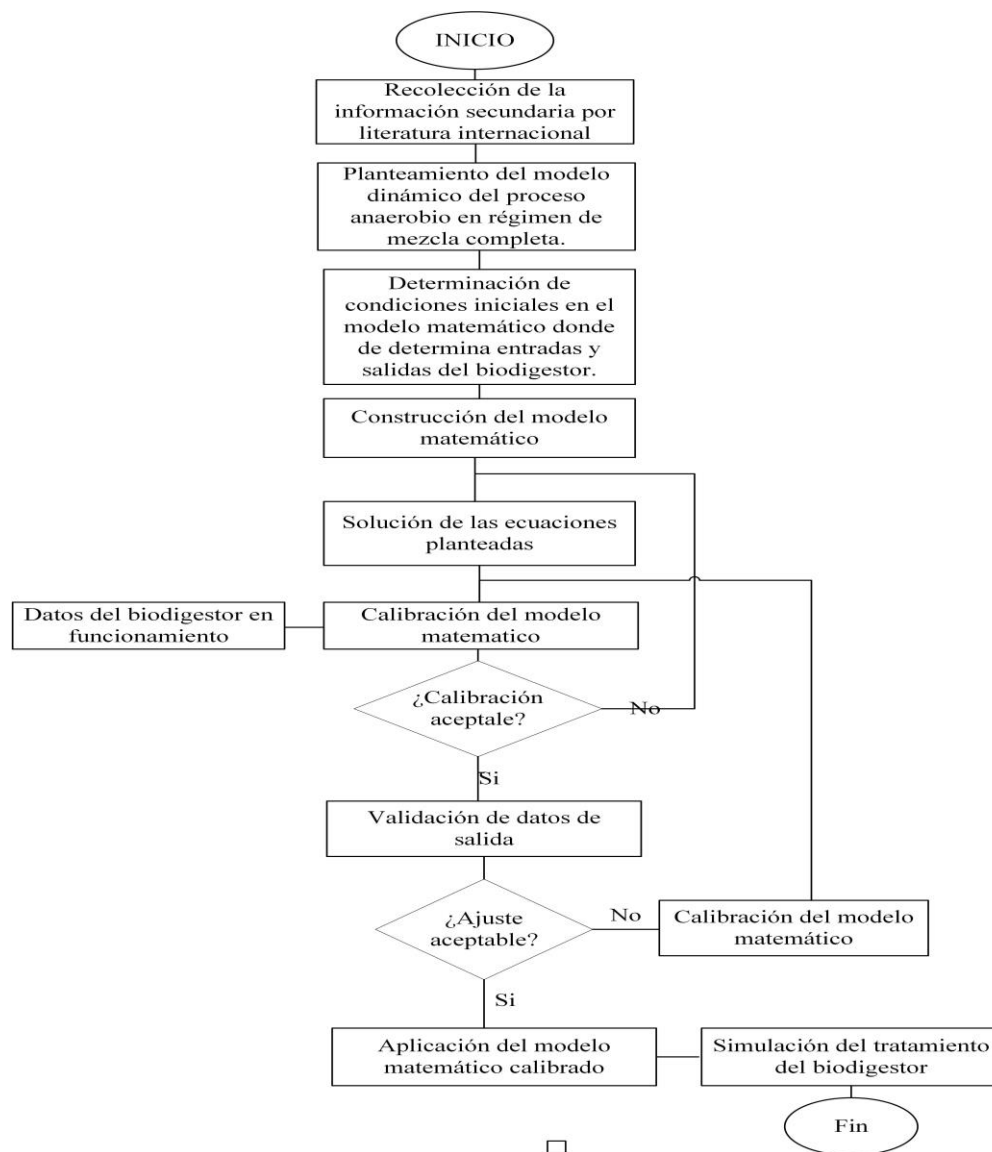


Figura 3 Flujograma de la metodología. Por Silva & Diaz, 2019

8. Resultados

8.1. Modelación de la digestión anaeróbica

Para la construcción del modelo en Simulink, se determinaron las ecuaciones que describen los procesos de digestión anaerobia, describiendo los procesos de transformación bioquímica, así también como para los procesos transferencia de masa entre las fases líquida y gaseosa mediante ecuaciones de primer orden y Monod; las ecuaciones se desarrollaron en forma de bloques en la aplicación Matlab/Simulink, estimando las reacciones biológicas del modelo matemático.

8.1.1. Modelación del proceso de conversión bioquímica

Para la construcción del modelo de la digestión anaerobia, se desarrollaron 4 etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Sin embargo, en el modelo generado, se integró la acidogénesis y acetogénesis en un solo proceso, creando así sólo 3 etapas, siendo la primera etapa la más importante, por ser material particulado, por el tipo de sustrato utilizado es decir excretas porcinas para la simulación del proceso anaerobio (D.T Hill, 1977). Esta simplificación disminuye la complejidad del modelo en una fase que no es la decisiva para este tipo de sustrato, ya que es particulado, siendo la hidrólisis más relevante.

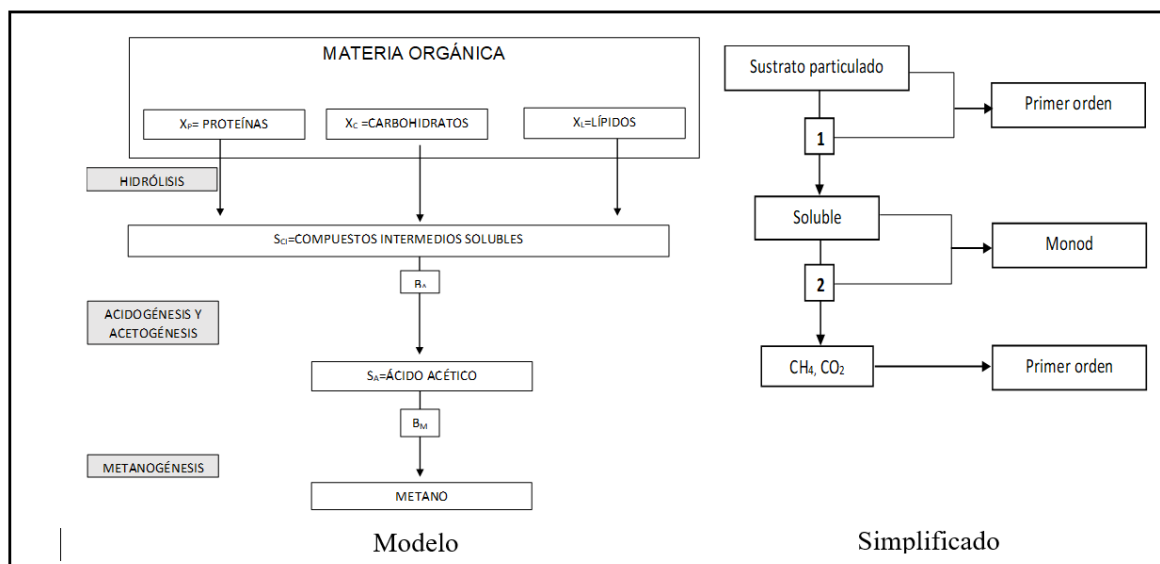


Figura 4 Etapas de la digestión anaerobia para producción de biogás. Por Silva & Diaz, 2019

8.2. Implementación del modelo en Matlab/Simulink

Para la implementación del modelo en el entorno Simulink se utilizaron diagramas de bloques para representar las etapas de digestión anaerobia, consideradas para la construcción del modelo dinámico.

8.2.1. Procesos bioquímicos.

Estos procesos, ocurren en la fase líquida. El modelo, contempla 6 variables dinámicas de estado en la fase líquida. Las reacciones de generación/consumo de cada componente de la tabla 3, implican tasas de reacción. Estas tasas se presentan en la Tabla 3. La implementación de las ecuaciones se explica en la sección siguiente.

Tabla 3: Ecuaciones de tasas cinéticas.

N°.	Proceso	Tasa cinética
1	Desintegración	$X_c = \frac{(Q * Den) * \left(\left(\frac{Sv}{100} \right) * \left(\frac{St}{100} \right) \right) * Fd_{qo}}{V}$
2	Hidrólisis	$\rho_1 = K_{des} * X_c$
3	Acidogénesis y Acetogénesis	$S_a = \frac{X * S}{Y * (K_s + S)} * X_{aa}$
4	Metanogénesis	$M_e = \frac{X_m * S_a}{Y_m * (K_{sm} + S_a)} * B_m$

Nota: Ecuaciones de para la tasa cinética para la reacción del biodigestor. Por Angelidaki, Elleeaard, & Ahring, 1999

8.2.2. Procesos fisicoquímicos.

En el modelo matemático ocurren dos procesos, los cuales son: los procesos de interacción entre fases líquido-líquido que son la conversión y desintegración de la materia al ser mezclada en la fase líquida y el proceso de transferencia de masa líquido-gas.

8.2.2.1. Procesos de transferencia en líquido-gas.

El modelo posee ecuaciones dinámicas de transferencia de masa en la interfaz líquido-gas para CH₄, CO₂ y H₂. La concentración de estos gases, se basó en la ley de Henry, la cual modela mediante ecuaciones las concentraciones. Expresando la velocidad cinética del proceso de transferencia líquido-gas de la siguiente forma

$$r_T = K_i * (S_i - K_h P_{gas})$$

Donde:

K_i : Constante de transferencia Líquido/Gas [d^{-1}].

S_i : Concentración actual del gas en la fase líquida [moles/Lt*atm].

K_h : Constante de Henry [moles/Lt*atm].

P_{gas} : Presión parcial del gas [atm].

8.2.3. Parámetros

8.2.3.1. Cálculo del caudal de alimentación:

Se toma 300 ml de volumen experimental de (Martínez Monsalve, 2019), como dato inicial para el cálculo del caudal de alimentación, este dato lo transformamos a L/s, como se muestra en la conversión, para dar corrida al programa teniendo en cuenta que los datos son generados por segundo:

$$Q = 300 \frac{ml}{dia} * \frac{Lt}{seg}$$

$$Q = 300 ml * \frac{1 Lt}{1000ml} * \frac{1 dia}{86400 Seg} = 3.47 \times 10^{-6} \frac{Lt}{Seg}$$

8.2.3.2. Cálculo de la hidrólisis

Para el cálculo del factor de conversión de la hidrólisis se tienen en cuenta los siguientes parámetros respectivamente como se muestran en la Tabla 4:

$$P = 1.4 \text{ KgDQO/KgSv}$$

$$L = 2.6 \text{ KgDQO/KgSv}$$

$$C = 1.2 \text{ KgDQO/KgSv}$$

$$Fp = 0.6$$

$$Fl = 0.1$$

$$Fc = 0.2$$

$$Den = 1 \text{ Como dato de entrada}$$

Se determina el factor de conversión de la DQO, el cual viene en función de las fracciones asumidas para las excretas porcinas (Morales, Rodríguez, & Rojas, 2017):

$$fdqo = ((P * Fp) + (L * Fl) + (C * Fc))$$

Ecuación 6 Factor de conversión de la DQO

Dónde:

P: Proteínas DQO/KgSv.

L: Lípido KgDQO/KgSv.

C: Carbohidratos KgDQO/KgSv.

Fp: Factor de conversión de las proteínas

Fl: Factor de conversión de los lípidos

Fc: Factor de conversión de los carbohidratos

Para determinar la primera fase de la hidrólisis se multiplica el caudal anteriormente hallado en Lt/seg por la densidad, posteriormente se multiplica por los sólidos volátiles (%SV) y solidos totales (%ST):

$$Xc_1 = (Q * Den) * \left(\left(\frac{Sv}{100} \right) * \left(\frac{St}{100} \right) \right)$$

Ecuación 7 Calculo de la biomasa

Donde:

Q: Caudal Lt/seg.

Den: Densidad Kg/Lt.

Sv: Sólidos volátiles %p/p.

St: Sólidos totales %p/p .

Se divide en 100 debido a que son convertidos a fracción

El cálculo anteriormente hallado de Xc₁ es dividido con el factor de conversión de DQO para pasar de KgSv/día a KgDQO/día

$$Xc_2 = \left(\frac{Xc_1}{Fdqo} \right)$$

Ecuación 8 Conversión de unidades del Factor DQO

Seguidamente Xc_2 es dividido sobre el volumen del reactor de esta forma se determina cuantos $\text{KgDQO}/\text{día}$ se generan en los 6 Lts.

$$Xc = \left(\frac{Xc_2}{V} \right)$$

Ecuación 9 Ecuación de producción de KgDQO/día

Con los datos anteriores llegamos a la ecuación del hidrolisis en $\text{KgDQO}/\text{litros} \cdot \text{seg}$, restamos Xc al producto de la constante 0.3.

$$Xc = Xc - (0.3 * Xc)$$

Ecuación 10 Ecuación de la hidrolisis

El modelo representa los sustratos complejos de sus componentes principales (Lípidos, carbonatos y proteínas). Considera los fenómenos que ocurren en las fases líquida y gaseosa durante el proceso de degradación.

El modelo tiene en cuenta 3 etapas compuestas por la Hidrólisis, la acidogénesis-acetogénesis como una sola etapa y la metanogénesis; Adicionalmente considera la Ley de Henry como proceso de transferencia del biogás producido, de la fase acuosa a la gaseosa. En esta primera configuración para la simulación se tomó como base los datos experimentales de la tesis “Diseño y construcción de un biorreactor tipo fed-batch para fines experimentales”, además, se adaptaron valores iniciales del ADM1. El desarrollo del modelo se realizó en Matlab/ Simulink, con un tiempo de 5 días. En la Tabla 4 se hace la descripción de los datos de entrada de las diferentes configuraciones.

Tabla 4 Valores iniciales para las diferentes configuraciones

Parámetro	Descripción	S1	S2	S3	Unidades	
Q	Caudal de alimentación	3.47×10^{-6}	3.47×10^{-6}	3.47×10^{-6}	Lt/seg	Valor obtenido experimentalmente (Martínez Monsalve, 2019)
St	Solidos totales	45.43	45.43	45.43	%p/p	Valor obtenido experimentalmente (Martínez Monsalve, 2019)
Parámetro	Descripción	S1	S2	S3	Unidades	
Sv	Solidos volátiles	46.11	46.11	46.11	%p/p	Valor obtenido experimentalmente (Martínez Monsalve, 2019)
V	Volumen del reactor	6	6	6	Lt	Valor obtenido experimentalmente (Martínez Monsalve, 2019)
P	Proteínas de excretas porcinas	1.4	1.4	1.4	KgDQO/KgSv	Valor adaptado de (Morales, Rodríguez, & Rojas, 2017)
L	lípidos de excretas porcinas	2.6	2.6	2.6	KgDQO/KgSv	Valor adaptado de (Morales, Rodríguez, & Rojas, 2017)
C	carbohidratos de excretas porcinas	1.2	1.2	1.2	KgDQO/KgSv	Valor adaptado de (Morales, Rodríguez, & Rojas, 2017)
Fp	Factor de conversión de proteínas	0.6	0.6	0.6	Adimensional	Valor adaptado de (Morales, Rodríguez, & Rojas, 2017)
Fl	Factor de conversión de lípidos	0.1	0.1	0.1	Adimensional	Valor adaptado de (Morales, Rodríguez, & Rojas, 2017)
Fc	Factor de conversión de carbohidratos	0.2	0.2	0.2	Adimensional	Valor adaptado de (Morales, Rodríguez, & Rojas, 2017)
Fd_{qo}	Factor de conversión densidad	1.34	1.34	1.34	KgDQO/KgSv	Valor obtenido experimentalmente
Den	Hidrolisis	1	1	1	Kg/Lt	
Xc	Hidrolisis	3.27×10^{-4}	3.27×10^{-4}	3.27×10^{-4}	KgDQO/Lt* día	Valor obtenido experimentalmente
Kdes	Tasa de desintegración	5.78×10^{-6}	5.78×10^{-6}	4.62×10^{-7}	1/seg	Valor adaptado (Andrews & Graef, 1971)

Tabla 4. Continuación

Parámetro	Descripción	S1	S2	S3	Unidades	
X	Población bacteriana de crecimiento específico para la acidogénesis y acetogénesis	7.61	7.61	7.61	KgDQO/Lt	Valor obtenido experimentalmente
Y	Tasa específica de crecimiento para la acidogénesis y acetogénesis	0.2	0.2	0.2	KgCOD/ KgCOD	Valor adaptado de (Sharma, 2001)
Parámetro	Descripción	S1	S2	S3	Unidades	
Ks	Coefficiente de velocidad media para la acidogénesis y acetogénesis	4.5×10^{-8}	4.5×10^{-8}	4.5×10^{-8}	KgCOD/Lt*Seg g	Valor adaptado de (Sharma, 2001)
T	tiempo	4.32×10^5	4.32×10^5	4.32×10^5	Seg	Valor obtenido experimentalmente (Martínez Monsalve, 2019)
S	Materia orgánica soluble	1	1	1	KgCOD/Lt	Valor obtenido experimentalmente
Xaa	Bacterias presentes en la acidogénesis y en la acetogénesis	7.61	7.61	7.61	KgDQO/Lt	Valor obtenido experimentalmente
Xm	Población bacteriana de crecimiento específico en la metanogénesis	7.61	7.61	7.61	KgCOD/Lt	Valor obtenido experimentalmente
ym	Tasa específica de crecimiento para la metanogénesis	0.057	0.057	0.057	KgCOD/ KgCOD	Valor obtenido experimentalmente
Km	Coefficiente de velocidad media para metanogénesis	4.5×10^{-8}	2.3×10^{-4}	4.5×10^{-7}	KgCOD/Lt*dia	Valor adaptado de (Kalfas, Skiadas, Gavala, & Stamatelatou, 2006)

Tabla 4. Continuación

Parámetro	Descripción	S1	S2	S3	Unidades	
Sa	Materia orgánica soluble	1	1	1	KgCOD/Lt	Valor obtenido experimentalmente
Bm	Bacterias presentes en metanogénesis	7.619	7.619	7.619	KgCOD/Lt*día	Valor obtenido experimentalmente
Me	Tasa para la reacción de metanogénesis	2068.50	2068.50	540.895	kgCOD/Lt /día	Valor obtenido experimentalmente
Pmm	Peso molar del metano	16	16	16	Kgmol	
Si	Concentración actual de la fase líquida	0.00056	0.00056	0.523	Mol/Lt*atm	Valor adaptado de (Solera del Río, 2014)
Parámetro	Descripción	S1	S2	S3	Unidades	
Ki	Constante de transferencia líquido/gas	0.00065	0.00065	5409	1/día	Valor adaptado de (Solera del Río, 2014)
K	Constante de Henry	0.528	0.528	0.528	Mol/Lt*atm	Valor adaptado de (Solera del Río, 2014)
Pgas	Presión parcial del gas	1	1	1	Atm	

S1: Condiciones de simulación 1; S2: Condiciones de Simulación 2; S3: Condiciones de Simulación 3

Nota: Valores iniciales para la simulación. Por Silva & Diaz, 2019

Para la segunda configuración se adaptaron los parámetros de entrada del Coeficiente de velocidad media para metanogénesis (K_m) en el modelo para observar si se presentaba mejoría en la simulación del biogás producido, este valor fue adaptado del modelo ADM1 de (Kalfas, Skiadas, Gavala, & Stamatelatou, 2006), sin embargo, este valor fue cambiado varias veces dentro del rango recomendado ($4.52 \times 10^{-7} - 0.0$) $KgCOD/Lt * dia$ para la simulación y no hubo ningún efecto en los resultados de la simulación.

Para la tercera configuración se modificó la K_{des} ya que los valores resultados no se asemejaban a los datos experimentales, este valor fue modificado por ensayo y error desde el valor estándar o inicial dentro del rango recomendado ($0.3 - 0.5$) dia^{-1} (Andrews & Graef, 1971) y que fue convertido a seg^{-1} para ajustar el tiempo de la simulación. Posteriormente se modificó K_m

para verificar si tenía alguna mejoría en las corridas, sin embargo, no tuvo efecto alguno y se determinó utilizar el valor inicial recomendado.

8.2.4. Implementación en MATLAB®/SIMULINK.

Las reacciones del proceso fueron codificadas en MATLAB®/SIMULINK® en forma de ecuaciones algebraicas diferenciales, las cuales se resolvió en cada intervalo de tiempo seleccionado (time step) por el “Ordinary Differential Equations” o ODE. Al ser las ecuaciones que se plantearon en 1er orden, se empleará el ODE45 inicialmente para la resolución de las ecuaciones. Esta herramienta de MATLAB usa el método matemático de Runge-Kutta el cual está desarrollado por el método Euler mejorado. Además, se implementó dicho programa, debido a su flexibilidad para la simulación de condiciones dinámicas implementadas en el modelo. Igualmente se realizaron corridas en otros ODE, sin alteración en los resultados de la simulación.

8.2.4.1. Estructura

El modelo matemático se desarrolló en tres grandes bloques, creando tres fases en el esquema de diagramas de bloques en Simulink. Los valores son visualizados por la función de Matlab para visualización de estos resultados.

Las variables y los datos iniciales se introducen en bloques de Simulink que se llaman Constant, los cuales alimentan a los bloques Matlab function, para así resolver el sistema ya que se puede escribir una función Matlab para usarlo en el modelo Simulink; se utilizó el bloque de Clock, para así, utilizar el tiempo de simulación actual en cada paso de la simulación. Para visualizar las curvas de las variables de estado generadas durante la simulación se ha implementado una función personalizada de Matlab.

8.2.4.2. Diagrama de bloques.

En la Figura 5 se desarrolla un modelo matemático de un biodigestor de entrada continua, el que simula el comportamiento, bajo la cinética de Monod, resolviendo el sistema de ecuaciones diferenciales que describe el comportamiento del biodigestor.

Para el inicio del modelo presenta las entradas como son las concentraciones iniciales de las variables solubles e insolubles, parámetros fisicoquímicos y constantes cinéticas, los cuales están presentes en las ecuaciones que conforman el modelo.

Se encuentra dividida en 4 etapas; para representar el sistema, se desarrollaron subsistemas de bloques, en Simulink, creando un sistema complejo a partir de varios sistemas simples. El modelo funciona bajo el método de orden medio ODE 45, para resolver las ecuaciones diferenciales, en las configuraciones que se hicieron en las corridas, se hicieron cambios de ODE, pero no se observaron mejorías en las corridas, así que se determinó dejarlo en la configuración recomendada.

El modelo, ofrece la posibilidad de interactuar, cambiando variables y datos relevantes, permitiendo controlar los procesos internos de la simulación y determinando las condiciones ideales del biodigestor.

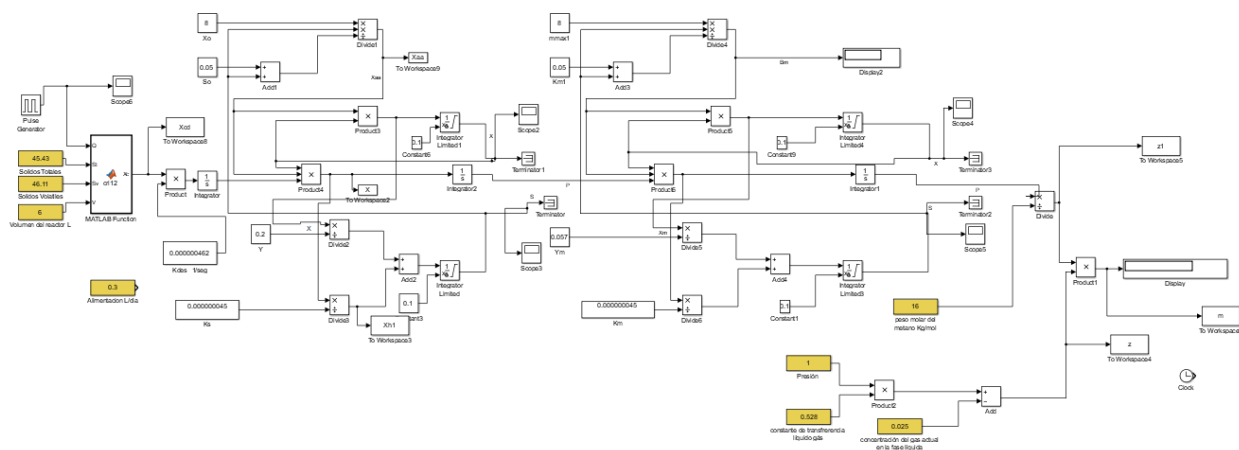


Figura 5 Estructura del modelo en Simulink. Por Silva & Diaz, 2019

Etapa 1. Hidrólisis

Partiendo de los datos experimentales del biodigestor en la tesis “Diseño y construcción de un biorreactor tipo fed-batch para fines experimentales”, en la figura 5, se procedió a resolver las ecuaciones diferenciales de segundo orden que se planteó para la modelización de la hidrólisis, para resolver este sistema de ecuaciones se desarrolló en Simulink. Se parte de las condiciones iniciales de las configuraciones (ver tabla 4). Para la introducción de la alimentación del biodigestor, se utilizó un bloque llamado *pulse* y así ingresar los valores diarios y periódicos de la

alimentación, además, se agregó un bloque llamado *MATLAB Función*, y así simplificar las ecuaciones diferenciales del proceso, ahorrando tiempo entre las corridas del modelo. Para destacar la calidad de hidrólisis alcanzado, así como la velocidad del proceso dependió de la tasa de desintegración, siendo esta la etapa más importante del proceso del biodigestor, ya que al cambiar la tasa de desintegración pudo los datos asemejarse mayormente a la realidad. El planteamiento de la ecuación diferencial (ver ecuación 1). Los estados son las derivadas de cada variable, por ende, el valor no es fijo y se utiliza el integrador en la parte final.

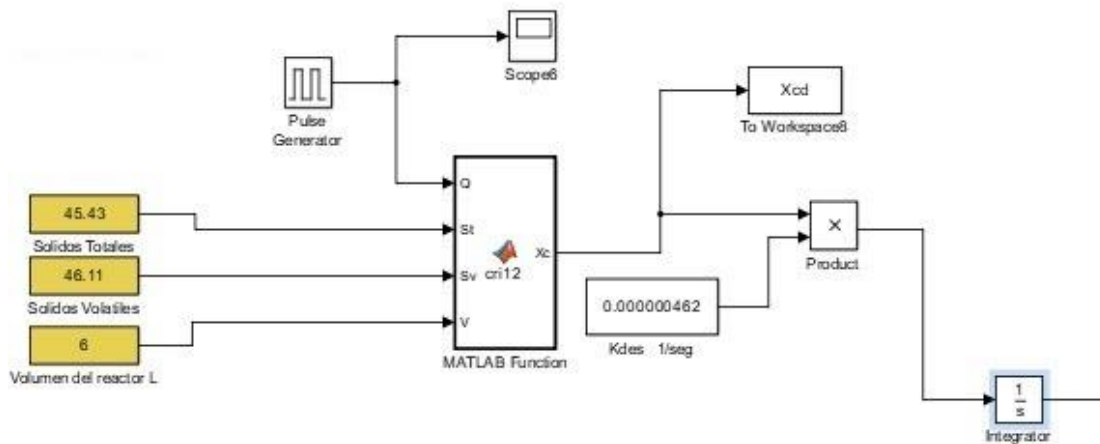


Figura 6 Simulación con bloques para la fase de la hidrólisis. Por Silva & Diaz, 2019

Etapa 2. Acidogénesis y Acetogénesis

Se observan los bloques que representan las ecuaciones de estado, que son divididas en dos conjuntos, P que representa los sólidos diluidos y los que se transporta por todo el modelo. Se detalla la dependencia de la etapa anterior que se puede ver en la figura 6.

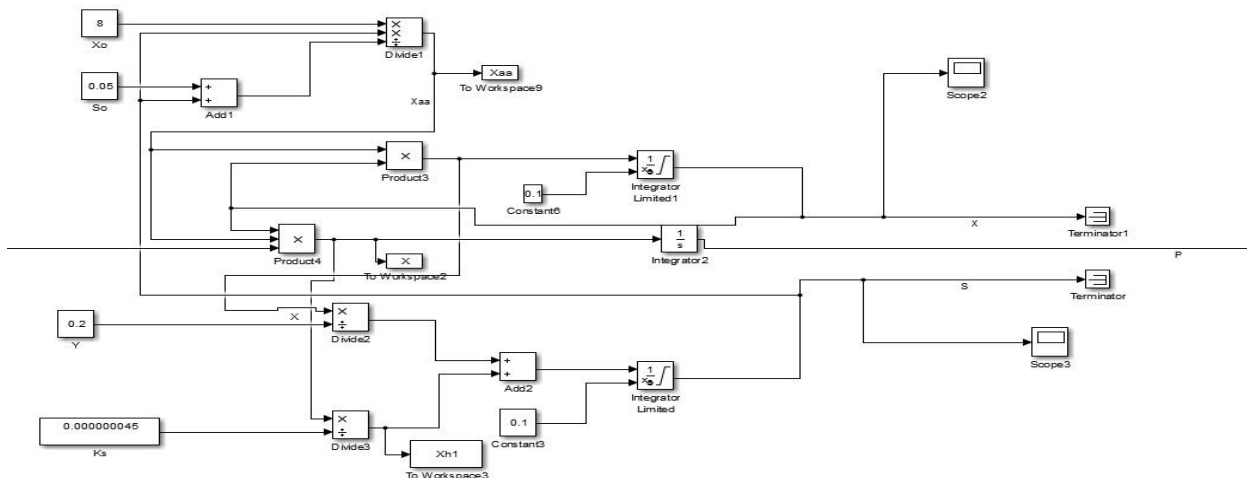


Figura 7 Simulación en bloques para la fase del Acidogénesis y Acetogénesis. Por Silva & Diaz, 2019

Etapa 3. Metanogénesis

La estructura de la metanogénesis es similar a la etapa anterior, solo cambia por el coeficiente de velocidad media para metanogénesis, su representación se puede ver en la figura 7.

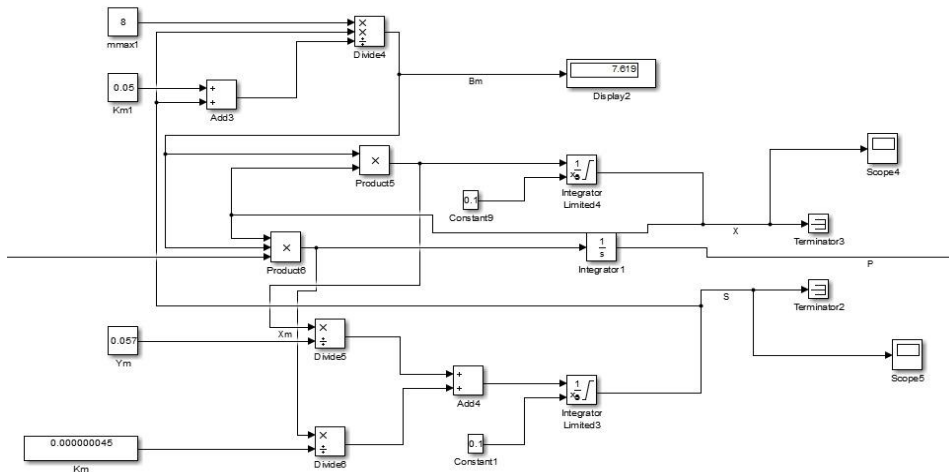


Figura 8 Diagrama de bloques para la fase de la Metanogénesis. Por Silva & Diaz, 2019

Ley de Henry

En esta etapa, se imita el comportamiento de la ley de Henry, en el que relaciona la cantidad del gas disuelto en el agua contaminada del biodigestor, la cual se representa en la figura 8.

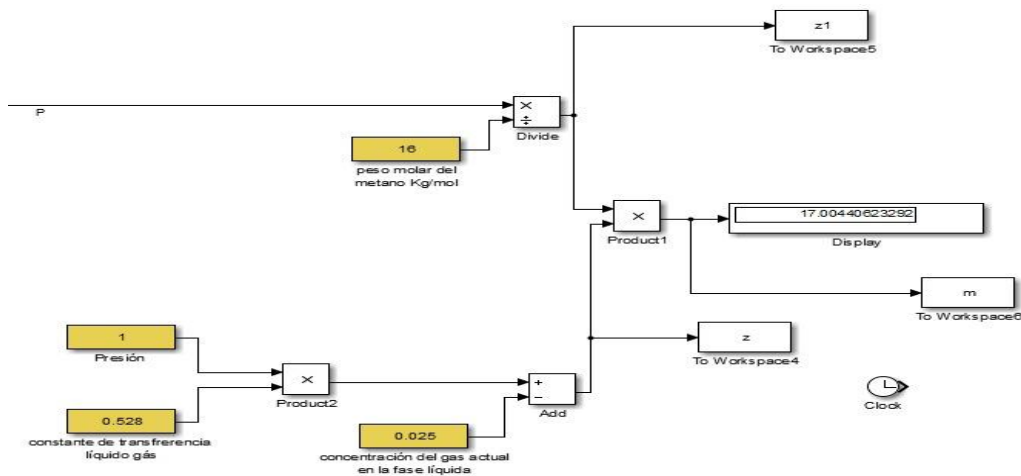


Figura 9 Diagrama de bloques para Ley de transferencia de líquido a gas. Por Silva & Diaz, 2019

Método de Suma de Riemann

Para determinar el valor real del biogás producido se utilizaron datos experimentales obtenidos en un reactor de mezcla completa alimentado con excretas porcinas (Martínez Monsalve, 2019) de la tesis “Diseño y construcción de un biorreactor tipo fed-batch para fines experimentales”, la cual midió la producción diaria de biogás y se utilizaron como datos iniciales para el modelo matemático, como se observa en la tabla 7.

Tabla 5 Datos de parametrización del modelo

	Días	Excretas gr	%ST	%SV	Alimentación L/d	Temperatura °C
Parámetros iniciales	1	38,4615				
	2	38,4615				
	3	38,4615	45,434	46,118	0,3	27,96
	4	38,4615				
	5	38,4615				

Nota: Parámetros utilizados para la configuración del modelo matemático. Por Silva & Díaz, 2019

Se realizaron tres corridas, modificando los valores de K_{des} y K_m para cada configuración (Tabla 6) en la primera configuración se realizó la simulación con los valores estándar y recomendados para la simulación, sin embargo los valores dieron alejados del valor real, en la segunda configuración se modificó el coeficiente de velocidad media para metanogénesis, pero no hubo cambios en el valor; En la tercera configuración se modificó el valor en la tasa de desintegración K_{des} dentro del rango recomendando por el modelo ADM1, obteniendo datos más reales; este valor es el mínimo valor de la desintegración, a cada uno de los valores se le aplicó el método de Suma de Riemann con el fin de determinar el área bajo la curva y así los valores teóricos de biogás producido.

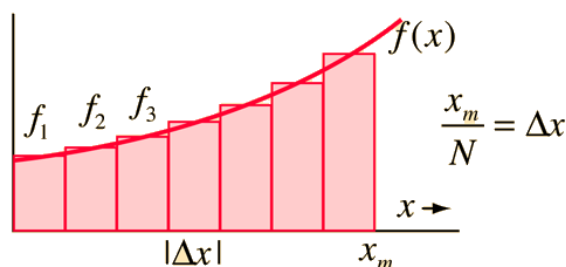


Figura 10 Método del trapecio (HyperPhysics, 2017).

Se seleccionaron 144 datos en intervalos de 600 segundos hasta completar 86400 segundos equivalentes a un día, debido a que el análisis de los datos obtenidos en un día, era demasiado extensos obteniendo un dato por segundo siendo casi imposible analizarlos y procesarlos. A estos valores se les aplicó la fórmula de Riemann.

$$\sum_{i=1}^N f_i(x)\Delta x$$

Ecuación 11 Método del trapecio

Obteniendo los datos producidos en el modelo diariamente. Se realizaron dos configuraciones de simulación, a las cuales se les disminuyó el valor de *Kdes*, para ajustar la velocidad de degradación del proceso de la hidrólisis, y así mismo la producción de biogás. Esto porque otros factores inhibitorios del proceso lo es el pH, la inhibición de las bacterias por amonio o variación de la temperatura no están contemplados en esta versión del modelo.

Tabla 6: Resultados de la simulación en las dos corridas

Configuraciones	Días	Kdes	Km	Área bajo la curva (litros)
Configuración 1	1	5.78×10^{-6}	4.5×10^{-8}	1,290907751
	2			9,009162044
	3			24,66044238
	4			47,278861
	5			78,31326041
Configuración 2	1	5.78×10^{-6}	2.38×10^{-4}	1,290907751
	2			9,009162044
	3			24,66044238
	4			47,278861
	5			78,31326041
Configuración 3	1	4.62×10^{-7}	4.5×10^{-8}	0,103058473
	2			0,719238442
	3			1,968744492
	4			3,774465834
	5			6,25206952

Nota: Resultados obtenidos en la configuración de la simulación realizada. Por Silva & Diaz, 2019

Al analizar la tabla anterior se observa que para la primera corrida los valores del día 1 y 2 son ajustados pero al pasar al día 3,4 y 5 los valores aumentan exponencialmente siendo el más alto de 78,31 litros para el día 5, para la segunda corrida se modificó la *k* de desintegración, para la metanogénesis sin embargo no tuvo efecto alguno manteniéndose las mismas cantidades de biogás producido que en la corrida inicial, esto se atribuye a que no es tan significativa la etapa de metanogénesis para el sustrato usado, ya que al ser material particulado, las etapas iniciales del proceso son las limitantes, especialmente la desintegración e hidrólisis. Para la tercera configuración se modificó *K*_{des} y se observó que los datos resultantes presentaban valores más cercanos a la realidad siendo el valor más alto de biogás producido de 6,2 litros para el día 5 y el valor más bajo de 0.7 litros para el día 1.

Cálculo de la eficiencia del modelo

Se calcula la eficiencia del modelo con los valores simulados en la configuración 3 al ser los valores más aproximados a los datos reales se utilizaron los datos experimentales obtenidos en un reactor de mezcla completa alimentado con excretas porcinas (Martínez Monsalve, 2019).

$$\% \text{ concordancia} = \frac{\text{Valor real día } i}{\text{valor simulado día } i} * 100$$

i = día comparado

Tabla 7: Valores de concordancia para cada día simulado de la configuración 3.

<i>Día</i>	<i>Valor real (litros)</i>	<i>Valor simulado (litros)</i>	<i>% de concordancia</i>
<i>1</i>	<i>0.10075</i>	<i>0,103058473</i>	<i>97.7%</i>
<i>2</i>	<i>0.29905</i>	<i>0,719238442</i>	<i>41,5%</i>
<i>3</i>	<i>0.32565</i>	<i>1,968744492</i>	<i>16.5%</i>
<i>4</i>	<i>0.29035</i>	<i>3,774465834</i>	<i>7.6%</i>
<i>5</i>	<i>022045</i>	<i>6,25206952</i>	<i>3.5%</i>

Nota: Valores de concordancia para cada día simulado de la configuración 3. Por Silva & Diaz, 2019

Al analizar la tabla anterior, se observa que el resultado de la simulación del día 1 para la configuración 3, es el que mayor semejanza tiene con los datos experimentales, con una concordancia del 97.7% al valor real, y se observa una tendencia a disminuir esta exactitud a

medida que transcurren los días de simulación, al ser mucho más alto los valores de simulación que los de los datos experimentales, siempre una tendencia al alza con los valores simulados, a diferencia de los datos reales. Para el día 5 hay una concordancia del 3.5% siendo esta el valor más bajo de exactitud durante toda la simulación.

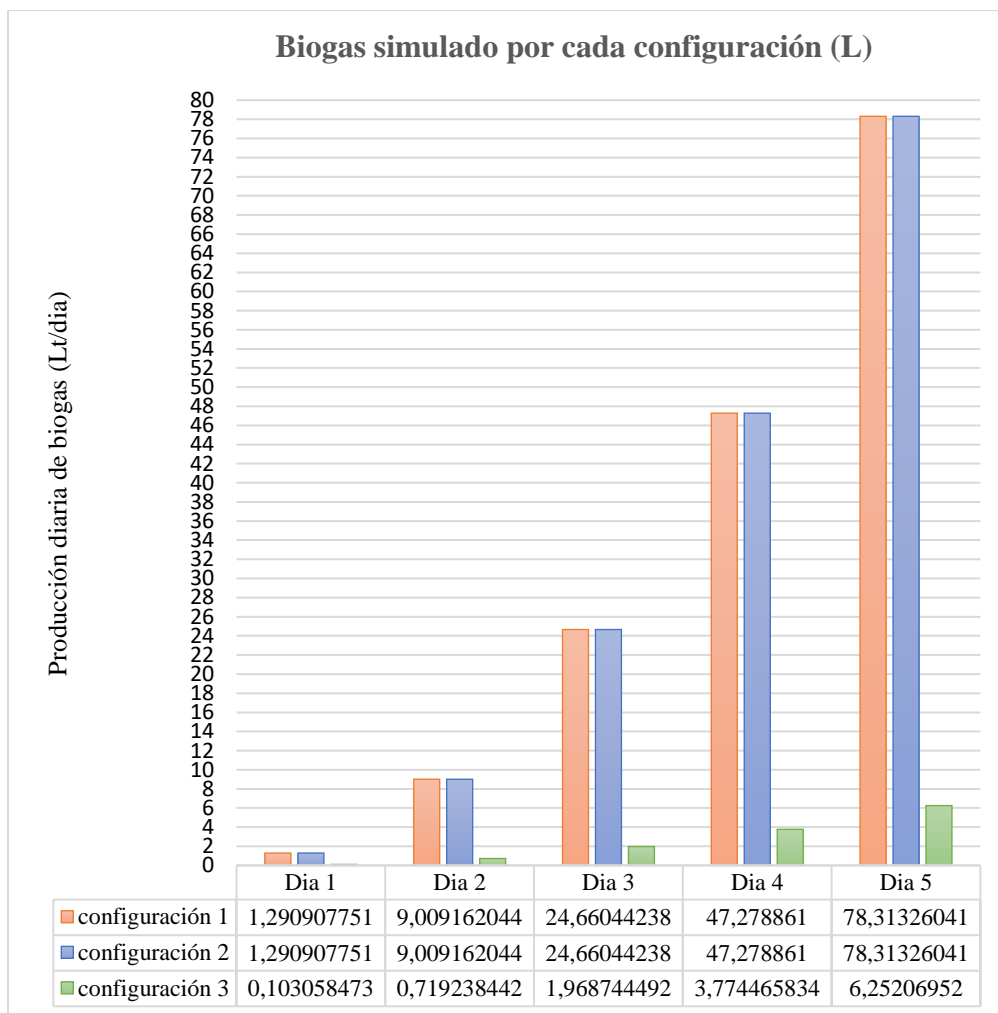


Figura 11 Comportamiento del proceso anaerobio en las diferentes configuraciones Por Silva & Diaz, 2019

En la primera configuración (Ver Tabla 4) la materia compleja es fragmentada durante la desintegración celular en carbohidratos, lípidos y proteínas, y material particulado, la cual el K_{des} es el limitante de dicha desintegración. En la segunda configuración (Ver Tabla 4) se realiza la disminución de K_m para observar el comportamiento del modelo matemático si hay alguna influencia, sin embargo la velocidad máxima de crecimiento específica de los microorganismos no tuvo efecto en la producción del biogas siendo esta similar a la de la configuración inicial; En

la tercera configuración (Ver Tabla 6) .se disminuyó el valor de K_{des} limitando la velocidad de reacción; en la tercera configuración del modelo los valores producidos de biogás son más pequeños y más aproximados a los datos experimentales obtenidos para la comparación. Aunque el valor para el primer día tiene una concordancia mayor al 90 %, a medida que ocurre el proceso en la simulación la cantidad de biogás simulada supera a la real. (ver Figura 11). Se observa, que la K_{des} influye directamente en la producción de biogas simulada.

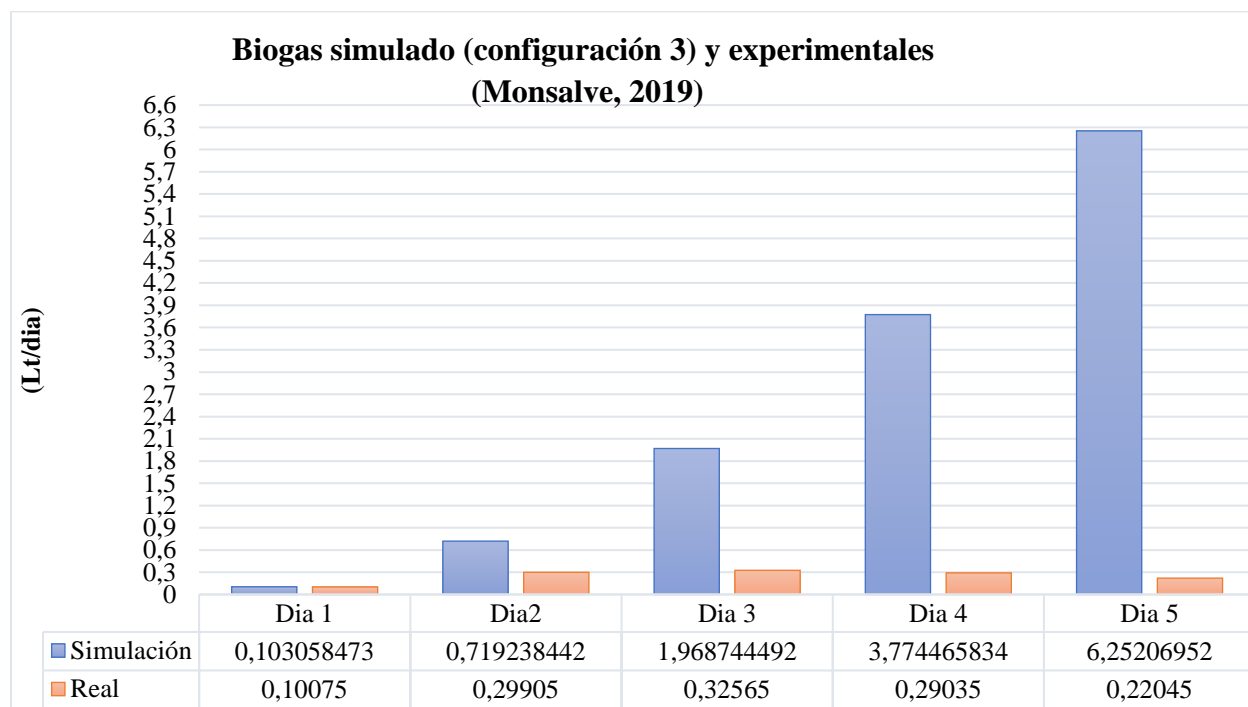


Figura 12 Comparación de los valores de biogás simulados vs los reales. Por Silva & Diaz, 2019

Esta discrepancia después del primer día de producción de biogás se puede deber a la ausencia de factores inhibitorios del proceso, que no fueron incluidos al ser esta una versión inicial de la simulación, donde se modeló la degradación sin factores inhibitorios. Por ejemplo, el contenido de nitrógeno y de ácidos no fueron considerados, debido a la complejidad que esto involucra y a la falta de datos experimentales para corroborar tal implementación. Además no se modeló la muerte de la población bacteriana, debido a que aumenta la complejidad del modelo inicial. Sin embargo, con los resultados obtenidos se tienen ya una base para incorporar estos otros factores en versiones posteriores del modelo, para lo cual sería también necesario tener datos experimentales que consideren estos otros factores, ya que en los datos disponibles para calibrar la simulación presente no se tenían estos datos disponibles.

Conclusiones

La constante cinética con valores más cercanos a la realidad del sustrato usado para esta primera versión del modelo, el cual fue excretas porcinas, fue $K_{des} = x$ en d^{-1} teniendo gran influencia en la producción de biogás de acuerdo a las simulaciones obtenidas, resalta el hecho de que si el valor aumento o disminuye a si mismo será el comportamiento de la producción de biogás simulado.

Las simulaciones muestran que el modelo simplificado se acerca al valor obtenido de biogás para el primer día de los datos experimentales. Aunque posteriormente presenta un aumento exponencial que no se refleja en la realidad, esto se puede deber a la ausencia de inhibición y de muerte de la cinética bacteriana lo que ocasiona que la producción de biogás aumente, al no haber en el modelo la representación de las limitaciones biológicas del proceso que ocurre en la realidad, sin embargo se debe seguir desarrollando el modelo matemático agregando estos factores de inhibición y para obtener una simulación dinámica más completa cercana a la realidad.

De acuerdo a las condiciones locales y según a los resultados obtenidos de las simulaciones, la desintegración para el sustrato seleccionado es de valores bajos, para el resto de variables cinéticas, valores promedio de la literatura fueron suficientes para una modelación aceptable, y variaciones de los mismos en otras fases como la de la metanogénesis no fueron relevantes.

Recomendaciones

Se recomienda un estudio más detallado en el modelo propuesto, donde se implementen factores de inhibición que controlen el crecimiento bacteriano como lo es inhibir cierta concentración de sustrato en futuras versiones del modelo, para tener simulaciones más aproximadas a la realidad, ya que el modelo trabajado no tiene en cuenta procesos más complejos que se presentan durante la digestión anaerobia.

También es conveniente la medición de otros parámetros, necesarios para poder simular y calibrar otros procesos biológicos ligados a la digestión anaerobia, tener un mayor detalle en la recolección de los datos experimentales, además se necesita que los datos experimentales sean recolectados continuamente y no cada 24 horas, como lo es también considerar la toma de datos experimentales para el resto de parámetros como el pH, temperatura, otros. para lograr una mayor precisión en los resultados de la simulación.

La herramienta Matlab facilita la construcción del modelo por medio de la extensión Simulink, permitiendo al investigador añadir o eliminar etapas del proceso anaerobio, dependiendo del nivel de detalle de la simulación y de los datos experimentales recolectados siendo este modelo.

Es necesario tener en cuenta que el programador Simulink maneja el tiempo en segundos, mientras que las constantes cinéticas están en días, esto se debe tener presente para la construcción del modelo, así como para la conversión de los resultados en días para comparar con los datos en la realidad.

Referencias bibliográficas

- Andrews, J., & Graef, S. R. (1971). *Dynamic modeling and simulation of the anaerobic process*. In: *Anaerobic Biological Treatment Processes*. Whashington, D.C. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ba-1971-0105.ch008>
- Angelidaki, I., Ellegaard, L., & Ahring, B. (1999). *A Comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas*. Denmark: the technical university of Denmark. <https://europepmc.org/article/med/10099616>
- Batstone, D., Keller, J., Angelidaki, I., Kayuzhnyi, S., Pavlovstahis, S., Rozzi, A., . . . Vavilin, V. (202). *Anaerobic Digestion Model No. 1. Scientific and Technical Report 15*. St. Lucia: IWA Publishing. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4296694/mod_resource/content/1/ADM1-WST.pdf
- Cabrera, O. (2015). *Desarrollo de un simulador numérico basado en ADM1 de un reactor anaerobio ASBR*. Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya. <https://core.ac.uk/download/pdf/41824032.pdf>
- Campos, A. (2001). *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. Lleida: Universidad de Lleida. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8229/Tecp1de1.pdf?sequence=1>
- Cendales Ladino, E. D. (2011). *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. <http://bdigital.unal.edu.co/4100/>
- Cendales, E. D., & Jimenez, S. A. (2014). *Modelamiento computacional de la producción de energía renovable a partir de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovinos*. Bogotá: Universidad EAN. <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revista/article/view/814>
- Chungandro Nacaza, K. R., & Manitio Cahuatijo, G. J. (2010). *Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas*. Escuela politécnica nacional: Quito. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1650>

- Currie, W., Varnero, T., & Santibanez, F. (1992). Biogas en Chile. Proyección basada en materias primas y temperatura atmosférica. *Simiente*, 62(2), 103 - 108.
- D.T Hill, C. B. (1977). A Dynamic Model for Simulation of Animal Waste Digestion. *Water Environment Federation*.
- Duque. (1996). *Características fisicoquímicas de excretas porcinas y su impacto ambiental*. Santa Marta, Colombia.
- Fernandez, F. (2013). *Estudio del comportamiento de reactores anaerobios ASBR frente a compuestos de difícil degradación y/o efectos negativos*. Valparaíso: Universidad pontificia católica de Valparaíso. https://www.usc.es/biogroup/sites/default/files/Tesis_doctoral_F.Rosenkranz.pdf
- Fiotto, S. (2013). *Modelamiento y simulación de reactores secuenciales discontinuos en un proceso de digestión anaeróbica*. Bahía Blanca: Universidad tecnológica nacional facultad regional Bahía Blanca. http://www.edutecne.utn.edu.ar/publicaciones/tesis/modelamiento_simulacion_reactores.pdf
- Hernández Jaramillo, J. D. (Enero de 2015). Implementación del modelo de digestión anaerobia adm1 en matlab/simulink. Madrid. <http://oa.upm.es/34117/>
- Hill, D. (1983). *Simplified Monod kinetic of methane fermentation of animal wastes*. Agric. Wastes. Alabama: Auburn University. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0141460783900094>
- Hill, D. a. (1977). *A dynamic model for simulation of animal waste digestion*. Clemson: Clemson University. <https://www.jstor.org/stable/25039421>
- Huertas, R. A. (11 de 12 de 2015). Anaerobic digestión: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry. *Producción mas limpia Scielo*, Vol.10, (No.2), 142•159. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014
- Husain, A. (1998). *Mathematical models of the kinetics of anaerobic digestion – a selected review*. *Biomass and Bioenergy*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953497100472>
- HyperPhysics. (15 de 02 de 2017). (U. E. Georgia, Ed.) Georgia, Estados Unidos: Merlot Classics.
- ifak Systems. (2015). *Simba portal*. Obtenido de <https://simba.ifak.eu/>

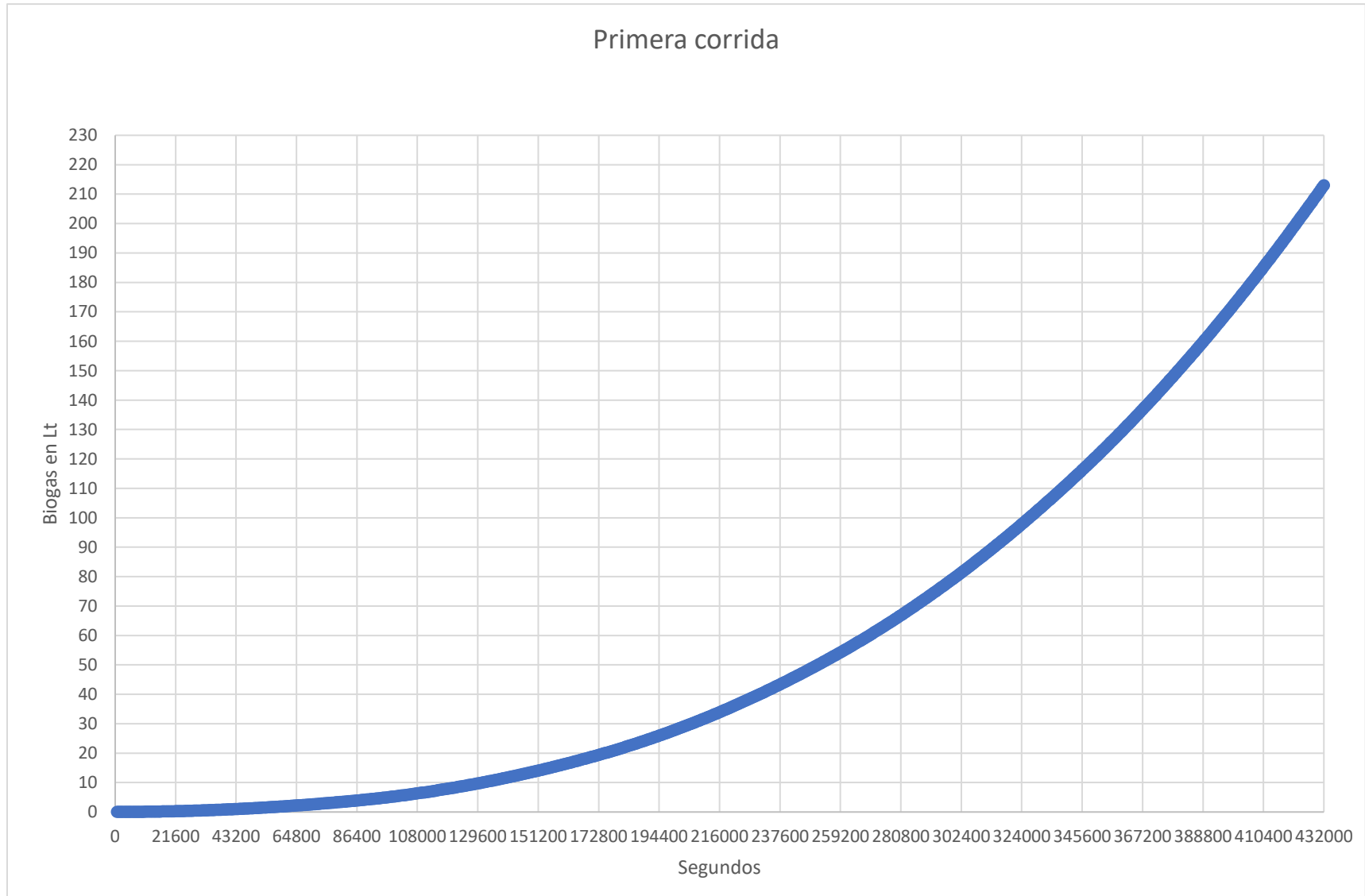
- Jana, A. k. (5 de Agosto de 2016). Dividing wall column: Improving thermal efficiency, energy savings and economic performance. *Applied Thermal Engineering*, 106, págs. 1033-1041. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.06.079
- Kalfas, H., Skiadas, I., Gavala, H. N., & Stamatelatou, K. (02 de 2006). Application of ADM1 for the simulation of anaerobic digestion of olive pulp under mesophilic and thermophilic conditions. (U. o. Department of Chemical Engineering, Ed.) Karatheodor, Greece: Water Science & Technology. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/6758582_Application_of_ADM1_for_the_simulation_of_anaerobic_digestion_of_olive_pulp_under_mesophilic_and_thermophilic_conditions
- Kristiansen, B. y. (1991). Diseño de biorreactores y enzimología. (J. B. Moreno Grau, Ed.) pág. 248.
- Kythreotou, N., Florides, G., & Tassou, S. (2014). *A review of simple to scientific models for anaerobic digestion*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.055>.
- López Pérez, A. C. (2018). *Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás*. Bogotá: Asociación colombiana de porcicultores & Fondo nacional de la porcicultura. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/1984>
- Martínez Monsalve, D. F. (11 de 07 de 2019). Diseño y construcción de un biorreactor tipo fed-batch para fines experimentales. Villavicencio, Meta, Colombia: Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/18145/2019diegomartinez.pdf?sequence=11&isAllowed=y>
- MathWorks. (s.f.). *MathWorks*. Obtenido de Simulink / Bloques de uso común: https://la.mathworks.com/academia.html?s_tid=gn_acad
- Monod, J. (s.f.). The growth of bacterial cultures. Francia: Marine Biological Laboratory. <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103>
- Morales, L. A., Rodríguez, Á. D., & Rojas, H. E. (10 de 08 de 2017). Assessment of the input substrate characteristics included in the anaerobic digestion model no. 1 (adm1). 2. (SciELO, Ed.) Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-750X2017000200269

- Núñez Pintado, L. f. (2017). *Modelamiento y control de procesos de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales*. Piura: Universidad de Piura. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2986>
- Núñez, L. (2017). Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales. Piura, Perú: Universidad de PIURA. (Repetido borrar)
- Ortiz Cabrera, M. A. (2015). *Desarrollo de un simulador numerico basado en ADM1 de un reactor anaerobio ASBR*. Barcelona: Universidad Politécnica de catalunya. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/80317/TFM_MARCO_ORTIZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Perez, J. A. (2010). Estudio y diseño de un biodigestor para aplicacion en pequeños ganaderos y lecheros. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile. Obtenido de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103926/cf-perez_jm.pdf?sequence=3
- Pomares, F. (1998). Ingeniería y aspectos técnicos de la digestión anaeróbica II.4. págs. 1 - 426. Mundiprensa
- Rea, J. (2014). *Kinetic Modeling and Experimentation of Anaerobic Digestion*. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. <http://web.mit.edu/kkung/Public/ThesisJR.pdf>
- Shao, S. (2015). *Estudio de optimización de la codigestión anaerobia de residuos orgánicos mediante simulación numérica*. Barcelona: universidad politecnica de catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/80293?show=full>
- Sharma, P. (2001). Dynamic modelling and simulation of anaerobic digester for high organic strength waste. Saharanpur, India. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/ddce/55bc4a06e3ea33de9665c9de261952971916.pdf>
- Solera del Río, R. (2014). II.2, Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica. II, 319. Ediciones Paraninfo.
- Sossa, J. J., & Alvarez, R. (2016). *Implementación del modelo IWA ADM1 a la modelación y simulación del tratamiento anaerobio de los efluentes industriales de matadero en un reactor UASB*. La Paz: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182016000100009

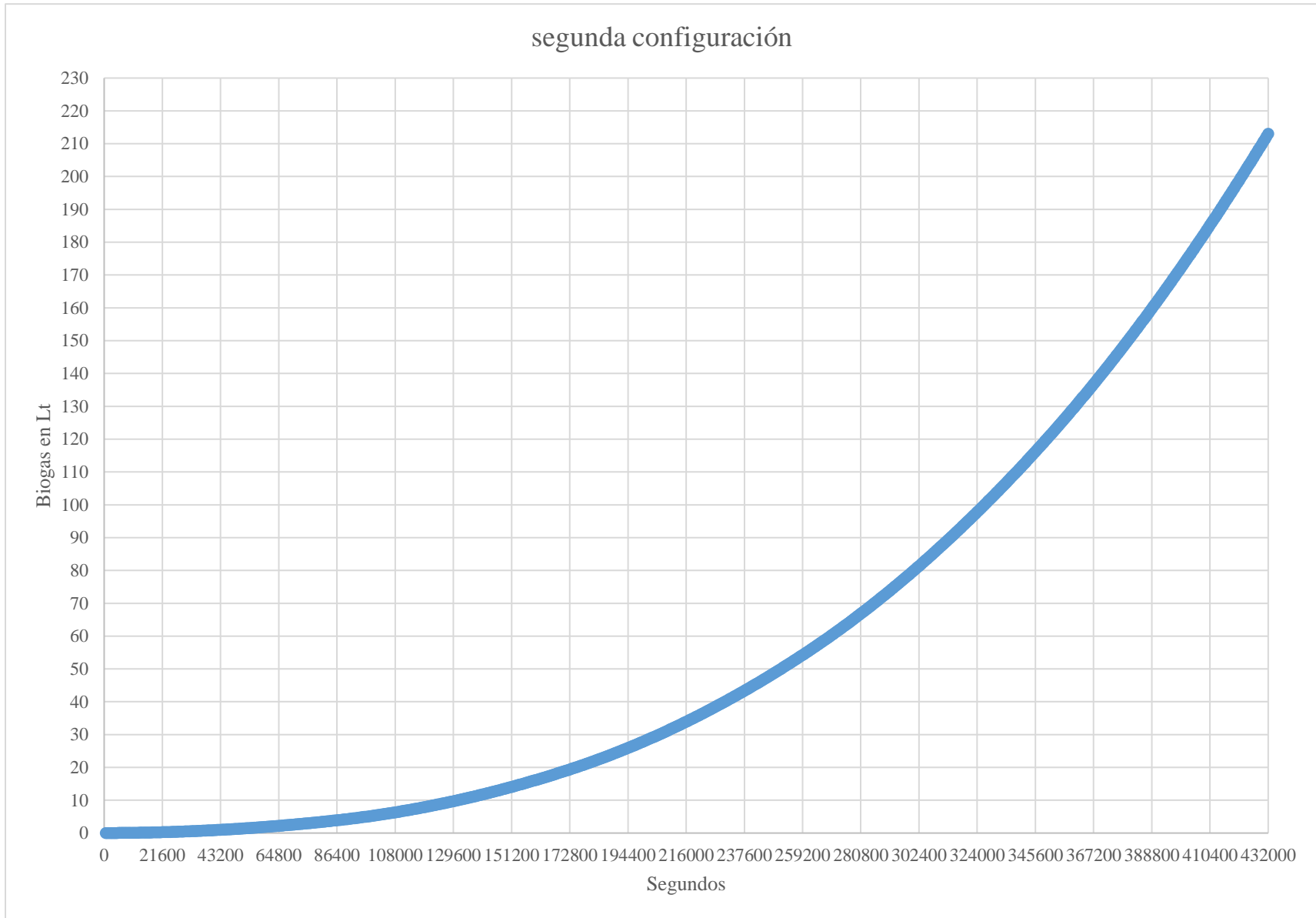
- Valladares-Carnero, F. (2017). *Modelamiento del proceso de digestión anaeróbica de estiércol vacuno y cáscara de cacao*. Piura: Universidad de Piura.
<https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3069>
- Vásquez Garavito, N. C., & Riveros Jiménez, D. R. (2013). *Diseño y construcción de un prototipo biodigestor tipo mixto para la producción y almacenamiento de gas metano*. Bogotá: Universidad de San Buenaventura.
<http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/72493.pdf>
- Zaher, U., Pandey, P., & Chen, S. (2009). *A simple elemental continuity based model application to study the anaerobic microbial activity for the treatment of dairy manure*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X0800317X>.
- Zorro Roa, J. A. (2016). *Modelación matemática de la codigestión anaerobia entre aguas residuales y lixiviados*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
<http://bdigital.unal.edu.co/57747/7/JairoA.ZorroRoa.2016.pdf>

Anexos

Anexo 1. Tabla biogas vs tiempo primera configuración



Anexo 2. Tabla biogas vs tiempo segunda configuración



Anexo 3. Tabla biogas vs tiempo tercera configuración.

