



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
RENOVABLE A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) SIMULADO
MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE SOFTWARE MATLAB/SIMULINK COMO
ALTERNATIVA AMBIENTAL Y ENERGÉTICA SOSTENIBLE EN
BARRANCABERMEJA**

MODALIDAD: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

**KEVIN MIGUEL SABALZA MARTINEZ
CC. 1096238827
RICHARD FERNANDO SANCHEZ GALVIS
CC. 1096212768**

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
BARRANCABERMEJA, 24 DE SEPTIEMBRE DE 2020**



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
RENOVABLE A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) SIMULADO
MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE SOFTWARE MATLAB/SIMULINK COMO
ALTERNATIVA AMBIENTAL Y ENERGÉTICA SOSTENIBLE EN
BARRANCABERMEJA**

MODALIDAD: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

**KEVIN MIGUEL SABALZA MARTINEZ
CC. 1096238827
RICHARD FERNANDO SANCHEZ GALVIS
CC. 1096212768**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electromecánico**

**DIRECTOR
ING. FREDY ALBERTO ROJAS ESPINOZA**

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS SOCIALES - DIANOIA

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
BARRANCABERMEJA, 24 DE SEPTIEMBRE DE 2020**


F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

Nota de Aceptación

APROBADO


Firma del Evaluador


Firma del Director

DEDICATORIA

Dedicado a mis familiares, especialmente mi madre, mi abuela y mi hermano, los cuales financiaron este proceso académico económicamente, espiritualmente y afectivamente, con el fin de estimular la realización del mismo.

A nuestros formadores académicos de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS), por emprender junto a nosotros este proceso de enseñanza y aprendizaje en la ingeniería electromecánica.

Kevin Miguel Sabalza Martínez

Este proyecto lo dedico a mis Padres, por el apoyo continuo que me han dado y que ha hecho posible que logre culminar con mi carrera profesional. A Dios por concederme la vida y las oportunidades de conocimiento y progreso. A mis amigos que me motivaron para seguir adelante, también lo dedico a las generaciones futuras que se beneficiarán de esta investigación, para que tengan una base sólida en la cual puedan respaldarse. A mi director de proyecto por su asesoría y dirección en colaboración con mis lectores y sinodales.

Richard Fernando Sánchez Galvis

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a mis familiares y formadores que contribuyeron en el trasegar de la carrera. A los compañeros de aula por formar parte de toda la experiencia universitaria que culmina con este proyecto de grado. Agradecido con cada uno de los integrantes de este proyecto, por depositar su esfuerzo académico, su compañerismo y su compromiso con el trabajo desempeñado. Agradecido con Dios padre todo poderoso por brindarnos la vida que nos permite disfrutar de esta experiencia.

Agradecimiento a nuestro director de proyecto de grado Fredy Alberto Rojas por velar no sólo el proceso de realización de trabajo de grado, sino también por acompañarnos en nuestro proceso de formación como Ingenieros electromecánicos.

Kevin Miguel Sabalza Martínez

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	15
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.2. JUSTIFICACIÓN	17
1.3. OBJETIVOS	18
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	18
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.4. ESTADO DEL ARTE.....	19
2. MARCO REFERENCIAL	23
2.1. MARCO TEÓRICO	23
2.1.1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).....	23
2.1.1.1 Características físicas, químicas y biológicas de los RSU	23
2.1.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	25
2.1.2.1 Fases de la digestión anaerobia	26
2.1.2.1.1 Hidrólisis.....	27
2.1.2.1.2 Fermentación o acidogénesis.....	28
2.1.2.1.3 Acetogénesis.....	29
2.1.2.1.4 Metanogénesis.....	30
2.1.2.2 Parámetros operacionales importantes para el proceso de digestión anaerobia	
31	
2.1.2.2.1 pH y alcalinidad.....	31
2.1.2.2.2 Potencial redox.....	31
2.1.2.2.3 Nutrientes.....	31
2.1.2.2.4 Temperatura.....	32
2.1.2.2.5 Toxicidad e inhibición	33
2.1.2.2.6 Agitación/mezclado	34
2.1.3. BIODIGESTORES.....	34
2.1.3.1 Tipo de biodigestores anaerobios.....	35
2.1.3.1.1 Digestor discontinuo	35
2.1.3.1.2 Digestor completamente mezclado.....	36

2.1.3.1.3	Digestor flujo pistón	39
2.2.	MARCO CONCEPTUAL	40
2.3.	MARCO LEGAL	42
2.3.1.	NORMA CONSTITUCIONAL	42
2.3.2.	LEY N° 1844 DE 2017 “POR MEDIO DE LA CUAL SE APRUEBA EL ACUERDO DE PARÍS, ADOPTADO EN 12 DE DICIEMBRE DE 2015 EN PARÍS - FRANCIA”	44
2.3.3.	LEY N° 1931 DE 2018 “POR LA CUAL SE ESTABLECEN DIRECTRICES PARA LA GESTIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO”	45
2.3.4.	ACUERDO DE PARÍS.....	45
3.	DISEÑO DE LA INVESTIGACION.....	47
4.	DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	48
4.1.	ANÁLISIS AMBIENTAL, ENERGÉTICO, SOCIAL Y ECONÓMICO AL IMPLEMENTAR PROCESOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	48
4.2.	DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RSU	50
4.2.1.	ESTUDIO DE LA BIOMASA RESIDUAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	50
4.2.1.1	Cantidad de residuos sólidos generados	51
4.2.1.2	Volumen de residuos sólidos generados	55
4.2.2.	DISEÑO DEL BIODIGESTOR.....	57
4.2.2.1	Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)	57
4.2.2.2	Cálculo del volumen del biodigestor.....	58
4.2.2.3	Cálculo de las dimensiones del biodigestor	59
4.2.3.	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	60
4.2.4.	POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA.....	61
4.2.5.	COMPONENTES DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	63
4.2.6.	MODELO MATEMÁTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	64
4.2.7.	MODELADO DEL SISTEMA MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	67
4.3.	SIMULACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA	74
4.4.	SOCIALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS CON LA EMPRESA BIOTA S.A.S. 78	
5.	RESULTADOS	79
5.1.	MODELO MATEMÁTICO DEL BIODIGESTOR	79
5.2.	MODELADO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	87
6.	CONCLUSIONES	93
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

8. ANEXOS..... 98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia	27
Figura 2. Influencia de la temperatura en la etapa de la digestión anaerobia.....	32
Figura 3. Biodigestor discontinuo	36
Figura 4. Biodigestor continuamente agitado (CSTR)	37
Figura 5. Biodigestor de mezcla completa sin recirculación	38
Figura 6. Biodigestor de mezcla completa con recirculación o de contacto anaerobio	39
Figura 7. Biodigestor de flujo pistón	39
Figura 8. Generación de RSU por día entre los años 2017 a 2023 en el Municipio de Barrancabermeja	54
Figura 9. Eliminación de sólidos volátiles (SV) y producción volumétrica de gas en un digester anaerobio, en función del TRH	58
Figura 10. Bloques de operación para el cálculo de la potencia mecánica del motor de combustión interna	68
Figura 11. Algoritmo para desarrollar el modelo matemático en Matlab.....	74
Figura 12. Diseño de la interfaz gráfica de respuesta de los parámetros fundamentales del modelo matemático	76
Figura 13. Constante de velocidad K en función de la constante A en el modelo de Arrhenius	79
Figura 14. Variación de la presión en función de la constante A a diferentes temperaturas	82
Figura 15. Variación del volumen en función de la constante A a diferentes temperaturas	85
Figura 16. Osciloscopio de salida.....	88
Figura 17. Bus de salida de la máquina sincrónica	88

Figura 18. Bus de salida de la máquina sincrónica, display para la visualización de resultados durante la ejecución de la simulación	89
Figura 19. Resultados del display en simulación para una potencia de 500 W	89
Figura 20. Resultados del display en simulación para una potencia de 5.000 W .	90
Figura 21. Resultados del display en simulación para una potencia de 5.000.000 W.....	90
Figura 22. Medición de la frecuencia del voltaje generado por la máquina sincrónica	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Hidrólisis de los principales compuestos orgánicos	28
Tabla 2. Etapas involucradas en la digestión anaerobia	30
Tabla 3. Caracterización de los residuos generados en el Municipio de Barrancabermeja	50
Tabla 4. Proyección población año 2023 Municipio de Barrancabermeja.....	52
Tabla 5. Cantidad de residuos sólidos generados en el Municipio de Barrancabermeja	53
Tabla 6. Volumen de los residuos sólidos generados en el Municipio de Barrancabermeja periodo 2017 a 2023	57
Tabla 7. Variables de entrada para el modelamiento de un motor de ciclo Otto	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Algoritmo en Matlab desarrollado para el biodigestor	98
Anexo B. Algoritmo en Matlab desarrollado para el motor de combustión	109
Anexo C. Certificado de cumplimiento de la consultoría con Biota.....	111
Anexo D. Modelo del motor de combustión interna	112
Anexo E. Modelo del motogenerador de electricidad	113
Anexo F. Modelo de la máquina sincrónica	114
Anexo G. Carga resistiva y medidores de corriente y voltaje en línea y corriente de carga por fase	115

RESUMEN EJECUTIVO

La digestión anaerobia es un proceso de fermentación microbiana que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno para dar lugar a una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono, conocida como "biogás", el cual es considerado un combustible amigable con el medio ambiente, ya que proviene de una fuente de energía renovable, con un alto potencial energético, capaz de sustituir los combustibles fósiles.

Por tanto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la producción de biogás, mediante el uso de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) generados en la ciudad de Barrancabermeja, donde actualmente se dispone de un vertedero (relleno sanitario Ecoparque de la empresa Rediba S.A.) localizado en los predios El Lago y Villa Mecedora de las veredas San Luis y el Zarzal sector Patio Bonito.

Para ello, se consideró el diseño de un biodigestor de mezcla completa con un volumen de $6.428,79 m^3$, con el propósito de transformar en promedio $195.701,53 kg$ de residuos sólidos generados diariamente en el Municipio, lo que conllevó a la generación diaria de biogás de $5.184,60 m^3$ con un potencial eléctrico anual de $4.410,46 MWh$. Lo anterior, basado en el desarrollo de un modelo matemático, programado en Matlab, de diferentes ecuaciones que relacionan variables como la temperatura, la presión y el volumen.

PALABRAS CLAVE. Digestión anaerobia, biodigestor, Residuos Sólidos Urbanos (RSU), biogás, Matlab.

INTRODUCCIÓN

La energía es uno de los pilares fundamentales del progreso humano. Actualmente, el papel del sistema energético constituye una de las prioridades en los diferentes ámbitos científico, político, económico y social.

El uso masivo de los combustibles fósiles genera una gran cantidad de gases en la atmosfera, que trae como consecuencia el cambio climático. Lo anterior genera una serie de desafíos, que exigen la búsqueda de soluciones amigables con el medio ambiente.

Hoy día es muy común consumir energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, las cuales se obtienen de fuentes limpias e inagotables. Su valor agregado radica en la reducción del impacto ambiental, ya que no originan emisiones contaminantes al ambiente, ni gases de efecto invernadero.

La digestión anaerobia es una tecnología que favorece el aprovechamiento energético de la materia orgánica, que convierte sustratos complejos en biogás por la acción de microorganismos, en ausencia de oxígeno. Dentro de los beneficios que sobresalen de esta tecnología limpia se destaca la recuperación de energía en forma de biogás, la producción de fertilizantes orgánicos y el control de emisiones de gases de efecto invernadero.

Por tanto, el desarrollo del presente trabajo tiene como propósito desarrollar un sistema de generación de energía eléctrica renovable a partir del uso de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) procedentes del relleno sanitario de la vereda Patio Bonito en la ciudad de Barrancabermeja.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural, son fuentes de energía no renovables, que se encuentran en la naturaleza en grandes cantidades, pero limitada a la vez. Para formarse requieren de un extenso periodo de tiempo y de condiciones específicas. Son la principal fuente de energía en todo el mundo por su alto poder calorífico en comparación con otras fuentes de energía como la eólica, solar, entre otras.

Los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial (Foster & Elzinga, 2020). La demanda de energía y de servicios conexos, con miras al desarrollo social y económico y a la mejora del bienestar y la salud de las personas, va en aumento. Todas las sociedades necesitan de servicios energéticos para cubrir las necesidades humanas básicas, como el alumbrado, cocina, ambientación, movilidad y comunicación, y para los procesos productivos. Sin embargo, el uso de esta fuente de energía no renovable ha dado lugar a altas emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, ocasionando el deterioro del medio ambiente.

La generación de energía renovable a partir de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), es una de las fuentes de energía con gran potencial ya que permite la producción de energía térmica como eléctrica, mediante plantas procesadoras de Residuos Sólidos (RS). En este propósito Noruega es un referente en gestión de residuos, donde la concientización social comienza desde los primeros años de vida, los niños realizan un aprendizaje mediante el juego y el contacto directo con la naturaleza. Funciona tan bien y tan eficientemente que el país importa basuras

de Inglaterra, generando así ingresos por recibir desechos que oscilan entre 30 y 40 dólares por tonelada.

En Latinoamérica se adelantan proyectos de generación de energía eléctrica a partir de la basura. Caso puntual, es el país de Perú, donde la empresa Petramás, líder en energías renovables en este país, cuenta con tres plantas procesadoras de residuos sólidos. Una de las plantas está ubicada en la ciudad de Huaycoloro, al este de Lima, cuya realización demandó una inversión total de US\$14 millones. Esta planta utiliza cerca de tres millones y medio de kilos diarios de basura que constituye alrededor del 35% de los residuos sólidos que genera toda la ciudad de Lima; así mismo, genera 60 MW/h aproximadamente. Desde sus primeros estudios contó con el apoyo del Banco Mundial y el aval de las Naciones Unidas (Noticias, 2011).

En la ciudad de Barrancabermeja, Santander, se presenta una problemática que no es inusual en otras partes del país, en la que los residuos sólidos urbanos van a parar a los rellenos sanitarios. Como consecuencia, ha causado que las fuentes hídricas y sus alrededores sean contaminados parcialmente. Por ello, la necesidad de implementar nuevas tecnologías que permitan el desarrollo de un sistema energético sostenible y amigable con el medio ambiente; además de garantizar una mejor calidad de vida a los habitantes de la ciudad de Barrancabermeja.

Dadas las condiciones que anteceden, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo brindar una solución a los residuos sólidos en la ciudad de Barrancabermeja, Santander?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Generalmente, los residuos y desechos sólidos urbanos simplemente se depositan en un lugar determinado sin ninguna clase de manejo. El presente proyecto de investigación, intenta dar una solución tecnológica para generar energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). En primer lugar, se realizará una investigación profunda de las distintas aplicaciones tecnológicas que se vienen implementando, sus características, principales beneficios ambientales, sociales y económicos que representa estos tipos de generación de energía, para establecer, por último, un sistema óptimo y de fácil manejo el cual será plasmado en una simulación.

Bajo la investigación de numerosos artículos, documentos, estudios, entre otros, se establecerá como este tipo de energía renovable va de la mano con el cuidado del medio ambiente, el avance tecnológico y, por tanto, el ámbito económico y social. Se determinará, así mismo, la cantidad de basuras que la ciudad genera y la cantidad de energía eléctrica que podría generarse si se implementa un sistema de generación de energía eléctrica a partir de RSU. Dicho sistema será diseñado mediante una investigación que, en consecuencia, brinde un modelo de planta específico para la ciudad. En último lugar, se elaborará una simulación con base en el modelo obtenido a través de la investigación. Se pretende consolidar y sistematizar la información existente para hacer un análisis reflexivo en torno al aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos urbanos, que sirva de insumo en la formulación de lineamientos y directrices para los entes reguladores.

Con el desarrollo de este proyecto de investigación se beneficiará la ciudad de Barrancabermeja, al presentar una alternativa de solución a los residuos sólidos que se vienen arrojando al relleno sanitario, los cuales contaminan gravemente las fuentes hídricas aledañas. Así mismo, se presenta una alternativa de generación

de energía eléctrica a partir de RSU para la ciudad de Barrancabermeja. Además, con la presente investigación se pretende presentar el Trabajo de grado con el cual podremos optar al título de Ingeniero Electromecánico de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS).

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. *Objetivo General*

Desarrollar un modelo de sistema de generación de energía eléctrica renovable a partir Residuos Sólidos Urbanos (RSU) basado en un biodigestor simulado mediante la herramienta de software Matlab/Simulink para el relleno sanitario de la vereda Patio Bonito en la ciudad de Barrancabermeja.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- Analizar información de los beneficios sociales, ambientales, energéticos y económicos que se generan al implementar energías renovables a partir de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) para generar y construir una base de nuevos conocimientos orientado a la ejecución de este tipo de proyectos en la ciudad de Barrancabermeja.
- Diseñar un sistema de generación de energía eléctrica renovable a partir de Residuos Sólidos Urbanos, basado en una investigación que establezca un modelo matemático en forma de algoritmo en Matlab para el biodigestor y el motor de combustión interna.
- Simular el modelo matemático de la planta del sistema de generación de energía eléctrica a partir de RSU mediante la herramienta de software

Matlab/Simulink para realizar el análisis de los distintos parámetros de rendimiento.

- Elaborar un informe ejecutivo donde se muestren los resultados obtenidos en las experiencias mediante las simulaciones, para generar una conclusión sobre la alternativa más viable de solución de las basuras del relleno sanitario Patio Bonito, con fines de lograr un acuerdo para la ejecución de una consultoría bajo las cláusulas reguladas por el código civil y de comercio.

1.4. ESTADO DEL ARTE

Los RSU hacen referencia principalmente a los materiales desechados por los domicilios, pero también incluye desechos comerciales e industriales de similar naturaleza, que son depositados en un vertedero municipal, que sin un manejo apropiado pueden llegar a ocasionar problemas de contaminación de aire, agua y suelo, así como de salud pública.

Fazenda& Tavares (2016) realizaron una caracterización de los residuos sólidos generados en la ciudad de Sumbe, Angona, en términos de los materiales que los componen, es decir, materia orgánica, plástico, papel, vidrio, metales, entre otros. El estudio realizado se fundamentó en el análisis, la interpretación y el tratamiento de los datos obtenidos a través de encuestas, entrevistas, observación y trabajo de campo. Lo anterior constituyó el soporte del plan de gestión de residuos sólidos para el desarrollo sustentable de la ciudad de Sumbe.

Feoli (2016) implementó el modelo de biodigestión anaerobia IWA ADM1, utilizando el lenguaje de programación Matlab/Simulink, para la simulación de un biodigestor anaerobio. El modelo se basó en el diseño e implementación de un esquema de control básico de pH. Los resultados mostraron que el sistema es

muy rígido ya que las constantes de tiempo pueden durar desde segundos hasta días. Es por ello que se sugiere para posibles estudios, buscar que el controlador sea muy robusto. Esta rigidez también causó problemas a la hora de simular, lo que conllevó a usar un método de simulación para sistemas rígidos ODE15S y del mismo modo tomar otras consideraciones para evitar encontrar una discontinuidad.

Escobar (2015) diseñó una planta de biogás para una vitivinícola, a fin de evaluar la factibilidad técnica y económica de producir biogás a partir del orujo de la uva. Para su diseño, utilizó una instalación industrial de biodigestión, con un dimensionamiento de un biodigestor de 369 m³ de volumen. La planta alcanzó una producción de 196.608 m³ de biogás al año y un potencial eléctrico de 134 kW. La energía anual generada correspondió a 487.816 kWh/año de energía eléctrica y 593.638 kWh/año de energía térmica. La energía eléctrica se utilizó para autoconsumo y la energía térmica se utilizó para mantener las condiciones del proceso. Concluyó que no es factible diseñar una planta de biogás que funcione a base de orujo en la vitivinícola, debido a que la producción de orujo solo se da en los meses de febrero a junio, correspondiente a un factor de planta de 42%, lo que hace que el proyecto de la planta de biogás no sea un proyecto rentable.

Mago, Flores & Tovar (2012) realizaron la modelación del sistema de control motor-generador, desarrollado para la generación de potencia eléctrica en zonas pecuarias de Venezuela. La simulación permitió evidenciar las características necesarias para suministrar energía eléctrica a partir de los desechos orgánicos del ganado vacuno procesados en digestores y convertidos luego, en biogás, lo cual apoya el desarrollo de energías alternativas. El modelo se fundamentó en el uso de las ecuaciones del motor de combustión interna en lenguaje Matlab/Simulink, acoplado a una máquina sincrónica. Lo anterior permitió la obtención de variables de tensión, corriente y potencia de la máquina sincrónica.

Cadavid & Bolaños (2015) estudiaron el potencial de producción de metano a partir del uso de residuos de frutas y verduras y de poda de una ciudad colombiana intermedia de Palmira, Colombia. La investigación llevo a se obtiene dos (2) veces mayor potencial bioquímico de metano al utilizar residuos frutas y verduras que residuos de poda, obteniéndose, $0,710 \text{ m}^3$ de CH_4/kg sólidos volátiles (SV). Además, se observó la remoción de SV para los residuos de frutas y verduras y de residuos de poda a los 60 días, 48% y 44%, respectivamente. Para los residuos de poda se encontró una remoción importante de celulosa, baja para la hemicelulosa y muy pobre para la lignina. Al someter los residuos de frutas y verduras y de poda a procesos de digestión anaerobia, en la ciudad de Palmira al año, sería posible producir 5.489 MWh de energía térmica o 3.295 MWh de energía eléctrica. Por tanto, los resultados muestran que la digestión anaerobia podría ser una alternativa viable y sostenible para el manejo y disposición de los residuos de frutas y verduras y los de poda, en los municipios colombianos, con la posibilidad adicional de producir energía renovable para cocinar, iluminación o como combustible para vehículos.

Ramírez, Paredes & Guerrero (2014) establecieron las condiciones mínimas para un escenario económico-financiero de operación sostenible de las Plantas de Manejo de Residuos Sólidos (PMRS) en municipios menores a 50.000 habitantes, mediante la combinación de herramientas de Dinámica de Sistemas y Análisis Estructural. Se seleccionaron y tomaron registros provenientes de 28 PMRS, reportadas en el estudio sectorial elaborado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios de Colombia. Como resultado, los autores identificaron la cantidad de material potencialmente aprovechable, los ingresos por tarifa de recepción de material y las cantidades de material recuperado para la venta. Para el escenario simulado se concluyó que, con el actual cobro de tarifas de recepción de residuos, el aumento de eficiencias de recuperación y comercialización de residuos, sería necesario la recepción de 302 t/mes para alcanzar una relación

beneficio/costo igual a 0. Sin embargo, dicho valor puede variar en función de las particularidades regionales y tecnologías implementadas de cada proyecto PMRS, lo cual hace necesario el desarrollo de estudios puntuales para el desarrollo de un proyecto en una localidad determinada.

Panesso, Cadena, Mora & Ordoñez (2011) realizaron un análisis del potencial de producción de una pequeña central generadora de energía eléctrica, que usa como combustible primario el biogás proveniente del vertedero de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) la Glorita en Pereira, Colombia. Para este fin se planteó la conversión de energía mediante una planta térmica de ciclo combinado. El estudio se fundamentó en el análisis de la composición promedio del biogás, aprovechando los residuos que constituyen en la actualidad uno de los más graves problemas de salud pública y saneamiento ambiental en Pereira, específicamente materiales orgánicos como estiércol, excrementos de aves de corral, la degradación de algunas plantas, entre otros.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Los residuos sólidos resultan de las diversas actividades que el hombre desarrolla; estos se pueden clasificar (Escobar *et al.*, 2015, p. 278):

- Respecto a su origen: pueden resultar de procedencia domiciliarios, de limpieza urbana, de establecimientos comerciales y prestadores de servicios, de los servicios públicos de saneamiento básico, industriales, de servicios de salud, de construcción civil, agroforestales, de servicio de transporte y residuos de minería.
- Respecto al grado de peligrosidad: los residuos generados pueden ser peligrosos y no peligrosos.

2.1.1.1 Características físicas, químicas y biológicas de los RSU

A continuación, se describen las características, físicas, químicas y biológicas que caracterizan a los RSU (Escobar *et al.*, 2015, p. 278):

Características físicas

- Peso específico aparente: es la relación entre el peso del residuo no compactado y el volumen ocupado por el mismo; sus unidades se expresan en (kg/m³).

- **Generación per cápita:** es la cantidad diaria de residuos generados por cada habitante, cuyo valor es importante para el dimensionamiento de los rellenos sanitarios o para las plantas de incineración; sus unidades se expresan en (kg/hab/día).
- **Composición gravimétrica:** relaciona la proporción de material dado respecto a la masa total de residuos. Este parámetro se expresa en porcentaje (%) y es fundamental para el conocimiento de la proporción de cada material para el correcto gerenciamiento de los RSU, recolección selectiva, o plantas de incineración, lugares para compostaje, etc.
- **Contenido de humedad:** muestra la cantidad de agua presente en la masa de RSU; se expresado en porcentaje (%).

Características químicas

- **Composición química:** es necesario conocer la composición de un residuo concreto para determinar sus características de recuperación energética. También es conveniente conocer la presencia y concentración de residuos tóxicos y peligrosos para evaluar el riesgo que su manejo, tratamiento, reprocesado y reutilización, puedan aportar a la salud humana y al medio ambiente. En los RSU se destaca la presencia de valores de carbono, nitrógeno, contenido de cenizas, potasio, calcio, fósforo, residuo mineral total, grasas y residuos minerales solubles.
- **Poder calorífico:** es la capacidad de desprendimiento de calor (energía) de la masa de los residuos sólidos al ser sometida a procesos de tratamientos térmicos como la gasificación o la pirolisis.

Características biológicas

Expresan la población microbiana existente en el medio. De acuerdo con el agente oxidante presente en éste, la materia orgánica es metabolizada por los microorganismos en el medio anaerobio (en ausencia de oxígeno y presencia de sulfatos y dióxido de carbono), anóxico (presencia de nitratos) o aerobio (presencia de oxígeno). El ambiente del relleno sanitario define las especies microbianas predominantes, de acuerdo con la afinidad y capacidad de sobrevivencia de las especies en el ambiente.

Existen microorganismos esenciales para la degradación de la parte orgánica en ambientes anaerobios como las archaeametanogénicas y demás bacterias fermentativas, así como aquellas que conducen al compostaje aerobio, como son algunas bacterias, hongos y actinomicetos. Los microorganismos patógenos son de especial interés en saneamiento (coliformes fecales), ya que deben ser eliminados durante los procesos biológicos de tratamiento, a fin de minimizar riesgos a la salud pública y al medio ambiente.

2.1.2. Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso de descomposición de la materia orgánica, llevada a cabo por un grupo de microorganismos en ausencia de oxígeno; como producto de la digestión se obtiene un gas combustible.

Este gas contiene una alta proporción de metano (CH₄), en concentraciones superiores al 60%, con una potencia calorífica inferior del orden de 5.500 Kcal/m³, el cual se designa usualmente como biogás (Campos & Flotats, 2005, p. 4). También se encuentran otros productos como dióxido de carbono (30-40%) y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno y otros gases (Feoli, 2016, p. 5).

Todo proceso de digestión anaerobia conlleva a una eliminación/depuración de la carga orgánica y la producción de este gas. Las instalaciones especialmente diseñadas para optimizar este proceso se designan como digestores de metano, plantas de biogás o simplemente reactores anaerobios.

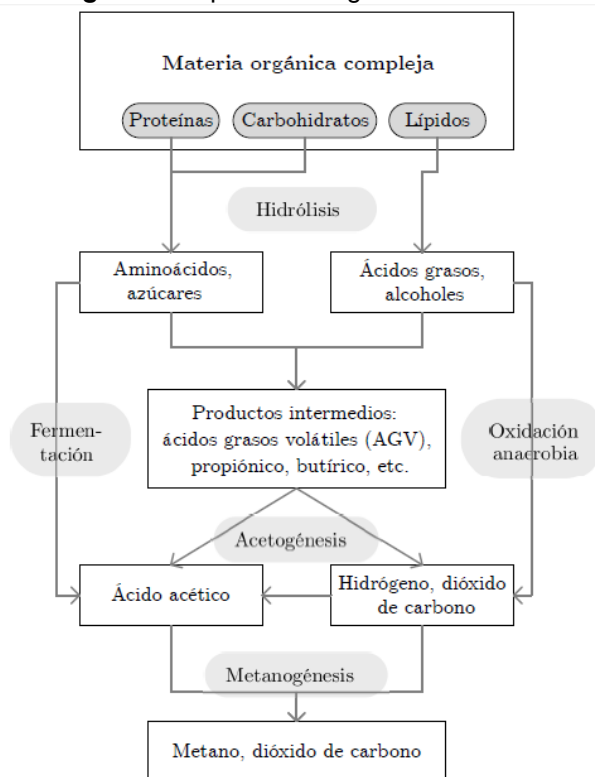
Mediante el proceso de digestión anaerobia puede tratarse un gran número de residuos:

- Residuos agrícolas y ganaderos
- Lodos de depuradoras biológicas
- Residuos industriales orgánicos
- Aguas residuales municipales e industriales
- Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos

2.1.2.1 Fases de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso de 4 pasos: hidrólisis, acidogénesis o fermentación, acetogénesis y metanogénesis. La Figura 1 muestra en términos generales los productos que se obtienen en cada fase.

Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia



Fuente: FeoliGrant, D. (2016). *Implementación del modelo dinámico de biodigestión anaerobia ADM1 utilizando MATLAB/Simulink*. Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

2.1.2.1.1 Hidrólisis

La primera fase en un proceso de digestión anaerobia es la hidrólisis. En esta fase se descomponen las cadenas largas de la materia orgánica en otras más cortas, obteniéndose productos intermedios. La materia orgánica es descompuesta por la acción de un grupo de bacterias hidrolíticas que hidrolizan las moléculas solubles en agua, tales como grasas, proteínas y carbohidratos y las transforman en polímeros más simples, a fin de que éstos sean asimilados por microorganismos fermentadores en la siguiente etapa.

La hidrólisis consiste en la reacción química con el agua en la que la molécula de agua se descompone en un ion de hidrógeno positivo (H+) y una molécula de hidróxido (OH-), de modo que se da una ruptura en los enlaces químicos del compuesto al que se le adiciona el agua y se forman nuevos compuestos con estos iones (Feoli, 2016, p. 5). La hidrólisis es realizada por distintas enzimas dependiendo de cada tipo de compuesto como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Hidrólisis de los principales compuestos orgánicos

Compuesto	Enzima encargada de la hidrólisis	Producto obtenido
Carbohidratos (azúcares)	Amilasas y gluco-amilasas	Glucosas
Proteínas	Proteasas	Proteosas, peptonas, péptidos y aminoácidos
Lípidos	Lipasas	Ácidos de cadena larga y moléculas de glicerol o galactasa

Fuente: FeoliGrant, D. (2016). *Implementación del modelo dinámico de biodigestión anaerobia ADM1 utilizando MATLAB/Simulink*. Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

Cabe también mencionar que el grado de hidrólisis alcanzado, así como la velocidad del proceso dependen de factores como el tamaño y tipo de partícula, la concentración de biomasa hidrolítica y otros factores ambientales como el pH y la temperatura.

2.1.2.1.2 Fermentación o acidogénesis

Las moléculas orgánicas solubles obtenidas en la etapa anterior siguen siendo degradados en la siguiente etapa, conocida como acidogénesis.

Esta fase es realizada por un grupo de bacterias acidogénicas, las cuales transforman la materia orgánica simple (azúcares, péptidos, aminoácidos, etc.) en productos como ácidos grasos volátiles o de cadena corta (AGV), alcoholes y metanol, ácido láctico, ácido fórmico, ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono (Feoli, 2016, p. 7). El ácido acético puede ser usado directamente como

un sustrato por bacterias metanogénicas, por ello éste es el mayor intermediario en la cadena alimenticia anaerobia.

2.1.2.1.3 Acetogénesis

En esta etapa se convierte los productos finales de la fermentación en acetato, mediante un grupo de bacterias llamadas acetogénicasintróficas. Son sintróficas puesto que producen hidrógeno, pero al mismo tiempo dependen de una baja presión parcial del mismo, por lo que interactúan con las bacterias metanogénicas al donarles el hidrógeno necesario. Estas bacterias producen acetato por medio de:

- Deshidrogenaciónacetogénica: mediante la fermentación de AGV, lactato, propionato y alcoholes.
- Hidrogenación acetogénica: a partir de hidrógeno y dióxido de carbono.

Las bacterias acetogénicas dependen de estas reacciones de transferencia de hidrógeno para producir el acetato. Es necesario que el hidrógeno generado sea utilizado y consumido a una velocidad igual o superior de la que es producido (Feoli, 2016, p. 8).

2.1.2.1.4 *Metanogénesis*

El último producto de la digestión anaerobia es el metano, que es un componente importante del biogás. Aproximadamente un 66% de este gas se forma a partir del acetato mediante microorganismos conocidos como archaeasmetanogénicasacetoclásticas, mientras que el restante 34% se forma a partir de la reducción de dióxido de carbono por medio de las archaeasmetanogénicashidrogenotróficas que consumen hidrógeno, dióxido de carbono y ácido fórmico. De nuevo, la presencia de consumidores de hidrógeno en esta etapa es esencial para mantener los niveles de hidrógeno adecuados en esta etapa y las anteriores.

Existen ciertos compuestos que actúan como inhibidores del crecimiento de los organismos metanogénicos anteriormente descritos. Principalmente se tienen compuestos como el nitrógeno amoniacal, los AGV, algunos cationes, entre otros. Además, esta etapa es estrictamente anaerobia por lo que la presencia de oxígeno inhibe el crecimiento de las archaeas (Feoli, 2016, p. 8). La Tabla 2 presenta un resumen de las etapas mencionadas.

Tabla 2.
Etapas involucradas en la digestión anaerobia

Etapas del proceso de degradación	Grupo bacteriano	Tipo de conversión
Hidrólisis	Bacterias hidrolíticas	Proteínas, lípidos y carbohidratos a moléculas solubles: péptidos, aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, alcoholes, etc.
Fermentación o acidogénesis	Bacterias acidogénicas	Aminoácidos a ácidos grasos, acetato y amoníaco Azúcares a productos intermedios de la fermentación
Acetogénesis	Bacterias acetogénicas	Ácidos grasos, AGV o alcoholes a hidrógeno y/o acetato
Metanogénesis	Archeas metanógenas acetoclásticas e hidrogenotróficas	Hidrógeno y dióxido de carbono a metano Acetato a metano y dióxido de carbono

Fuente: FeoliGrant, D. (2016). *Implementación del modelo dinámico de biodigestión anaerobia ADM1 utilizando MATLAB/Simulink*. Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

2.1.2.2 Parámetros operacionales importantes para el proceso de digestión anaerobia

Existen ciertos factores que pueden inhibir o afectar el proceso de la digestión anaerobia en términos de la tasa de crecimiento o degradación, producción del biogás. Entre ellos se encuentra:

2.1.2.2.1 pH y alcalinidad

Un pH adecuado permite el crecimiento óptimo de los microorganismos presentes en la digestión anaerobia. En cada fase del proceso, los microorganismos presentan máxima actividad en un rango de pH diferenciado: hidrolíticos entre 7,2 y 7,4, acetogénicos entre 7 y 7,2 y metanogénicos entre 6,5 y 7,5 (Campos & Flotats, 2005, p. 8).

2.1.2.2.2 Potencial redox

Debe ser suficientemente bajo para asegurar el desarrollo de poblaciones metanogénicas estrictas. Las bacterias metanogénicas requieren potenciales de oxidación/reducción inferiores a -300 mV (Campos & Flotats, 2005, p. 9).

2.1.2.2.3 Nutrientes

La degradabilidad del sustrato depende de la proporción de carbohidratos, lípidos y proteínas. El contenido de lípidos es especialmente importante, ya que la tasa de conversión a metano es mayor en comparación con las otras macromoléculas (Feoli, 2016, p. 11).

En el medio a digerir debe haber una relación adecuada de nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana. La relación Carbono/Nitrógeno debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 30/1. Valores muy inferiores disminuyen la velocidad de reacción y valores muy superiores crean problemas de inhibición. Para el fósforo la relación óptima es Carbono/Fósforo=150/1. Valores inferiores no crean problemas de inhibición (Campos & Flotats, 2005, p. 9).

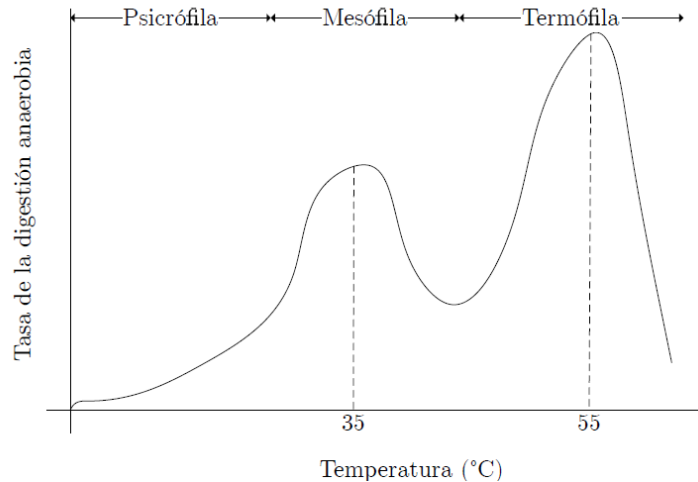
2.1.2.2.4 Temperatura

La temperatura determina la tasa del proceso de degradación anaerobia. En particular afecta las fases de hidrólisis y metanogénesis (Feoli, 2016, p. 10).

El proceso de digestión anaerobia puede realizarse a tres rangos diferentes de temperatura: psicrófilo: por debajo de 20°C; mesófilo, entre 30° y 40 °C; termófilo, entre 50° y 70°C (Campos & Flotats, 2005, p. 9).

En la Figura 2 se puede observar que ante una mayor temperatura, cercana a los 55°C, la tasa de producción de biogás es mayor que si el proceso se realiza a 35°C. Sin embargo, se debe considerar que una temperatura más alta conlleva a un gasto energético mayor.

Figura 2. Influencia de la temperatura en la etapa de la digestión anaerobia



Fuente: FeoliGrant, D. (2016). *Implementación del modelo dinámico de biodigestión anaerobia ADM1 utilizando MATLAB/Simulink*. Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

A pesar de que el proceso mesófilo tarda más, es el que se usa más frecuentemente, ya que presenta más estabilidad que el proceso termófilo (este último es más sensible a sustancias tóxicas y cambios en los parámetros operacionales del sistema. Por otro lado, los reactores en régimen termófilo necesitan un control de temperatura estricto para obtener una producción constante de metano, mientras que los de régimen mesófilo pueden operar en un rango más amplio (Feoli, 2016, p. 10).

2.1.2.2.5 Toxicidad e inhibición

Las formas no ionizadas de los ácidos grasos volátiles, así como el amoníaco libre o el ácido sulfhídrico son inhibidores de importancia de las bacterias metanogénicas. Estos compuestos presentan una inhibición de tipo reversible. La aclimatación de las poblaciones bacterianas juega un papel importante en el momento de definir concentraciones críticas, así como el efecto sinérgico o antagónico que la presencia de una sustancia puede tener sobre la actividad tóxica de otra (Campos & Flotats, 2005, p. 9).

2.1.2.2.6 Agitación/mezclado

Hay diferentes razones para mantener cierto grado de agitación en el medio en digestión, entre ellas se destaca:

- Mezclado del sustrato de alimentación con el sustrato en digestión.
- Distribución uniforme de calor para mantener una distribución uniforme de temperatura.
- Evitar la formación de espumas o de sedimentación.
- Favorecer la transferencia de gases, que pueden quedar atrapados en el sustrato en forma de burbujas.

La agitación puede ser mecánica o neumática (burbujeo de gas recirculado a la presión adecuada). En todo caso nunca ha de ser violenta, ya que podría destruir los flóculos o agregados de bacterias, necesarios para mantener un proceso estable (Campos & Flotats, 2005, p. 10).

2.1.3. Biodigestores

Los biodigestores también son conocidos como plantas productoras de biogás. Son contenedores o tanques herméticamente cerrados dentro del cual, en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno) se optimiza naturalmente el crecimiento y proliferación de un grupo de bacterias que descomponen la materia orgánica o sustrato.

Resultado de este proceso se obtiene un gas combustible o biogás que posee aproximadamente 66% de metano y 33% de dióxido de carbono, el cual puede ser utilizado y convertido en forma de energía para sustentar algún requerimiento como calefacción, generación de energía entre otros.

2.1.3.1 Tipo de biodigestores anaerobios

A continuación, se describe una clasificación de digestores anaerobios en función de su capacidad.

2.1.3.1.1 Digestor discontinuo

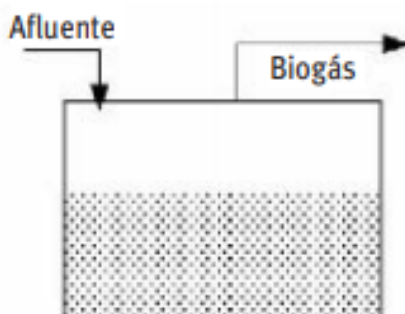
Es el más simple de los digestores. Consiste básicamente en un tanque de proceso, al que se le añade la mezcla de residuos con el propósito de producir biogás. Una vez se finaliza la reacción, se retira el efluente del tanque completamente para añadir materia prima nueva para realizar otra vez el procedimiento.

Este modelo es adecuado cuando existen limitaciones operativas como la falta de personal o cuando la materia orgánica no existe en forma continua. Su ventaja es que puede procesar gran variedad de sustratos que, aunque tengan tierra u otro inerte mezclado, no entorpecerán la operación del biodigestor, además estos sistemas no requieren de una atención diaria.

Su desventaja radica en que, su carga y descarga requieren de un considerable trabajo. Además, la ausencia de sistemas de agitación y mezclado disminuye la completa digestión anaerobia de los sustratos introducidos (Arrieta, 2016, p. 60).

En la Figura 3 se presenta una representación gráfica de un biodigestor discontinuo.

Figura 3. Biodigestor discontinuo



Fuente: Besel S.A. (2007). *Biomasa: digestores anaerobios*. Madrid, España: IDEA - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

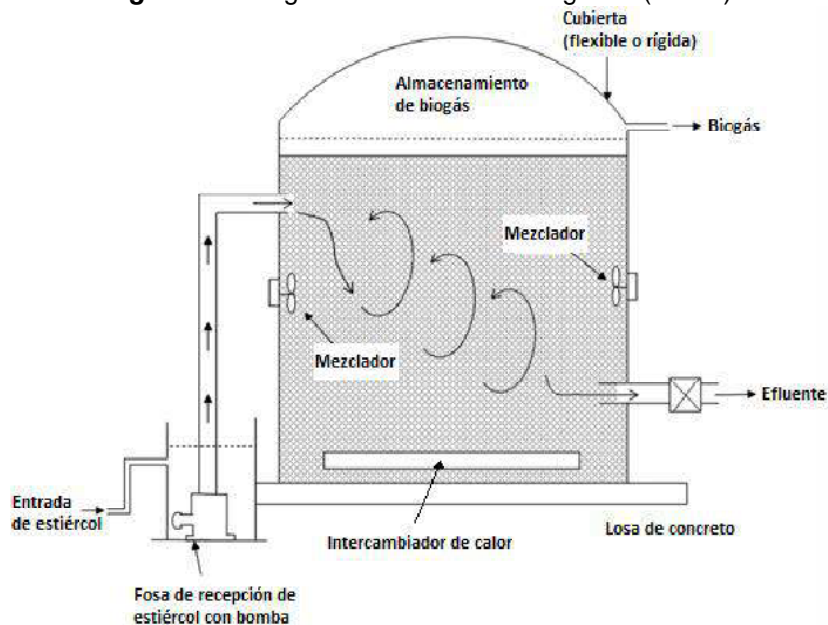
2.1.3.1.2 Digestor completamente mezclado

Conocidos como reactores de mezcla completa (RMC) o reactores de tanque continuamente agitado (CSTR por sus siglas en inglés), tienen un dispositivo para la mezcla del contenido del digestor. La mezcla se puede realizar de manera mecánica mediante hélice o palas de eje vertical u horizontal, o neumática mediante la recirculación de biogás a presión. El uso de agitadores tiene como objetivo mantener una distribución homogénea de la mezcla, lo que permite un adecuado contacto de la población bacteriana con ésta y evita problemas de decantación, que afectarían la capacidad de producción de biogás. Estos digestores trabajan en rangos de temperatura mesofílico y termofílico.

En la Figura 4 se presenta un esquema de un digestor continuamente agitado (CSTR) típico. Estos digestores son operados con contenido en sólidos de 5-14%, con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 10 a 30 días. Pueden ser alimentados continua o intermitentemente. Debido al intenso mezclado y al control de la temperatura que tienen estos digestores, la digestión anaeróbica ocurre mucho más rápido en comparación con los digestores discontinuos. Su principal desventaja radica en la baja velocidad de carga con la que pueden operar, su alto costo y complejidad en su construcción y mantenimiento, sobre todo de su sistema

de mezclado; sin embargo, tienen un elevado rendimiento de metano (Arrieta, 2016, p. 61).

Figura 4. Biodigestor continuamente agitado (CSTR)

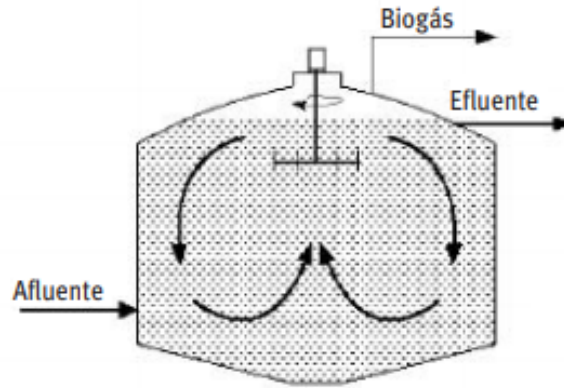


Fuente: Besel S.A. (2007). *Biomasa: digestores anaerobios*. Madrid, España: IDEA - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

Los reactores de mezcla completa (RMC) son de dos clases: sin recirculación y con recirculación.

Los RMC sin recirculación consiste en un reactor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de substrato como de microorganismos (ver Figura 5). Esta tipología de reactor no ofrece problemas de diseño y es el más utilizado para residuos. Comparativamente a otros reactores, el tiempo de retención necesario es alto, debido a que la concentración de cualquier especie, que se mantiene en el reactor en régimen estacionario, es la misma que la que se pretende en el efluente. Si la velocidad de reacción depende de la concentración, como es el caso de los procesos biológicos, la velocidad será baja, y la forma de compensarla es aumentando el tiempo de reacción (Besel, 2007, p. 25).

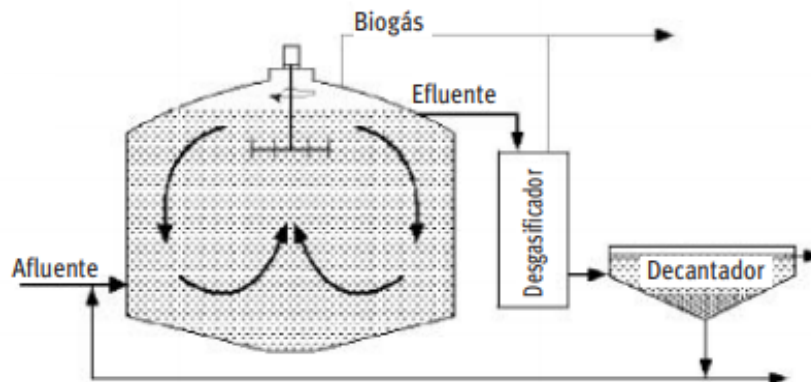
Figura 5. Biodigestor de mezcla completa sin recirculación



Fuente: Besel S.A. (2007). *Biomasa: digestores anaerobios*. Madrid, España: IDEA - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

Los RMC con recirculación son digestores que aumentan el tiempo de retención de los microorganismos, mediante su separación en un decantador para su posterior recirculación. Para que sea posible una adecuada decantación, se debe disponer antes de un desgasificador (ver Figura 6).

Figura 6. Biodigestor de mezcla completa con recirculación o de contacto anaerobio

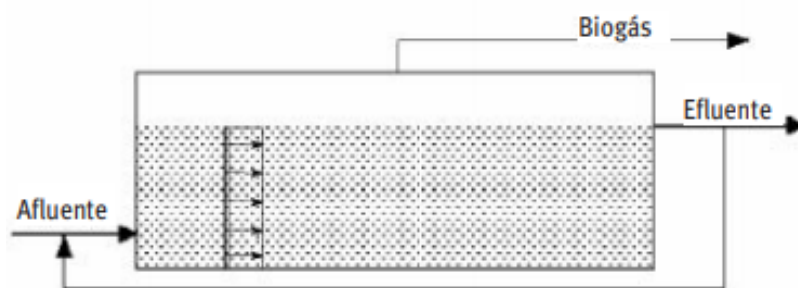


Fuente: Besel S.A. (2007). *Biomasa: digestores anaerobios*. Madrid, España: IDEA - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

2.1.3.1.3 Digestor flujo pistón

Este tipo de reactor es el más sencillo de todas las tecnologías de digestión anaerobias, por lo que su costo de construcción y operación es notablemente menor. Tienen una geometría alargada donde la mezcla circula en “flujo pistón o tapón” (ver Figura 7).

Figura 7. Biodigestor de flujo pistón



Fuente: Besel S.A. (2007). *Biomasa: digestores anaerobios*. Madrid, España: IDEA - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

La materia a digerir entra por un lado del reactor y sale por el otro después de transcurrido el tiempo de retención, completándose el proceso a medida que se avanza por el sistema, con el consiguiente arrastre de bacterias, lo que repercute en una menor eficiencia respecto a digestores con retención de biomasa (Arrieta,

2016, p. 67). Existen digestores en disposición vertical u horizontal, siendo esta última la más utilizada.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Biodigestor. Es un contenedor cerrado, hermético e impermeable llamado reactor, al que se le deposita materia orgánica que, mediante la fermentación anaeróbica de los microorganismos es degradada, obteniendo como producto gas metano o biogás, con trazas de otros gases.

Biogás. Es una de las fuentes alternativas más utilizadas para la producción de energía renovable. Es el resultado de la descomposición, en la ausencia de oxígeno, de varias sustancias orgánicas por una gran cantidad de bacterias.

Combustibles fósiles. El combustible fósil es un recurso energético no renovable que se genera a partir de la descomposición de materia orgánica proveniente de restos animales y vegetales. Al combinarse con el oxígeno, la materia orgánica produce energía. Se llama combustibles fósiles a los hidrocarburos (petróleo y gas) y al carbón.

Digestión anaerobia. También denominada biometanización o producción de biogás. Es un proceso biológico, que tiene lugar en ausencia de oxígeno, en el cual parte de la materia orgánica de las deyecciones se transforma, por la acción de microorganismos, en una mezcla de gases (biogás), constituido principalmente por metano y dióxido de carbono.

Energía no renovable. Son aquellas fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas, las cuales, una vez consumidas en su

totalidad, no pueden sustituirse, ya que no existe sistema de producción o de extracción económicamente viable.

Energía renovable. Son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero, causantes del cambio climático, ni emisiones contaminantes.

Generación de energía eléctrica. Consiste en transformar alguna clase de energía (química, cinética, térmica, lumínica, nuclear, solar, entre otras), en energía eléctrica. La generación de energía eléctrica se realiza, básicamente, mediante un generador eléctrico.

Materia orgánica. Es materia elaborada de compuestos orgánicos que provienen de los restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos, tales como plantas, animales y sus productos de residuo en el ambiente natural. La materia orgánica está formada por materia inerte y energía.

Matlab. Es lenguaje del cálculo técnico, es un entorno de programación para el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, visualización y cálculo numérico, desarrollado por MathWorks.

Metano. El metano es el hidrocarburo más simple, su molécula está formada por un átomo de carbono (C), al que se encuentran unidos cuatro átomos de hidrógeno (H). Tiene aplicación en la industria química como materia prima para la elaboración de múltiples productos sintéticos.

Potencial eléctrico. Se conoce como potencial eléctrico al trabajo que un campo electrostático tiene que llevar a cabo para movilizar una carga positiva unitaria de un punto hacia otro.

Relleno sanitario. Es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final.

Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Son aquellos residuos, basura, desperdicio o desechos que se generan en los núcleos urbanos o en sus zonas de influencia. Este tipo de residuos provienen generalmente de actividades domésticas, servicios públicos, hoteles, colegios, oficinas, cárceles, construcciones y establecimientos comerciales, así como de residuos industriales que no se deriven de sus procesos. Los residuos sólidos urbanos se componen de residuos orgánicos (alimentos, excedentes de comida), cartón, papel, madera y en general materiales inorgánicos como vidrio, plástico y metales.

2.3. MARCO LEGAL

2.3.1. Norma Constitucional

La Constitución Política de Colombia de 1991 elevó a norma constitucional la consideración, manejo y conservación de los recursos naturales y el medio ambiente, a través de los siguientes principios fundamentales:

- *Derecho a un ambiente sano.* En su Artículo 79, la Constitución Nacional consagra que: “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La Ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y

fomentar la educación para el logro de estos fines” (Const., 1991, art. 79). Esta norma constitucional puede interpretarse de manera solidaria con el principio fundamental del derecho a la vida, ya que éste sólo se podría garantizar bajo condiciones en las cuales la vida pueda disfrutarse con calidad.

- *El medio ambiente como patrimonio común.* La Constitución Nacional incorpora este principio al imponer al Estado y a las personas la obligación de proteger las riquezas culturales y naturales (Const., 1991, art. 8), así como el deber de las personas y del ciudadano de proteger los recursos naturales y de velar por la conservación del ambiente (Const., 1991, art. 95). En desarrollo de este principio, consagra que: “la propiedad es una función social que implica obligaciones y, como tal, le es inherente una función ecológica” (Const., 1991, art. 58); continúa su desarrollo al determinar que: “Los bienes de uso público, los parques naturales, las tierras comunales de grupos étnicos, las tierras de resguardo, el patrimonio arqueológico de la Nación y los demás bienes que determine la Ley, son inalienables, imprescriptibles e inembargables” (Const., 1991, art. 63).
- *Desarrollo Sostenible.* Definido como el desarrollo que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades, la Constitución Nacional en desarrollo de este principio, consagró que: “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en zonas fronterizas” (Const., 1991, art. 80). Lo anterior implica asegurar que la satisfacción de las necesidades actuales se realice de una manera tal que no comprometa la capacidad y el derecho de las futuras generaciones para satisfacer las propias.

2.3.2. Ley N° 1844 de 2017 “Por medio de la cual se Aprueba el Acuerdo de París, Adoptado en 12 de diciembre de 2015 en París - Francia”

El presente Acuerdo, al mejorar la aplicación de la Convención, incluido el logro de su objeto, tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza, y para ello:

- Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.
- Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos.
- Situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

2.3.3. Ley N° 1931 de 2018 “Por la cual se Establecen Directrices para la Gestión del Cambio Climático”

La presente ley tiene por objeto establecer las directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones de las personas públicas y privadas, la concurrencia de la Nación, Departamento, Municipios, Distrito, Áreas Metropolitanas y Autoridades Ambientales principalmente en las acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases de efecto invernadero, con el objeto de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismo y promover la transición hacia una economía competitiva sustentable y un desarrollo bajo en carbono.

2.3.4. Acuerdo de París

Es un tratado internacional que fue adoptado por todos los países durante la conferencia conocida como "COP21", la 21ª Conferencia de las Partes de la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Este Acuerdo establece las obligaciones para todos los países de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, generadores del cambio climático. Este tratado reemplaza al antiguo Protocolo de Kioto. En el Acuerdo de París, cada país asumió un compromiso propio de reducción de emisiones y de adaptación al cambio climático. Colombia se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% en el año 2030, respecto de la trayectoria proyectada para ese año, y a avanzar en su plan de adaptación a los impactos del cambio climático.

Con el Acuerdo de París, Colombia, como todos los demás países, se comprometió a que cada cinco años estas metas serán revisadas para hacerlas

más ambiciosas, hasta lograr el objetivo establecido por el tratado: lograr mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 °C, y para ello, alcanzar un balance entre los gases que se emiten a la atmósfera y los que son removidos a través de sumideros como los bosques, los suelos, y los océanos.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION

Para la realización de este trabajo, se realizó una investigación sobre los beneficios sociales, ambientales, económicos y energéticos que se generan al implementar energías renovables a partir de RSU. El estudio se enfocó principalmente en el Municipio de Barrancabermeja, donde se pretende realizar el modelamiento del sistema para la generación de energía eléctrica, empleando Matlab/Simulink.

Esta metodología implicó la implementación de una investigación descriptiva que consistió en obtener datos que abarcan métodos algebraicos, diagramas de flujo, entre otros.

Adicionalmente, se empleó un tipo de investigación explicativa en el que se detalla el modelo de un sistema de producción de energía eléctrica a partir de RSU a implementar en el Municipio de Barrancabermeja, a fin de dar soluciones amigables con el medio ambiente.

Finalmente, la metodología implementada conllevó a enfoque cuantitativo que reúne una serie de parámetros establecidos durante todo el proceso de desarrollo del trabajo, el cual va dirigido a evaluar teorías o antecedentes; de igual forma se observan escenarios de estudio, donde los integrantes comprenden el desarrollo y el objeto del proyecto.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

Para alcanzar los objetivos planteados, se utilizó la siguiente metodología.

4.1. ANÁLISIS AMBIENTAL, ENERGÉTICO, SOCIAL Y ECONÓMICO AL IMPLEMENTAR PROCESOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

La primera etapa del proceso metodológico se fundamentó en realizar una revisión bibliográfica de aspectos ambientales, energéticos, sociales y económicos al implementar procesos de digestión anaerobia a partir del uso de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

La valorización de los residuos o su transformación en energía útil, es hoy día una excelente opción de aprovechamiento de una fuente de energía renovable.

La digestión anaerobia es una tecnología que permite obtener una valoración energética de los RSU. Esta tecnología es básicamente un método de tratamiento de los residuos (descomposición de la materia orgánica mediante microorganismos), que tiene como propósito recuperar energía de sus componentes para dar lugar a una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono, conocido como biogás, que comúnmente es utilizado para generar energía eléctrica, además de generar un residuo sólido-líquido llamado digestato o efluente estabilizado rico en nutrientes (también denominado como biol), que puede ser empleado como fertilizante orgánico.

El biogás también es utilizado en otras aplicaciones como calefacción, generación combinada de calor y electricidad, combustible de motores para generadores acoplados a generadores eléctricos o en celdas de combustión, entre otros.

El biogás es una fuente renovable de energía, ya que se produce a partir de biomasa (materia orgánica), lo que significa que puede sustituir a los combustibles fósiles como el petróleo, crudo, gas natural, carbón, entre otros.

Por otra parte, la utilización de biogás permite la reducción de emisión de gases de efecto invernadero. Por un lado, se reduce las emisiones incontrolables de gases como el metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), y por otro lado se reduce las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) al sustituir el uso de los combustibles fósiles por éste. De manera que el uso de esta tecnología es muy favorable, ya que posibilita la mitigación del cambio climático a la vez que aumenta el suministro de energía renovable. Otro de los beneficios ambientales está relacionado con el uso de la masa restante biodegradada por las bacterias, digestato, el cual puede usarse como abono para la fertilización de suelos; éste puede reemplazar los fertilizantes sintéticos. Por tanto, la digestión anaerobia es una tecnología que posibilita tanto la prevención de la contaminación ambiental como la producción de energía renovable.

Cabe resaltar que, si un digestor opera de forma incorrecta, posibilita la acción de fuga de biogás al ambiente y fuga de digestato hacia los cuerpos de agua; lo que potencializa un riesgo ambiental por calentamiento global y por afectación de los ecosistemas acuíferos. Por tanto, se debe garantizar una correcta operación de esta tecnología.

El diseño y la construcción de reactores anaerobios es algo simple, lo que significa que requiere bajos costos de inversión. Además, el simple hecho de que este proceso no necesite inyección de aire, ya que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, hace que la digestión anaerobia resulte mucho más favorable económicamente.

Finalmente, la digestión anaerobia es una tecnología promisoría en zonas rurales, ya que contribuye al desarrollo sostenible en las zonas más alejadas y abandonadas por el gobierno. La utilización de biodigestores en poblaciones de escasos recursos es una alternativa prometedora, ya que ayuda a mejorar la calidad de vida de los habitantes, a la vez que contribuye a mitigar la contaminación del aire y del agua, y al mejoramiento de la salud.

4.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RSU

4.2.1. Estudio de la Biomasa Residual para la Producción de Biogás

Este trabajo pretende utilizar los residuos sólidos generados en la ciudad de Barrancabermeja, que actualmente dispone de un vertedero (relleno sanitario Ecoparque de la empresa Rediba S.A.), localizado en los predios El Lago y Villa Mecedora de las veredas San Luis y el Zarzal sector Patio Bonito del municipio de Barrancabermeja.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la caracterización de los principales residuos generados en el área urbana de Barrancabermeja, datos documentados en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos “PGIRS” 2015 - 2017 en el Municipio de Barrancabermeja.

Tabla 3.

Caracterización de los residuos generados en el Municipio de Barrancabermeja

Material	Caracterización (%)
Archivo	4,95%
Cartón	9,20%
Vidrio	7,90%
Plásticos	14,30%
Chatarra ferrosa	3,00%
Chatarra no ferrosa	0,00%
Aluminio	2,10%
Cobre	0,90%
Residuos de construcción y demolición	0,05%

Tabla 3.
Continuación

Material	Caracterización (%)
Otros (cuero, cenizas, rocas, escombros, huesos)	7,30%
Residuos de comida y alimentos	40,14%
Residuos de poda de árboles y corte de césped	3,57%
Madera	0,89%
Textiles	5,80%

Fuente: Alcaldía Municipal de Barrancabermeja (2017). *Primera actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos "PGIRS" 2015-2027 en el municipio de Barrancabermeja*. Alcaldía de Barrancabermeja.

Para el año 2017, Barrancabermeja generó 5.591 Ton/mes de residuos sólidos por la actividad de servicio público de aseo de los cuales, 490 Ton/mes corresponde a la actividad de barrido y limpieza de áreas públicas urbana, 4.339 Ton/mes son generadas en la fuente dispuestas en el relleno sanitario y 762 Ton/mes son aprovechadas por los centros de acopio y bodegas de reciclaje del municipio de Barrancabermeja.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar que la mayor cantidad de residuos sólidos generados en el municipio de Barrancabermeja son los residuos orgánicos que corresponden al 40,14%.

A continuación, se describen las ecuaciones empleadas para determinar la cantidad y el volumen de residuos sólidos generados en el municipio de Barrancabermeja.

4.2.1.1 Cantidad de residuos sólidos generados

Para obtener la cantidad de desechos sólidos diarios se utilizó la ecuación 1 (Siles, 2012, p.41).

$$\text{Cantidad de desechos sólidos diarios} = P_n * PPC \rightarrow [kg] \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

P_n = Población del año a calcular

PPC = Generación per cápita de RSU expresada en $[kg/hab/día]$ del año a calcular.

Para obtener la cantidad de desechos sólidos durante los 365 días del año se utilizó la ecuación 2 (Siles, 2012, p.42).

$$\begin{aligned} & \text{Cantidad de desechos sólidos año} \\ & = \text{Cantidad de desechos sólidos diarios} * 365 \rightarrow [Kg] \end{aligned} \quad \text{Ec. 2}$$

Para obtener la cantidad de desechos sólidos que se acumulan año tras año se utilizó la ecuación 3 (Siles, 2012, p.42).

$$\begin{aligned} & \text{Cantidad de desechos sólidos acumulados} \\ & = \text{Cantidad de desechos sólidos año} \\ & + \text{cantidad de desechos sólidos acumulados del año inmediatamente ante} \\ & \rightarrow [kg] \end{aligned} \quad \text{Ec. 3}$$

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la proyección de la población en el municipio de Barrancabermeja.

Tabla 4.
Proyección población año 2023 Municipio de Barrancabermeja

Año	Habitantes	Per-cápita $[kg/hab/día]$
2017	213.829	0,68
2018	214.719	0,71
2019	217.740	0,74
2020	239.144	0,77
2021	251.087	0,80
2022	254.265	0,83
2023	257.360	0,86

Fuente: Alcaldía Municipal de Barrancabermeja (2017). *Primera actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos "PGIRS" 2015-2027 en el municipio de Barrancabermeja*. Alcaldía de Barrancabermeja.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la cantidad de los residuos sólidos generados por día, anual y acumulado desde el año 2017 hasta el año 2023 en el Municipio de Barrancabermeja.

Se estimó que la cantidad de desechos sólidos acumulados de los residuos durante la vida útil del proyecto, comprendido éste a partir del año 2019 hasta el año 2023, es de 357.155.284,95 *kg*. En promedio se genera diariamente 195.701,53 *kg* de residuos sólidos.

Tabla 5.

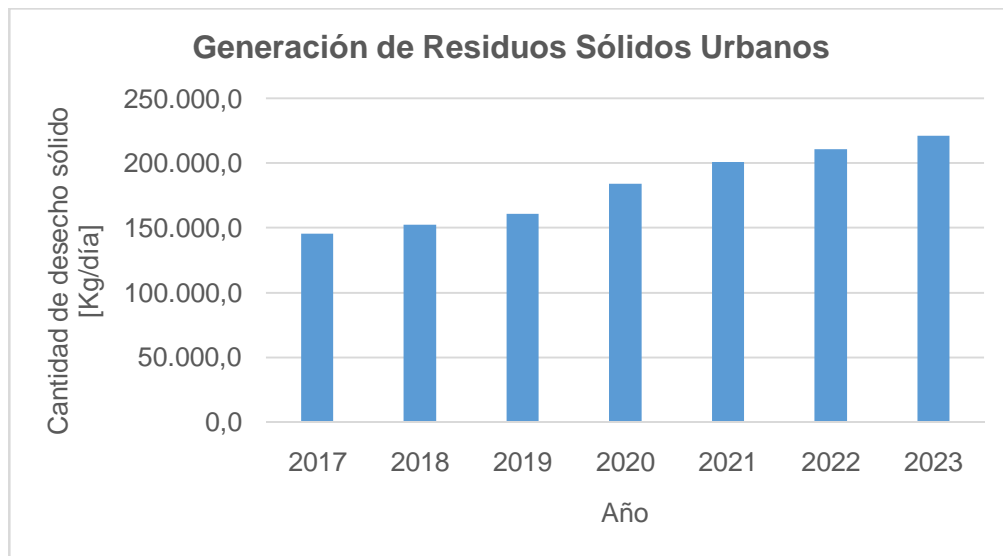
Cantidad de residuos sólidos generados en el Municipio de Barrancabermeja

Año	Cantidad de desechos sólidos		
	Diaria [kg/día]	Anual [kg/año]	Acumulada [kg]
2017	145.403,72	53.072.357,80	-
2018	152.450,49	55.644.428,85	-
2019	161.127,60	58.811.574,00	58.811.574,00
2020	184.140,88	67.211.421,20	126.022.995,20
2021	200.869,60	73.317.404,00	199.340.399,20
2022	211.039,95	77.029.581,75	276.369.980,95
2023	221.329,60	80.785.304,00	357.155.284,95

Nota: Tabla elaborada por el autor a partir de análisis sobre información relacionada la Alcaldía Municipal de Barrancabermeja (2017). *Primera actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos "PGIRS" 2015-2017 en el municipio de Barrancabermeja*. Alcaldía de Barrancabermeja.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se evidencia que la cantidad de residuos sólidos generados por día aumenta con el tiempo. Por ello, la necesidad de implementar tecnologías que favorezcan el aprovechamiento de los residuos.

Figura 8. Generación de RSU por día entre los años 2017 a 2023 en el Municipio de Barrancabermeja



Fuente: Elaborada por el autor a partir de análisis sobre información relacionada la Alcaldía Municipal de Barrancabermeja (2017). *Primera actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos "PGIRS" 2015-2017 en el municipio de Barrancabermeja. Alcaldía de Barrancabermeja.*

4.2.1.2 Volumen de residuos sólidos generados

Para calcular el volumen de los residuos sólidos compactos diarios se utilizó la ecuación 4 (Siles, 2012, p.47).

$$\begin{aligned} & \text{Volumen de residuos sólidos compactos diarios} \\ & = \text{Cantidad de desechos sólidos diarios} / D_{CR} \rightarrow [m^3] \end{aligned} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

D_{CR} = Densidad de compactación de los residuos sólidos, equivalente a $400kg/m^3$

Para calcular el volumen de los residuos sólidos compactos anual se utilizó la ecuación 5 (Siles, 2012, p.47).

$$\begin{aligned} & \text{Volumen de residuos sólidos compactos anual} \\ & = \text{Volumen de residuos sólidos compactos diarios} * 365 \\ & \rightarrow [m^3] \end{aligned} \quad \text{Ec. 5}$$

Adicionalmente es importante considerar que una vez los residuos sólidos compactos son depositados en los rellenos sanitarios, estos sufren un proceso de estabilización en el que ocurre la degradación, putrefacción y desintegración de los residuos. Por tanto, se requiere calcular el volumen de los residuos sólidos estabilizados por año mediante la ecuación 6 (Siles, 2012, p.48).

$$\begin{aligned} & \text{Volumen de residuos sólidos estabilizados anual} \\ & = \text{Volumen de residuos sólidos compactos anual} / D_{ER} * 365 \\ & \rightarrow [m^3] \end{aligned} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

D_{ER} = Densidad de estabilización de los residuos sólidos, equivalente a $500\text{kg}/\text{m}^3$

Posteriormente se calculó el volumen total de los residuos sólidos por año mediante la ecuación 7 (Siles, 2012, p.48).

Volumen total de los residuos sólidos por año

$$= \text{Volumen de residuos sólidos estabilizados anual} \rightarrow [\text{m}^3] \quad \text{Ec. 7}$$

Por último, se realizó la sumatoria del volumen total anual de los residuos acumulados desde el año 2019 al año 2023 (ver ecuación 8).

Volumen acumulado de los residuos sólidos

$$= \sum_1^n \text{Volumen total de los residuos sólidos por año} \rightarrow [\text{m}^3] \quad \text{Ec. 8}$$

Donde n equivale a los años 2019, 2020, 2021, 2022 y 2023.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el volumen de los residuos sólidos generados compactos y estabilizados por año en el área urbana de Barrancabermeja. Se calculó el volumen acumulado de los residuos sólidos ($651.808,40 \text{ m}^3$), considerando una vida útil del proyecto de cinco (5) años, comprendidos a partir del año 2019 hasta el año 2023. Este valor permitió estimar un volumen promedio diario de ($357,15 \text{ m}^3$) de residuos sólidos generados.

Tabla 6.

Volumen de los residuos sólidos generados en el Municipio de Barrancabermeja periodo 2017 a 2023

Año	Volumen de desechos sólidos			Volumen total de residuos sólidos Anual [m ³]	Volumen acumulado de residuos sólidos Acumulado [m ³]
	Residuos sólidos compactos		Residuos sólidos estabilizados		
	Diaria [m ³]	Anual [m ³]	Anual [m ³]		
2017	363,51	132.680,89	96.857,05	96.857,05	-
2018	381,13	139.111,07	101.551,08	101.551,08	-
2019	402,82	147.028,94	107.331,12	107.331,12	107.331,12
2020	460,35	168.028,55	122.660,84	122.660,84	229.991,97
2021	502,17	183.293,51	133.804,26	133.804,26	363.796,23
2022	527,60	192.573,95	140.578,99	140.578,99	504.375,22
2023	553,32	201.963,26	147.433,18	147.433,18	651.808,40

Nota: Tabla elaborada por el autor a partir de análisis sobre información relacionada la Alcaldía Municipal de Barrancabermeja (2017). *Primera actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos "PGIRS" 2015-2017 en el municipio de Barrancabermeja. Alcaldía de Barrancabermeja.*

4.2.2. Diseño del Biodigestor

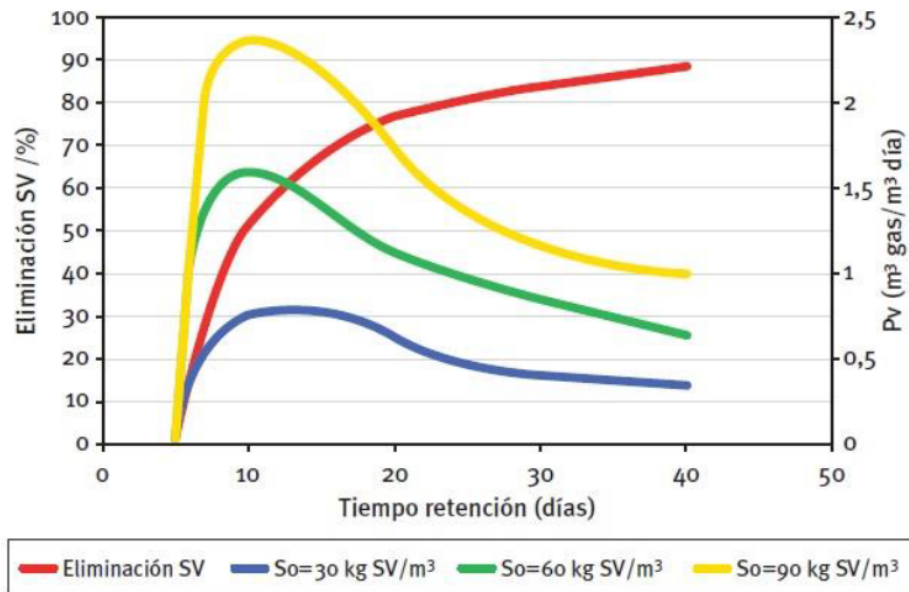
Para el diseño de la planta de biogás, se consideró la instalación de un biodigestor de mezcla completa (RMC) sin recirculación, siendo este el más utilizado en el tratamiento de los RSU. Este tipo de reactores funcionan de manera continua con entrada de fracción orgánica y salida de digestato; tienen capacidad para volúmenes más allá de los 3.000 m³ (Grass, 2013, p. 42). Dentro de sus ventajas se destaca que es una tecnología versátil y relativamente sencilla que tienen un elevado rendimiento de metano.

4.2.2.1 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

Se define como el cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, es decir, es el tiempo promedio en que el sustrato permanece en el reactor, mediante la acción de los microorganismos. Para este diseño se utilizó un TRH de 15 días,

dado que en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se evidencia que los índices de eliminación de materia orgánica expresados en sólidos volátiles (SV) y en función de la producción de gas por unidad de volumen en relación con el TRH se da para la curva de 30 kg SV/m^3 con una eliminación entre el 70 y 60% de los sólidos (ver curva color azul - sección plana de la curva) (Escobar Morales, 2015, p.12).

Figura 9. Eliminación de sólidos volátiles (SV) y producción volumétrica de gas en un digester anaerobio, en función del TRH



Fuente: Escobar Morales, D. A. (2015). Diseño y factibilidad de una planta de biogás en una vitivinícola. Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile.

4.2.2.2 Cálculo del volumen del biodigestor

Para calcular el volumen del biodigestor se utilizó la ecuación 9 (Escobar Morales, 2015, p.32).

$$V_B = C * TRH * 1,2 \rightarrow [m^3]$$

Ec. 9

Donde:

V_B = Volumen del biodigestor en m^3 .

C = Carga diaria para alimentar el digestor en $m^3/día$. En promedio se estima que se genera $357,15 m^3/día$ de residuos sólidos durante los 5 años de vida útil del proyecto.

TRH = Tiempo de retención hidráulico en días, 15 días.

Para el diseño del digestor, es necesario tener en cuenta el volumen de almacenamiento de los gases generados, por ello se estableció un 20% de volumen adicional; por ello en la ecuación 9 se tiene una expresión de 1,2.

Reemplazando en la ecuación 9 se obtiene:

$$V_B = 357,15 m^3/día * 15 días * 1,2$$

$$V_B = 6.428,79 m^3$$

Para el diseño de la planta de biogás, el volumen estimado del biodigestor es de $6.428,79 m^3$.

4.2.2.3 Cálculo de las dimensiones del biodigestor

El biodigestor es un tanque de forma cilíndrica vertical, por lo que se aproximó su volumen al de un cilindro recto. Para calcular la altura del biodigestor se utilizó la ecuación 10.

$$V_B = \pi * r^2 * h \rightarrow [m^3] \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

V_B = Volumen del biodigestor en m^3 , $6.428,79 m^3$.

r = Radio del biodigestor en m . Existe una relación óptima entre el diámetro (D) y la longitud (L); esta expresión define que $5 \leq \frac{L}{D} \leq 10$, donde el óptimo es 7 (Rodríguez & García, 2017, p. 46). Cabe precisar que la longitud está relacionada con la altura (h) del biodigestor y que el diámetro del biodigestor es dos (2) veces el radio (r). Para este diseño, se estimó un radio de $5,2 m$ para una relación de $\frac{L}{D} = 7,2$, siendo éste valor muy cercano al óptimo (7).

h = Altura del biodigestor en m .

Despejando la altura (h) de la ecuación 10 se obtiene:

$$h = \frac{6.428,79 m^3}{3,1416 * 27,04 m^2}$$

$$h = 75,68 m$$

El diseño del biodigestor está asociado con una altura de $75,68 m$ y un radio de $5,2 m$.

4.2.3. Producción de Biogás

Para calcular la cantidad de biogás que se genera en el biodigestor se utilizó la ecuación 11 (Escobar Morales, 2015, p.34).

$$Q_{Biogás} = RSU_{Día} * MO_{RSU} * P_{Biogás} \rightarrow [m^3/día] \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$Q_{Biogás}$ = Producción de biogás en $m^3/día$.

$RSU_{Día}$ = Cantidad de residuos sólidos generados en un día. En promedio se genera diariamente en el municipio de Barrancabermeja $195.701,53 kg$ de residuos sólidos.

$M_{O_{RSU}}$ = Porcentaje de materia orgánica de los residuos sólidos. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa que la mayor cantidad de residuos sólidos generados en el municipio de Barrancabermeja son los residuos orgánicos que corresponden al 40,14% (Alcaldía Municipal de Barrancabermeja, 2017).

$P_{Biogás}$ = Potencial de biogás. El factor de generación de biogás para los RSU es de $66 \text{ m}^3/\text{t}$ (Velásquez, 2018, p. 47), equivalentes a $0,066 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Reemplazando en la ecuación 11 se obtiene:

$$Q_{Biogás} = 195.701,53 \text{ kg/día} * 0,4014 * 0,066 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$Q_{Biogás} = 5.184,60 \text{ m}^3/\text{día}$$

El diseño de la planta de biogás generará $5.184,60 \text{ m}^3/\text{día}$.

4.2.4. Potencial de Generación de Energía

Para calcular la cantidad de energía y potencia disponible en el biogás se utilizó la ecuación 12 y 13 respectivamente (Escobar Morales, 2015, p.35).

$$E_{Total} = Q_{Biogás} * C_{Metano} * PCI_{Metano} \rightarrow [kWh/día] \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

E_{Total} = Energía disponible por día en $kWh/día$.

$Q_{Biogás}$ = Cantidad de biogás producido en $\text{m}^3/\text{día}$, $5.184,60 \text{ m}^3/\text{día}$.

C_{Metano} = Fracción porcentual de metano presente en el biogás en %. El porcentaje de metano presente en el biogás es de 65%.

PCI_{Metano} = Poder calorífico del metano en kWh/m^3 , $9,96 \text{ kWh}/\text{m}^3$.

Reemplazando en la ecuación 12 se obtiene:

$$E_{Total} = 5.184,60 \text{ m}^3/\text{día} * 0,65 * 9,96 \text{ kWh/m}^3$$

$$E_{Total} = 33.565,12 \text{ kWh/día}$$

Una vez calculada la energía disponible, se procede a determinar la potencia disponible (P_{Nom}) en el biogás. Se asume una generación constante de energía (ver ecuación 13).

$$P_{Nom} = E_{Total}/24 \text{ [h/día]} \rightarrow \text{[kW]} \quad \text{Ec. 13}$$

$$P_{Nom} = 33.565,12 \text{ [kWh/día]}/24 \text{ [h/día]}$$

$$P_{Nom} = 1.398,55 \text{ kW}$$

Para la obtención de electricidad a partir de biogás se utilizan motogeneradores con tipo de motor de combustión interna. Los más utilizados son los motores de ciclo Otto, que son motores de cuatro tiempos con encendido por bujía, adaptados para quemar todo tipo de biogás. La potencia de estos sistemas va desde los 50 kW hasta varios MW y alcanzan eficiencias eléctricas del 40%. También existen motores de encendido diésel, sin embargo, estos generan más emisiones que los motores de ciclo Otto (Cuesta, 2015, p. 30).

La ecuación 14 permitió calcular la potencia eléctrica al emplearse un motor de combustión interna o motor de ciclo de Otto (Escobar Morales, 2015, p.35).

$$P_e = P_{Nom} * \eta_e \rightarrow \text{[kW]} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

P_e = Potencia eléctrica en kW.

P_{Nom} = Potencia disponible en kW, 1.398,55 kW

η_e = Eficiencia eléctrica en %, 40%.

Reemplazando en la ecuación 14 se obtiene:

$$P_e = 1.398,55 \text{ kW} * 0,40$$

$$P_e = 559,42 \text{ kW}$$

Para el desarrollo de este proyecto se estimó que el equipo produce electricidad todo el tiempo (24 horas al día durante todo el año); sin embargo, se estimó un porcentaje de parada de la planta del 10%, de manera que el factor de capacidad de diseño es del 90%.

Se empleó la ecuación 15 para calcular la energía eléctrica anual generada (Escobar Morales, 2015, p.36).

$$E_e = P_e * F_{cap} * HA \rightarrow [kWh/año] \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

E_e = Energía eléctrica anual generada en kWh .

P_e = Potencia eléctrica en kW , 559,42 kW .

F_{cap} = Factor de diseño o disponibilidad de sustrato en %, 90%.

HA = Número total de horas por año en $h/año$, 8.760 $h/año$.

Reemplazando en la ecuación 15 se obtiene:

$$E_e = 559,42 \text{ kW} * 0,90 * 8.760 \text{ h/año}$$

$$p_e = 4.410.467 \text{ kWh/año o } 4.410,46 \text{ MWh/año}$$

4.2.5. Componentes de la Planta de Producción de Biogás

A continuación, se presentan los componentes principales para el diseño de la propuesta de la planta de producción de biogás utilizando desechos orgánicos

provenientes del relleno sanitario de Patio Bonito del municipio de Barrancabermeja:

- **Biodigestor:** dispositivo principal donde ocurre el proceso de degradación de la materia orgánica. El biodigestor propuesto en este trabajo tiene una configuración cilíndrica vertical, ya que en la actualidad son muy comunes.
- **Línea de conducción del afluente:** el afluente se introduce por la parte superior del biodigestor. Se utiliza tubería de PVC debido a sus propiedades anticorrosivas y mecánicas.
- **Línea de salida del efluente:** es el ducto que permite la extracción de los lodos o material sobrenadante de la digestión anaerobia, el cual se ubica en la parte inferior del biodigestor.
- **Tanque de almacenamiento del gas:** se utiliza para almacenar el biogás que se genera en el biodigestor.

Cabe resaltar, que para ejecutar la propuesta de diseño de la planta es necesario disponer de un terreno cercano al sitio donde se vierten los residuos, por la facilidad de carga. Este debe estar alejado de los cuerpos de agua para evitar la contaminación ambiental de los mismos. Es importante mencionar que el relleno sanitario Ecoparque de la empresa Rediba S.A. queda a 7,25 Km de distancia a la Ciénaga El Sábalo y 8,54 Km hasta la Ciénaga El Zarzal.

4.2.6. Modelo Matemático para la Producción de Biogás

Los modelos matemáticos permiten comprender los aspectos cualitativos y cuantitativos de las diferentes condiciones operacionales llevadas a cabo en los procesos.

Uno de los parámetros de mayor afectación en el proceso de digestión anaerobia es la temperatura, ya que ésta impacta directamente sobre la velocidad de degradación de la materia orgánica. El modelo de Arrhenius considera el efecto de la temperatura (ver ecuación 16).

$$K = A * \exp^{(-E_a/RT)} \rightarrow [s^{-1}] \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

K = Constante de velocidad en s^{-1} .

A = Constante en s^{-1} .

E_a = Energía de activación en J/mol .

R = Constante universal de los gases en $J/mol * K$, $8,314472 J/mol * K$.

T = Temperatura en K .

Otro de los parámetros importantes en el modelo es establecer el volumen de biogás generado, así como la presión alcanzada al interior del biodigestor; por ello la importancia de evaluar el volumen de gas en función de la presión.

La ecuación 17 presenta el modelo exponencial para caracterizar la presión al interior del biodigestor.

$$P_L = P_{max} * [1 - \exp^{-t*K}] \rightarrow [Pa] \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

P_L = Presión en el reactor en Pa para cualquier instante t .

P_{max} = Presión máxima generada en el biodigestor en Pa .

t = Tiempo en s .

K = Constante de velocidad en s^{-1} .

La constante K representa el parámetro que establece la velocidad a la que se realiza la reacción química al interior del biodigestor y la expresión P_{max} es la

máxima presión alcanzada en el reactor. La velocidad de crecimiento de la reacción química depende directamente del modelo de Arrhenius ya que la constante permite considerar el efecto de la temperatura en el proceso, por lo tanto, al reemplazar la ecuación 16 en la ecuación 17 se obtiene la siguiente expresión:

$$P_L = P_{max} * \left[1 - \exp^{-t * A * \exp(-Ea/RT)} \right] \rightarrow [Pa] \quad \text{Ec. 18}$$

La ecuación 18 representa la presión en el interior del biodigestor para cualquier valor de tiempo t a una temperatura específica.

Finalmente, la expresión presentada en la ecuación 19 establece el volumen del biogás al interior del biodigestor.

$$V_n = V_{med} * \frac{P_a + P_L}{P_n} * \frac{T_n}{T_a} \rightarrow [L] \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

V_n = Volumen a condiciones normales en L , 22,4 L .

V_{med} = Volumen de biogás generado en el biodigestor para cualquier instante de tiempo t en L .

P_a = Presión atmosférica en Pa , 0 Pa .

P_L = Presión al interior del biodigestor para cualquier instante de tiempo t en Pa .

P_n = Presión a condiciones normales en Pa , 101.325 Pa .

T_n = Temperatura a condiciones normales en K , 273,15 K .

T_a = Temperatura de trabajo del biogás en K .

Reemplazando la ecuación 18 en la ecuación 19 se obtiene el modelo matemático que permite evaluar el volumen del gas generado en función de la presión de gas al interior del biodigestor:

$$V_n = \frac{V_{med}}{P_n} * \frac{T_n}{T_a} * \left[P_a + P_{max} * \left[1 - \exp^{-t * A * \exp(-E_a/RT)} \right] \right] \rightarrow [L] \quad \text{Ec. 19}$$

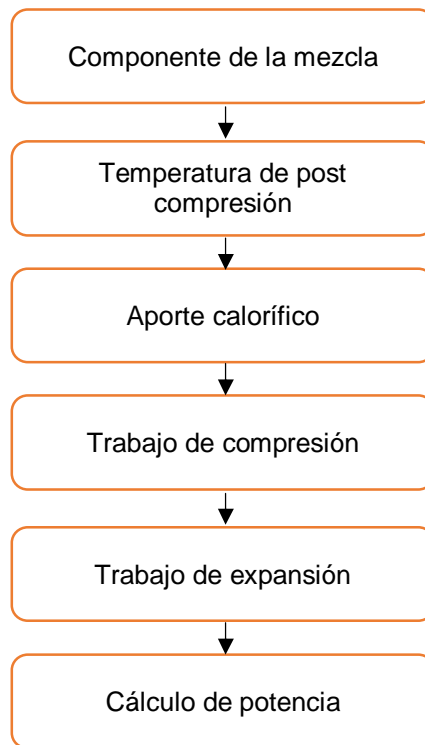
El modelo enunciado en la ecuación 19 es una expresión que contempla los parámetros de temperatura, presión y volumen en el proceso de digestión anaerobia para producir biogás. Por tanto, esta expresión se simuló en el software Matlab a fin de analizar los parámetros previamente mencionados. La simulación se realizó teniendo en cuenta diferentes valores de temperatura, valores oscilantes entre 5°C y 50°C (278,15 K y 323,15 K), con un paso de 5 °C. Cabe resaltar que el proceso de digestión anaerobia es un proceso que se inhibe o afecta fácilmente por leves variaciones de temperatura. Dado que el desarrollo de este trabajo no se realizó estudios experimentales, los parámetros constantes $A = 2,77638 e^7 s^{-1}$ y $E_a = 77.949,0064 J/mol$ son parámetros de entrada para la simulación, los cuales se tomaron de un estudio realizado por Bermúdez & Díaz, 2010. Adicionalmente, la simulación se evaluó tomando como referencia la producción de biogás en un periodo de tiempo de 30 días, equivalentes a 2.592.000 segundos.

4.2.7. Modelado del Sistema Motor de Combustión Interna

El motogenerador es una máquina que mueve un generador de electricidad a través de un motor de combustión interna, el cual es muy utilizado cuando hay déficit en la generación de energía eléctrica. Para el desarrollo de este trabajo se modeló la producción de energía eléctrica mediante el uso de las ecuaciones 20 – 30, expresiones matemáticas tomadas de un estudio realizado por Mago, Flores & Tovar, 2012. Adicionalmente se empleó el programa Matlab/Simulink.

Cabe resaltar que el modelado del motor de combustión se seccionó en seis (6) bloques de operación, tal como se presenta en la Figura 10.

Figura 10. Bloques de operación para el cálculo de la potencia mecánica del motor de combustión interna



Fuente: Autor

El primer bloque conllevó a determinar la cantidad de masa de aire y combustible que va a contener un cilindro del motor de combustión interna. Para ello, se determinó las moles del sistema mediante la ecuación 20.

$$n = \frac{P_1 * V_1 * \eta_w}{R * T_1} \rightarrow [mol]$$

Ec.

20

Donde:

P_1 = Presión inicial de la mezcla en atm.

V_1 = Volumen máximo del cilindro en L.

η_w = Rendimiento volumétrico en el ciclo de Otto.

R = Constante de los gases universal de los gases, $0,08205746 \text{ atm} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K}$

T_1 = Temperatura inicial de la mezcla en K.

Posteriormente, se determinó la masa de aire (m_{aire}) que comprime la mezcla del cilindro mediante la ecuación 21:

$$m_{aire} = n * \bar{m}_{aire} \rightarrow [g] \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

n = Número de moles del sistema en mol.

\bar{m}_{aire} = Masa molar del aire en g/mol .

La masa del combustible ($m_{combustible}$) se determinó mediante la ecuación 22.

$$m_{combustible} = \frac{m_{aire}}{AFR} \rightarrow [g] \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

AFR = Relación aire combustible.

Posteriormente, el modelo contempló la determinación de la temperatura de la mezcla (T_2), una vez finalizado el proceso (ver ecuación 23).

$$T_2 = T_1 * \rho^{k-1} \rightarrow [K] \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

T_1 = Temperatura inicial de la mezcla.

ρ = Relación de la compresión del motor de combustión interna, V_2/V_1 .

k = Constante de evolución politrópica en función de la capacidad calorífica, C_p/C_v .

Seguidamente se determinó el aporte calorífico del metano mediante la ecuación 24.

$$Q = m_{combustible} * PCI_{metano} * \eta_{combustible} \rightarrow [kcal * g/m_3] \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

PCI_{metano} = Capacidad calorífica del metano en $kcal/m_3$.

$\eta_{combustible}$ = Rendimiento del combustible.

Una vez se obtiene el aporte calorífico, se obtiene la variación de la temperatura que ocurre durante el proceso de combustión (ver ecuación 25).

$$\Delta T = \frac{Q}{(m_{aire} + m_{combustible}) * C_v} \rightarrow [K] \quad \text{Ec. 25}$$

La temperatura al inicio de la expansión (T_3) se obtiene mediante la ecuación 26.

$$T_3 = T_2 + \Delta T \rightarrow [K] \quad \text{Ec. 26}$$

El trabajo producido en el proceso de compresión del Ciclo de Otto del motor de combustión interna se relaciona mediante la ecuación 27.

$$W_{comp} = \frac{n * R * T_1}{1 - k} * (\rho^{(k-1)} - 1) \rightarrow [J] \quad \text{Ec. 27}$$

Para determinar el trabajo de expansión en un motor de Ciclo de Otto se utiliza la ecuación 28.

$$W_{exp} = \frac{n * R * T_3}{1 - k} * (\rho^{(1-k)} - 1) \rightarrow [J] \quad \text{Ec. 28}$$

La ecuación 29 permite calcular el trabajo total del motor de combustión interna.

$$W_{Total} = W_{comp} + W_{exp} \rightarrow [J] \quad \text{Ec. 29}$$

Finalmente, la ecuación 30 permite determinar la potencia eléctrica generada en el motor de combustión interna.

$$P = W_{Total} * N_{cilindros} * \omega \rightarrow [J] \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

$N_{cilindros}$ = Número de cilindros del motor, según especificaciones.

ω = Velocidad del motor en rad/s.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las variables utilizadas para modelar el motor de combustión interna.

Tabla 7.

Variables de entrada para el modelamiento de un motor de ciclo Otto

Variable	Condición inicial	Descripción
<i>P</i>	0,1 atm a 1,3 atm	Valor de la presión al cual está sometida la mezcla aire – combustible antes de entrar al cilindro del motor
<i>V</i>	1 L a 3 L	Volumen máximo del cilindro. Es un parámetro que limita la cantidad de mezcla aire – combustible que entra al cilindro y es propio de cada motor
<i>T</i>	250 K a 350 K	Temperatura inicial de la mezcla aire - combustible antes de entrar al cilindro del motor
<i>ω</i>	1500 rpm a 2500 rpm	Vueltas nominales en que gira el motor
<i>AFR</i>	15 a 25	Relación aire – combustible. Permite conocer la proporción de aire y combustible que están entrando al cilindro del motor

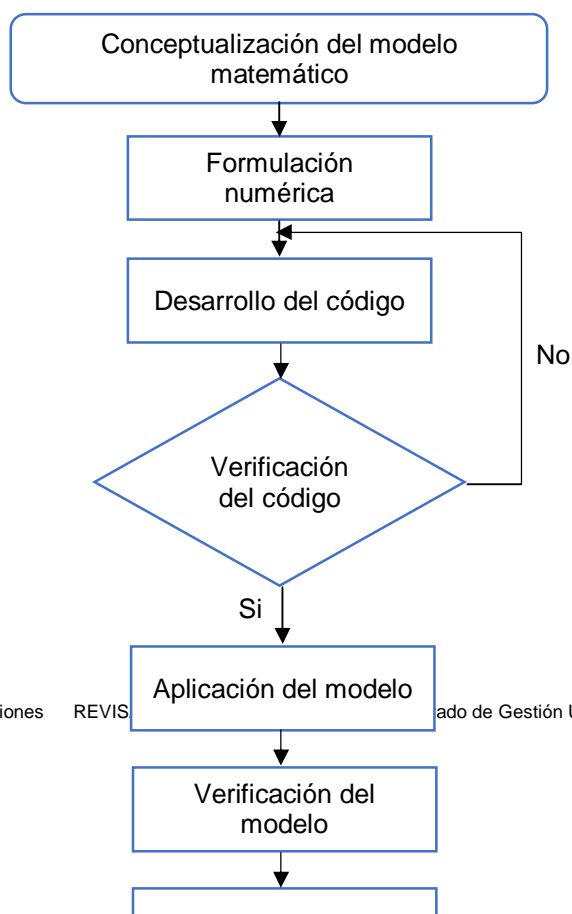
Fuente: Autor.

En Anexo B se presenta el algoritmo matemático en Matlab para el motor de combustión interna.

4.3. SIMULACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA

Para el desarrollo del modelo matemático propuesto en este trabajo se utilizó el software de simulación matemático Matlab, el cual utiliza un lenguaje de programación propio, que permite operaciones de vectores y matrices. A continuación, se presenta el algoritmo para desarrollar el modelo matemático que simula el biodigestor y el motor de combustión para producir biogás a partir de RSU.

Figura 11. Algoritmo para desarrollar el modelo matemático en Matlab



F-DC-125

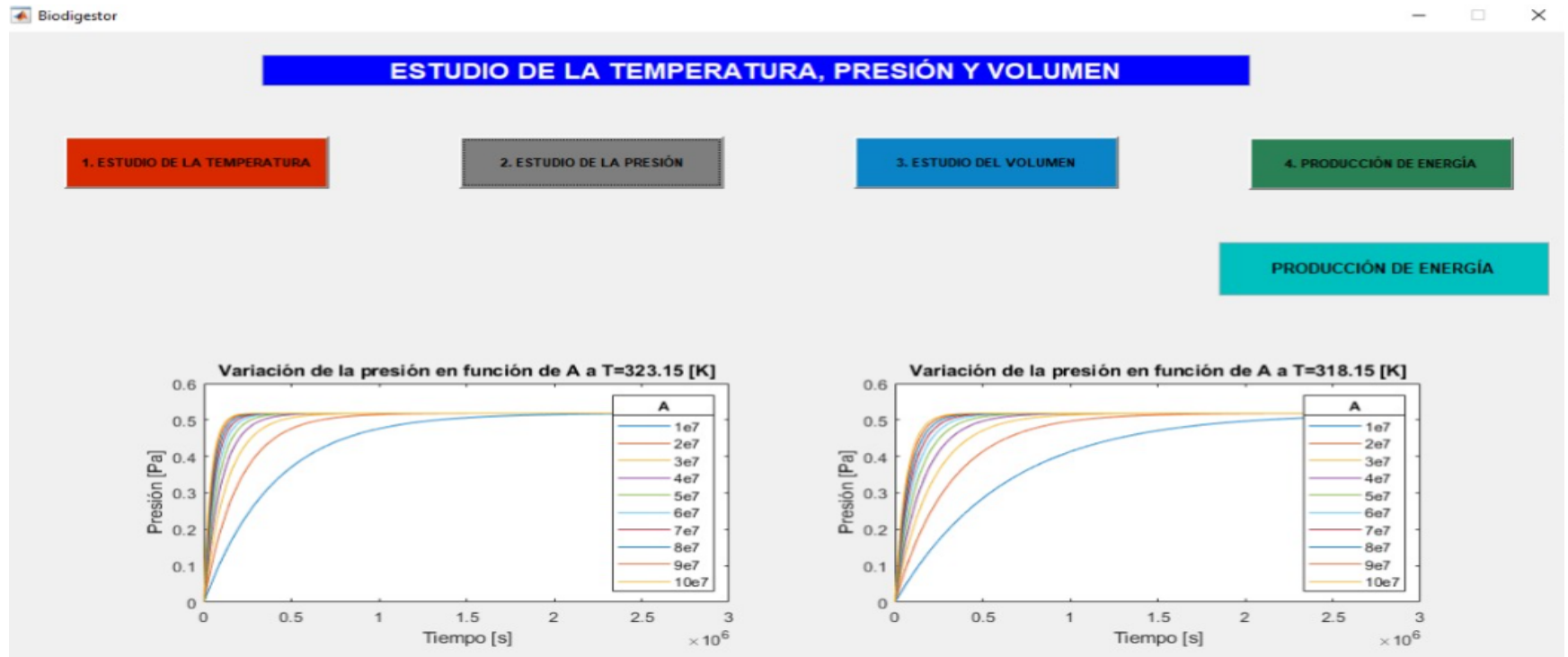
**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO**

VERSIÓN: 1.0

Fuente: Autor

Adicionalmente, se utilizó la interfaz gráfica “Guide” de Matlab, con el propósito de ejecutar de manera sencilla la presentación de los resultados de las variables fundamentales del modelo matemático. Para ello, se diseñaron cuatro (4) botones de respuesta asociados a los parámetros de temperatura, presión y volumen. Adicionalmente, se incluyó el botón de respuesta de producción de energía (Figura 12).

Figura 12. Diseño de la interfaz gráfica de respuesta de los parámetros fundamentales del modelo matemático



F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

Fuente: Autor

4.4. SOCIALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS CON LA EMPRESA BIOTA S.A.S.

El presente trabajo de grado “Desarrollo de un sistema de generación de energía eléctrica renovable a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) simulado mediante la herramienta de software Matlab/Simulink como alternativa ambiental y energética sostenible en Barrancabermeja” se desarrolló en el marco de un convenio de cooperación firmado entre las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) y la empresa Biota S.A.S., a fin de prestar los servicios de consultoría científica en relación a la viabilidad de implementar tecnologías promisorias para producir energías limpias a partir del tratamiento de las basuras depositadas en el Relleno Sanitario Patio Bonito.

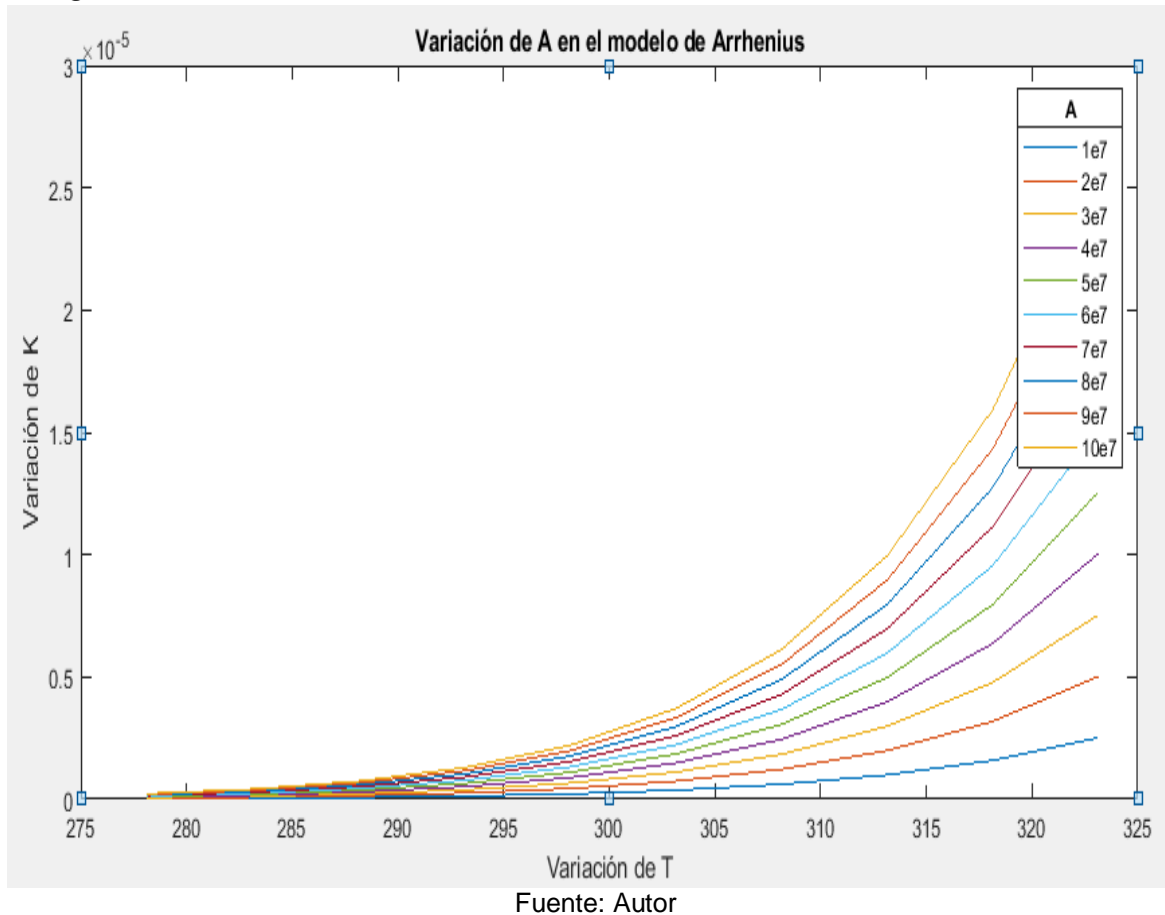
Como compromisos declarados entre las dos partes, los autores realizaron la entrega de un informe ejecutivo en el que se presentaron los resultados obtenidos al realizar el estudio del modelo de generación de energía eléctrica a partir del uso de residuos sólidos urbanos, empleando un biodigestor, el cual fue analizado teniendo en cuenta parámetros y condiciones previamente establecidas en el numeral 4. Lo anterior permitió obtener como resultado el desarrollo de la simulación en Matlab, siendo éste una alternativa para mitigar el impacto ambiental. Adicionalmente, los resultados fueron socializados con las directivas de la empresa Biota, actividad llevada a cabo de manera virtual. Por su parte, la empresa expidió un certificado para dar cumplimiento a la consultoría realizada por los autores (ver AnexoC).

5. RESULTADOS

5.1. MODELO MATEMÁTICO DEL BIODIGESTOR

En la Figura 13 se presenta los resultados obtenidos al realizar variaciones de la constante A en el modelo de Arrhenius a diferentes valores de temperatura, entre 5 °C y 50°C (278,15 K y 323,15 K). La expresión planteada del modelo se puede observar en la ecuación 16 del aparte 4.2.6.

Figura 13. Constante de velocidad K en función de la constante A en el modelo de Arrhenius



Se observa que la constante de velocidad K está fuertemente relacionada con la temperatura. A medida que aumenta la constante A de $A = 1 e^7$ a $A = 10 e^7$, se

hace más evidente las variaciones de la constante de velocidad K (pendientes mayores), especialmente a temperaturas mayores a los 35°C o $308,15\text{ K}$. Esta condición de operación es favorable, ya que se acelera la velocidad de crecimiento de los microorganismos y el proceso de digestión, produciendo altas tasas de consumo de sustrato (degradación de la materia orgánica) para dar lugar a una alta producción de biogás. Por tanto, es evidente que los procesos anaeróbicos son fuertemente dependientes de la temperatura. No obstante, hay que precisar que valores altos de temperatura conllevan a un mayor gasto energético del proceso. En el Anexo A se presenta el diseño del modelo y el código con que se programó el modelo de Arrhenius.

En la Figura 14 se presenta los resultados de presión al interior del biodigestor al realizar variaciones de la constante A y la temperatura. Esta expresión se puede observar en la ecuación 18 del aparte 4.2.6.

Nótese que al simular el modelo a una temperatura baja de $278,15\text{ K}$ el valor máximo alcanzado de presión es $0,25\text{ Pa}$, condición dada para la mayor expresión de la constante $A = 10 e^7$ (Ver primer recuadro de la Figura 14). A medida que aumenta la temperatura, aumenta la presión en el biodigestor. En el quinto recuadro de la Figura 14 se observa que la presión empieza a estabilizarse a un valor por encima de los $0,5\text{ Pa}$. Finalmente, en el décimo recuadro es más notoria la estabilización de la presión en el biodigestor, alcanzando el valor de $0,5179\text{ Pa}$.

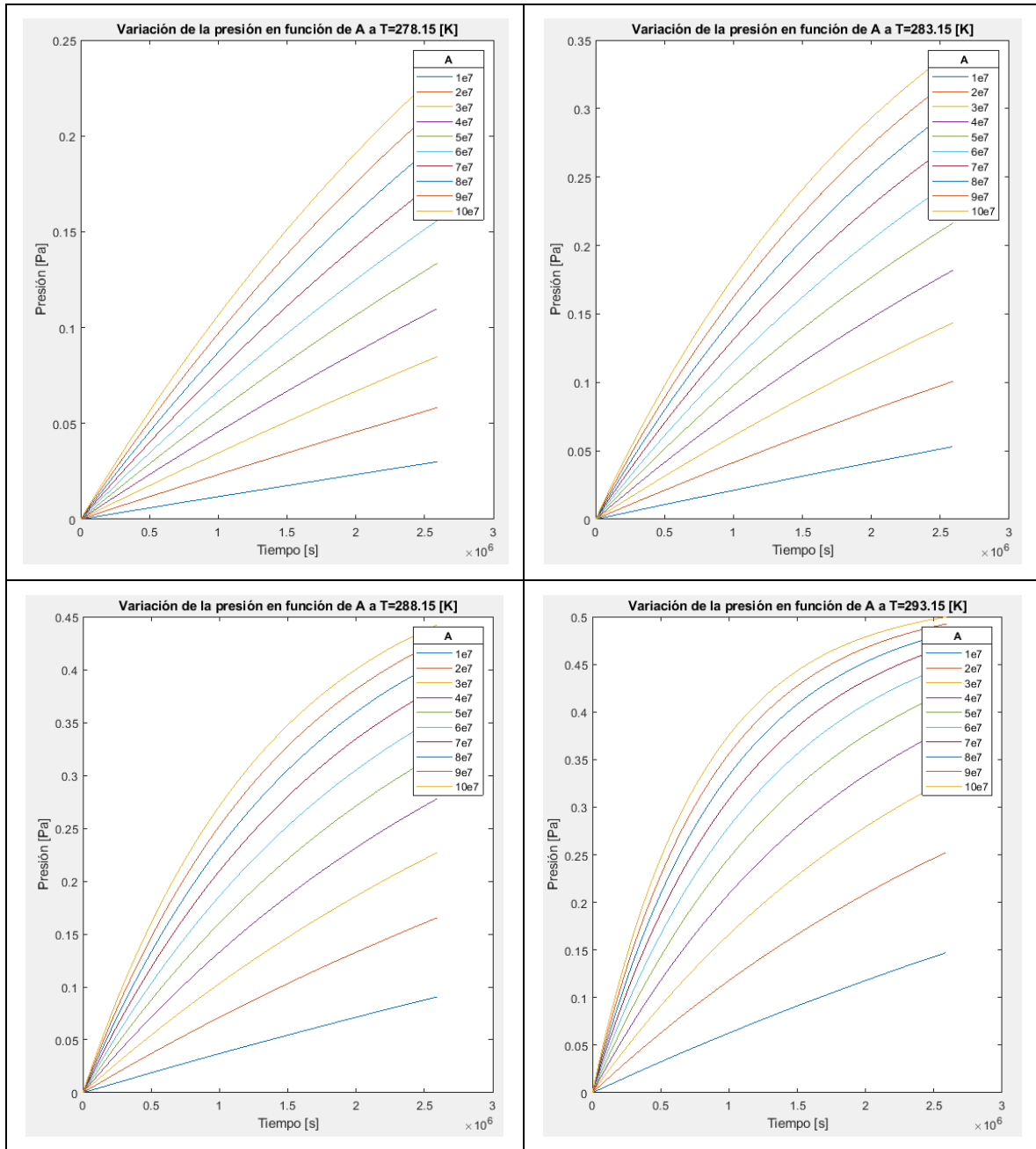
Por otra parte, la Teoría de las Colisiones propuesta por Max Trautz y William Lewis expresa que una reacción se lleva a cabo por la colisión entre las partículas. Las colisiones tienen suficiente energía que al momento de impactar unas con otras se rompen los enlaces, ocasionando que se formen nuevos productos. Por ende, al aumentar la temperatura en el biodigestor, aumenta el número de colisiones, favoreciéndose la degradación de la materia orgánica por el trabajo realizado por los microorganismos, ocasionando que se incremente la velocidad

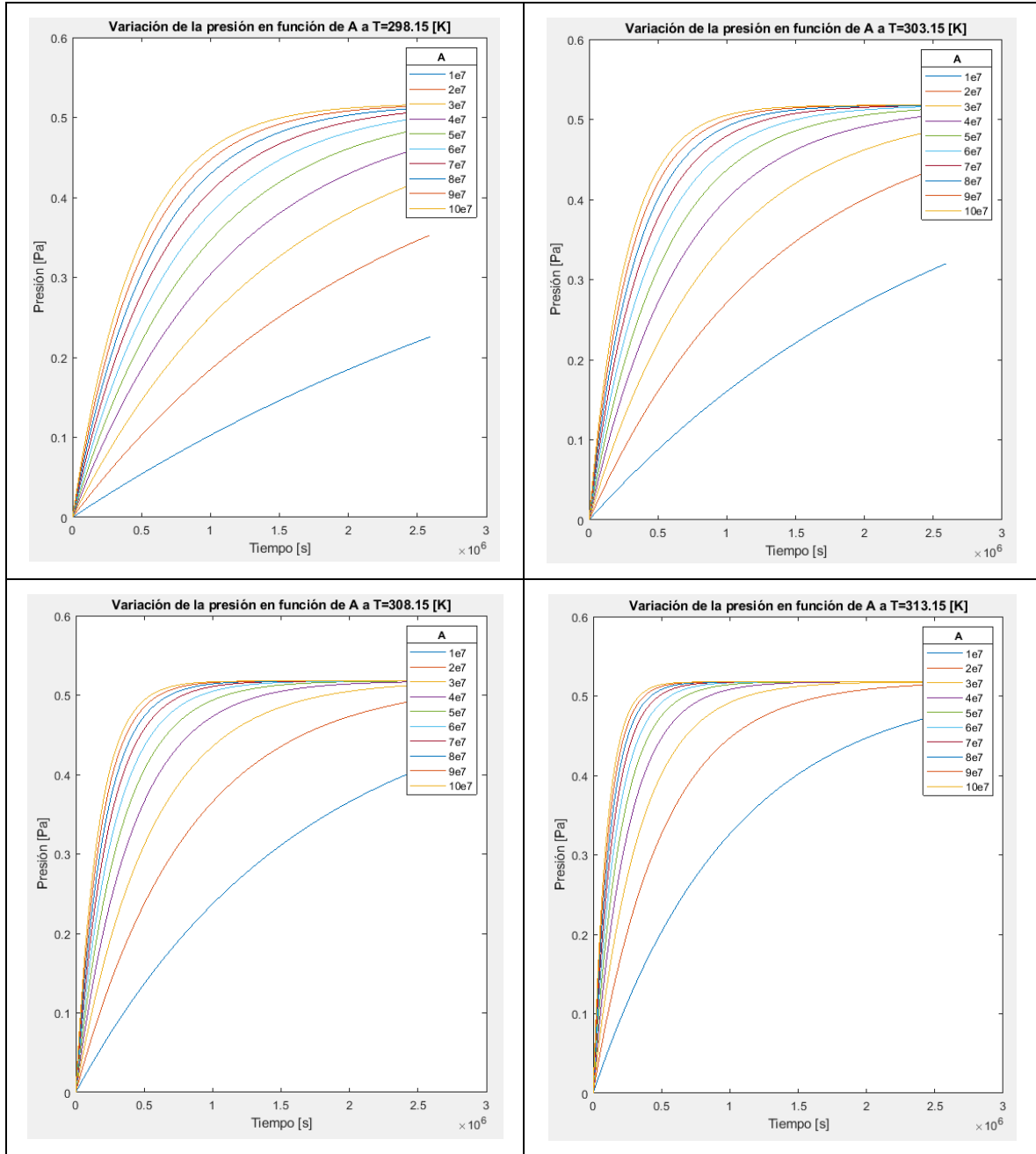
de reacción al igual que la presión en el biodigestor. Lo anterior da lugar a que se favorezca la producción de biogás, producto deseado en este trabajo.

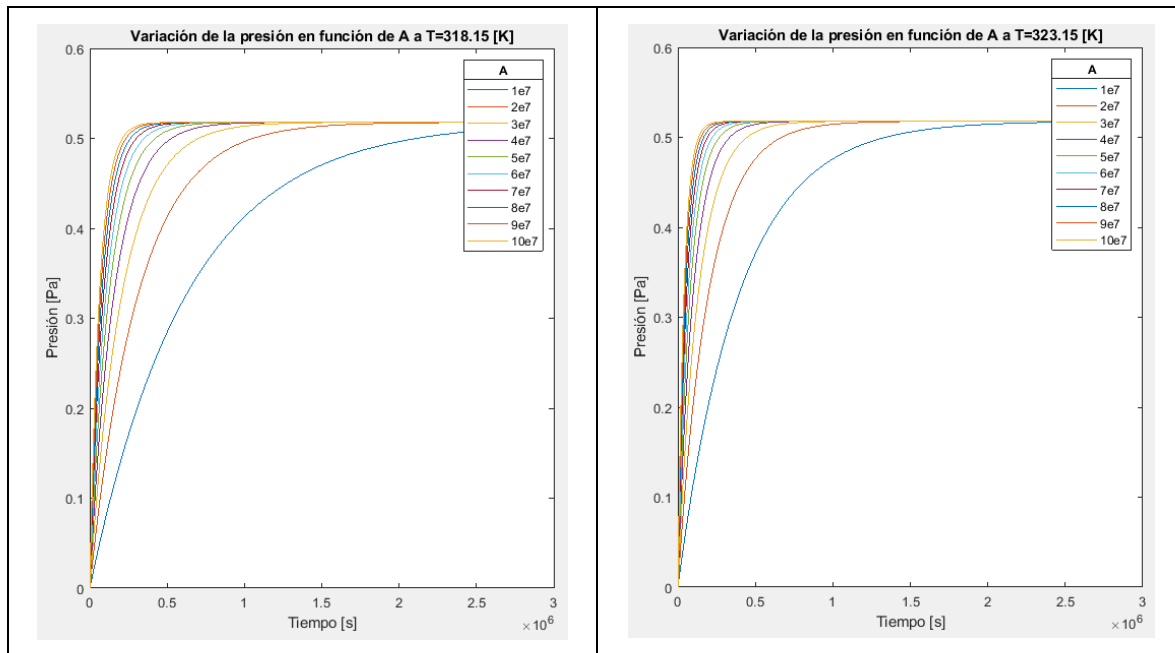
Se observa que la constante de velocidad K está fuertemente relacionada con la temperatura. A medida que aumenta la constante A , se hace más evidente las variaciones de la constante de velocidad K , especialmente a temperaturas mayores a los 35°C o $308,15\text{ K}$. Esta condición de operación es favorable, ya que se acelera la velocidad de crecimiento de los microorganismos y el proceso de digestión, produciendo altas tasas de consumo de sustrato (degradación de la materia orgánica), para dar lugar a una alta producción de biogás. Por tanto, es evidente que los procesos anaeróbicos son fuertemente dependientes de la temperatura. En el Anexo A se presenta el diseño del modelo y el código con que se programó el modelo de Arrhenius.

En la Figura 14 se presenta los resultados de presión al interior del biodigestor al realizar variaciones en la constante A y de la temperatura en el modelo de Arrhenius. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la presión en el biodigestor, condición relacionada con la producción de biogás por la degradación microbiana. Por otra parte, la constante A está relacionada con la frecuencia de las colisiones que se dan entre las moléculas. Por ende, la constante de velocidad K es directamente proporcional a la frecuencia de las colisiones, lo que ocasiona el aumento de la presión en el sistema. Cabe resaltar que, la presión en el biodigestor aumenta al aumentar la temperatura, pero se estabiliza a $0,5179\text{ Pa}$.

Figura 14. Variación de la presión en función de la constante A a diferentes temperaturas





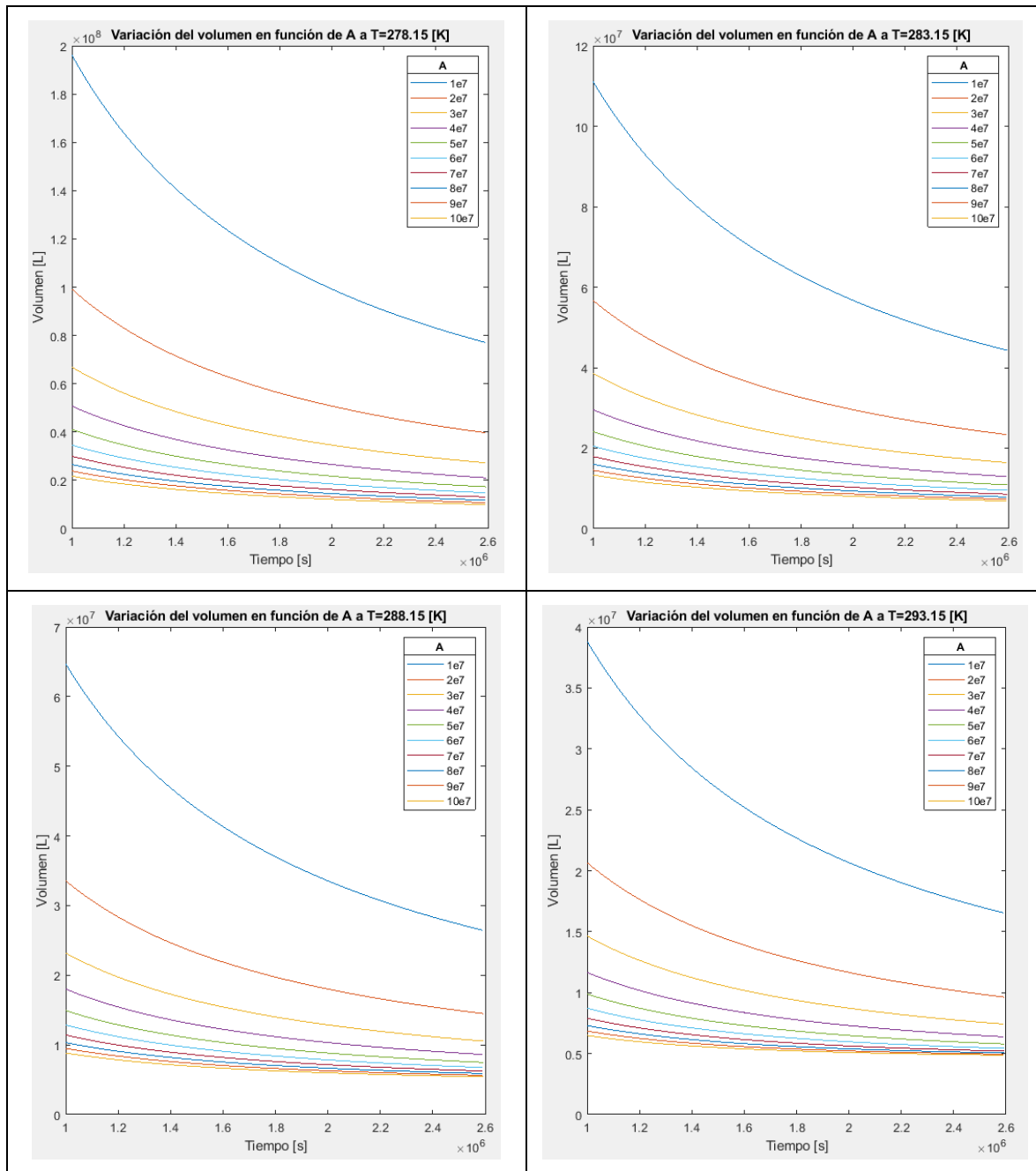


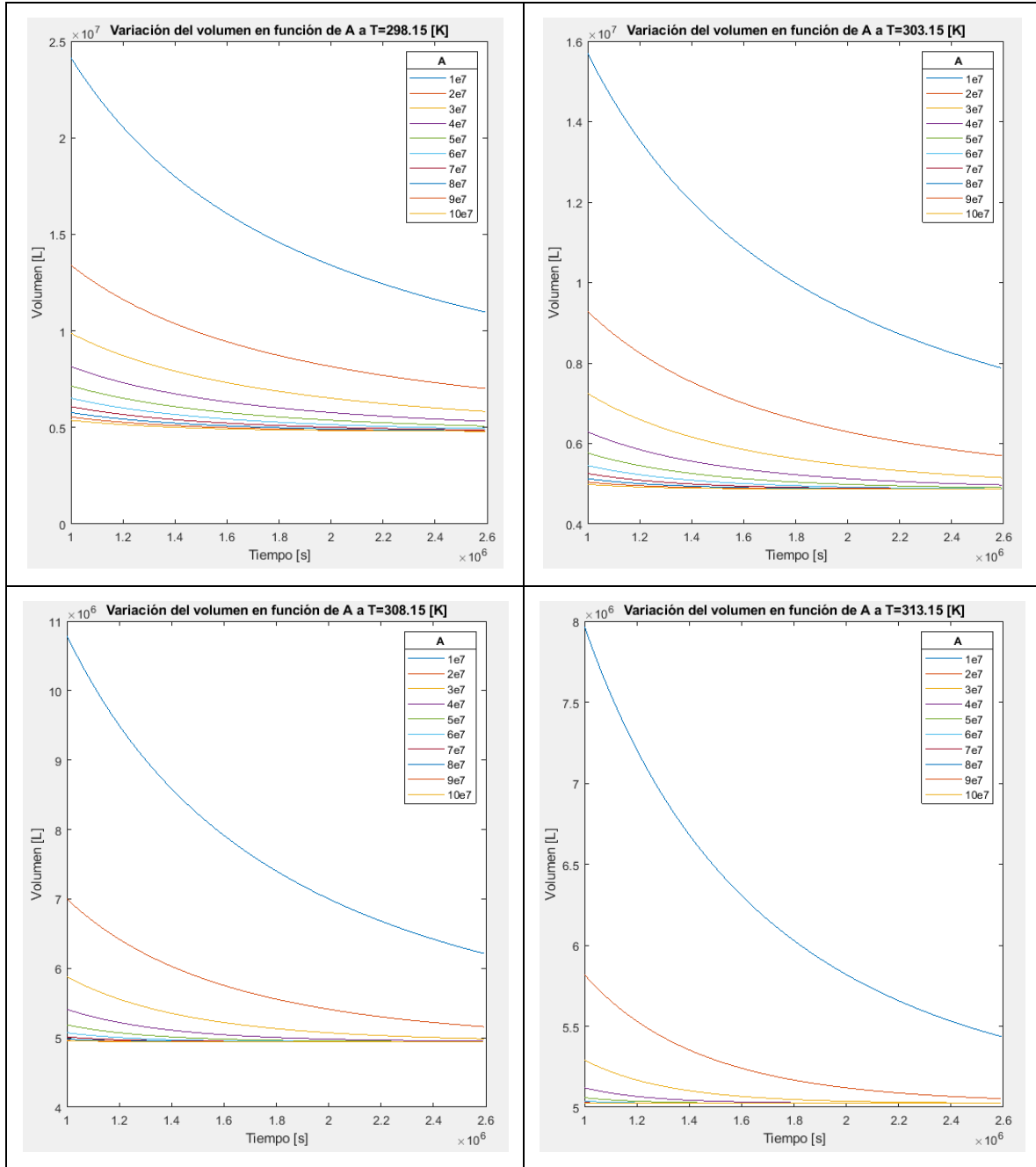
Fuente: Autor

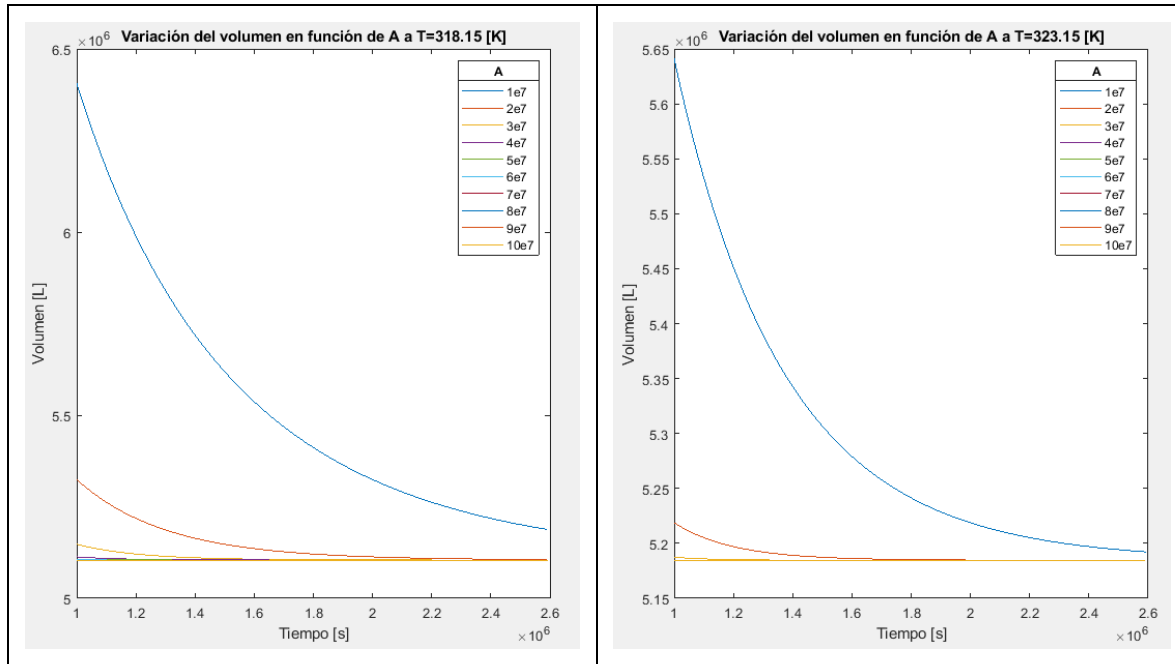
La eficiencia de la producción de biogás se determina en función del volumen de biogás generado en el biodigestor. En un proceso de digestión anaerobia, los microorganismos requieren de cierto tiempo para degradar la materia orgánica. Es por ello que, la velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de fermentación para obtener una buena producción de biogás. Cabe resaltar que la presión de un gas en un recipiente cerrado es inversamente proporcional al volumen; dicho de otra forma, a medida que disminuye el volumen, las partículas recorren una menor distancia, generando mayores colisiones por unidad de tiempo, aumentando la presión en el biodigestor.

En la Figura 15 **Figura 14** se presenta los resultados de la variación del volumen en función de la temperatura. Se evidencia que a medida que se aumenta la temperatura, mayor es la degradación de la materia, pero menor es su volumen, alcanzando un valor de producción de biogás de $5,184E^6 L$, equivalentes también a $5.184 m^3$.

Figura 15. Variación del volumen en función de la constante A a diferentes temperaturas







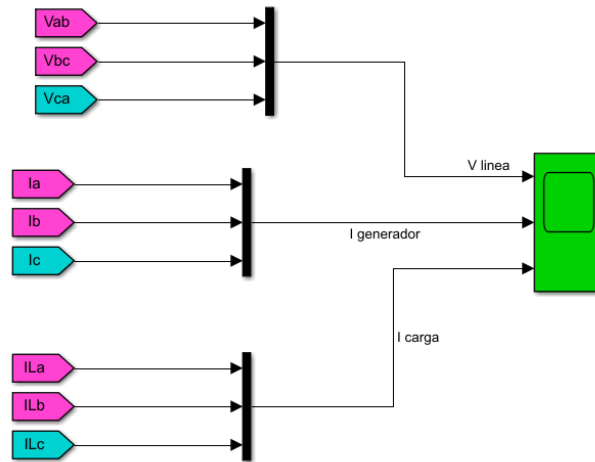
Fuente: Autor

5.2. MODELADO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

En el Anexo D se presenta la estructura del programa de modelación del motor de combustión interna ciclo Otto funcionando con biogás en Matlab/Simulink. Este sistema está conformado por una máquina sincrónica que tiene como entrada la potencia y el voltaje de campo y que tiene como salida el sistema trifásico A, B, C y un bus con diferentes parámetros del motor.

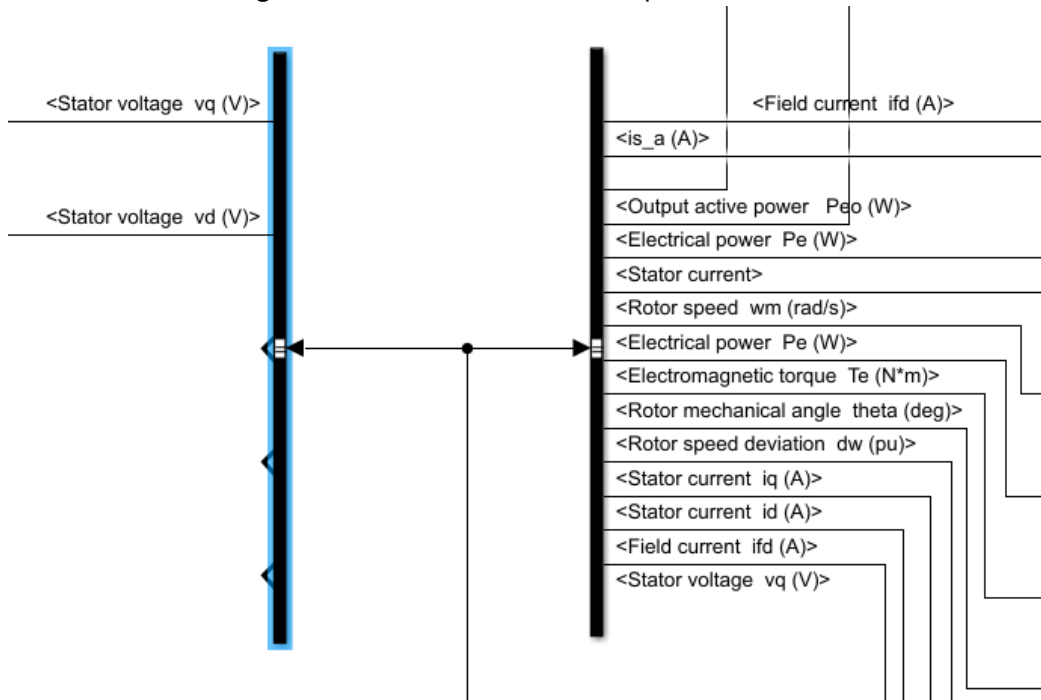
Del Anexo D al Anexo G y en las Figura 16 a la Figura 21 se presentan de forma independiente los elementos que conforman el modelo del motogenerador de electricidad: modelo eléctrico, modelo mecánico y dominio de poder, los cuales se encargan de ejecutar los cálculos de los parámetros de entrada suministrados por el usuario a fin de mostrar información como la corriente de línea, tensión de línea, corriente de campo, potencia eléctrica, entre otro.

Figura 16. Osciloscopio de salida



Fuente: Autor

Figura 17. Bus de salida de la máquina sincrónica



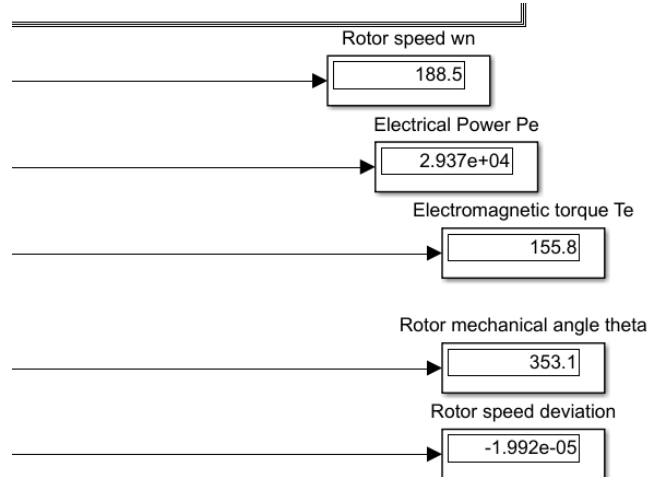
Fuente: Autor

Figura 18. Bus de salida de la máquina sincrónica, display para la visualización de resultados durante la ejecución de la simulación



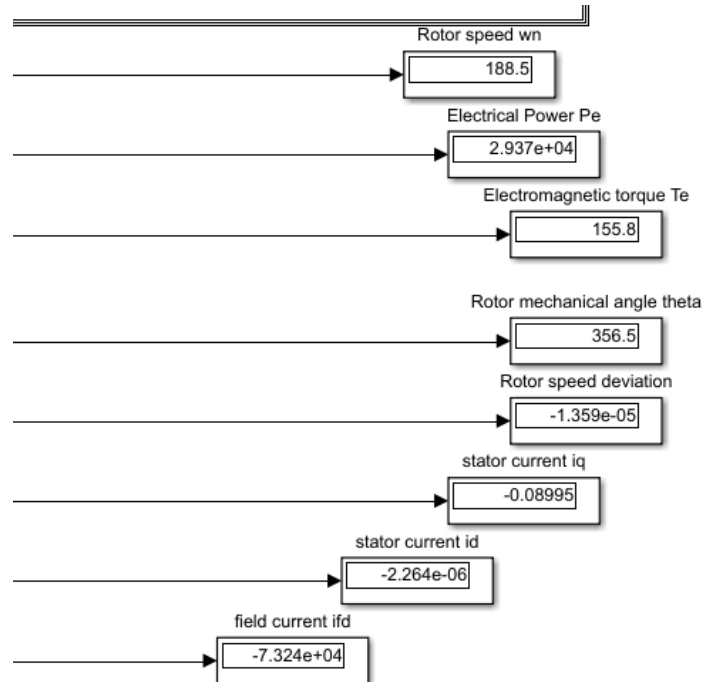
Fuente: Autor

Figura 19. Resultados del display en simulación para una potencia de 500 W



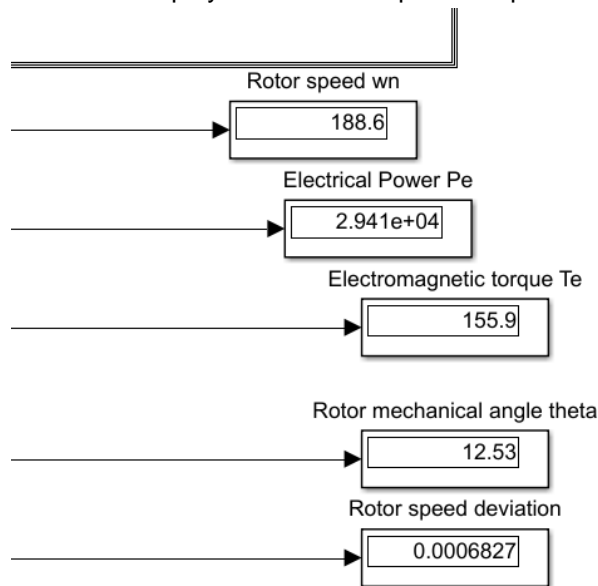
Fuente: Autor

Figura 20. Resultados del display en simulación para una potencia de 5.000 W



Fuente: Autor

Figura 21. Resultados del display en simulación para una potencia de 5.000.000 W

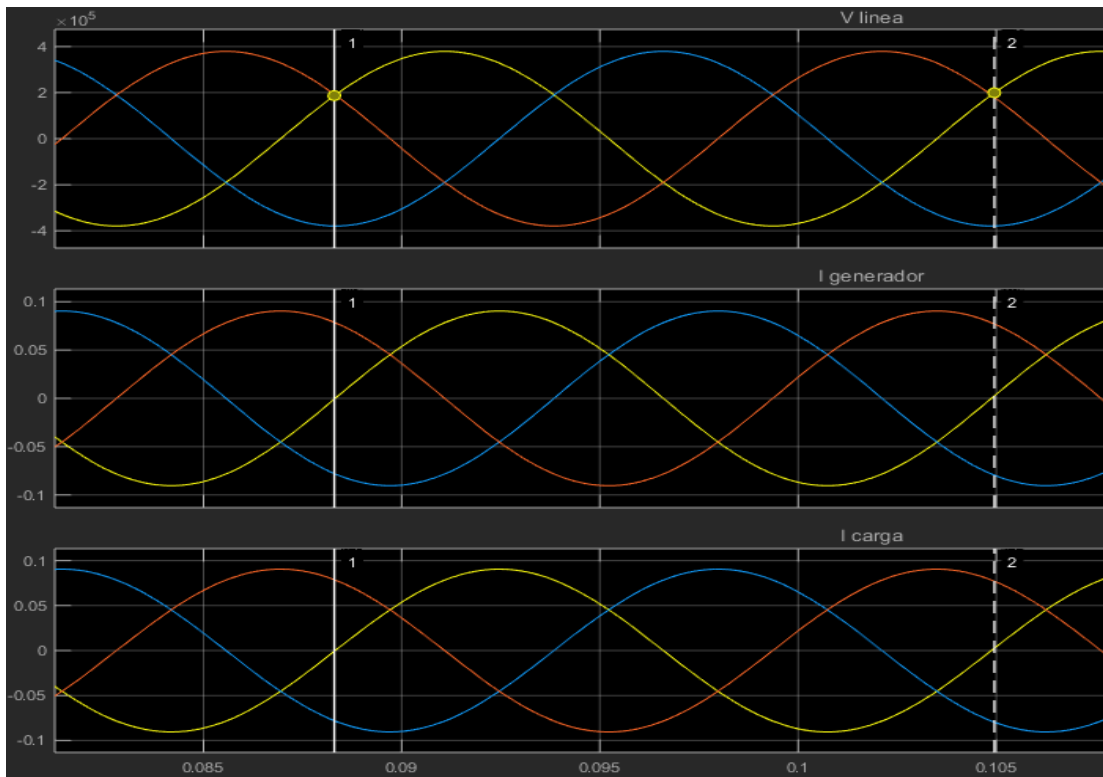


Fuente: Autor

En la Figura 22.

se presenta la medición de frecuencia sobre la corriente de línea de la máquina sincrónica en un periodo de tiempo. Cabe resaltar que, para valores de potencia de 500 W, 5.000 W y 5.000.000 W los resultados son similares, la frecuencia es de 1800 rpm, aproximadamente 60 Hz, lo cual es importante para el funcionamiento de los equipos conectados. Sin embargo, los valores de voltaje máximos son altos cercanos a los 400.000 V.

Figura 22. Medición de la frecuencia del voltaje generado por la máquina sincrónica



Fuente: Autor

Finalmente, se presentan los resultados de las variables del motor de combustión en la simulación realizada en Simulink de Matlab.

Tabla 8.

Resultados de potencia eléctrica a partir de la presión atmosférica

Presión (atm)	Potencia eléctrica (W)
0,1	121.0398,0
0,8	968.3185,0
1,3	1573,5

Fuente: Autor

Tabla 9.

Resultados de potencia eléctrica a partir del volumen en litros

Volumen (L)	Potencia eléctrica (W)
1	500,0
2	1001,4
3	1502,0

Fuente: Autor

Tabla 10.

Resultados de potencia eléctrica a partir del incremento de temperatura

Temperatura (K)	Potencia eléctrica (W)
250	1225,3
300	1210,4
350	1199,7

Fuente: Autor

Tabla 11.

Resultados de potencia eléctrica a partir de la velocidad nominal del motor

Velocidad nominal del motor (rpm)	Potencia eléctrica (W)
1500	903,16
2000	1423,7
2500	1971,6

Fuente: Autor

Tabla 12.

Resultados de potencia eléctrica a partir del aumento en la relación aire-combustible.

AFR	Potencia eléctrica (W)
15	1243,1
20	1217,5
25	1201,8

Fuente: Autor

6. CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo permitió realizar una revisión bibliográfica exhaustiva en relación a los procesos de digestión anaerobia para la producción de biogás mediante el uso de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), siendo los RSU una fuente con gran potencial para su transformación en energía útil.

Para el estudio se consideró el diseño de un biodigestor de mezcla completa con un volumen de $6.428,79 m^3$, con el propósito de transformar en promedio $195.701,53 kg$ de residuos sólidos generados diariamente en el Municipio de Barrancabermeja, que en promedio representan un volumen de $357,15 m^3$, y que potencialmente producen $5.184,60 m^3/día$ de biogás y que representan al año una potencia eléctrica de $4.410,46 MWh$. El Grupo EPM estima que en promedio una familia de cuatro personas consume anualmente $1.824 KWh$ de energía, de manera que el proyecto podría abastecer 2.418 hogares.

El uso del programa Matlab permitió de manera eficaz el desarrollo y la simulación del modelo matemático propuesto, ya que permitió la resolución de ecuaciones en un tiempo de respuesta muy corto que, de realizarse de manera manual tardaría demasiado tiempo en ser resuelto.

El modelo matemático propuesto en este trabajo, se basó en diferentes ecuaciones que relacionan variables como la temperatura, la presión y el volumen, las cuales permitieron analizar las condiciones de operación más favorable para llevar a cabo la degradación de la materia orgánica o de los RSU, a fin de dar lugar a una tasa representativa de producción de biogás. Cabe resaltar que una condición favorable es realizar el proceso de degradación de la materia a una temperatura de $308,15 K$, en la que se alcanza una presión máxima de $0,5179 Pa$,

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

lográndose alcanzar una producción diaria de biogás de $5,184E^6 L$ o $5.184 m^3$,
siendo esta producción favorable para el relleno sanitario de Patio Bonito.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía Municipal de Barrancabermeja (2017). *Primera actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos "PGIRS" 2015-2027 en el municipio de Barrancabermeja*. Alcaldía de Barrancabermeja.
- Arrieta Palacios, W. J. O. (2016). *Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado*. Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Bermúdez Gómez, C. R. & Díaz Hernández, M. A. (2010). *Instrumentación de un biodigestor de estiércol animal para analizar su comportamiento dinámico*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Besel S.A. (2007). *Biomasa: digestores anaerobios*. Madrid, España: IDEA - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Cadavid Rodríguez, L. S & Bolaños Valencia, I. V. (2015). Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. *Energética*, 46, 23-28.
- Campos Pozuelo, E. & Flotats Ripoll, X. (2005). Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje. En X. E. Castells (Ed), *Tratamiento y valoración energética de residuos* (pp. 1-55). Madrid: Díaz de Santos.
- Cuesta López, J. (2015). *Obtención de biogás a partir de residuos sólidos urbanos para su inyección a red*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- Escobar Morales, D. A. (2015). *Diseño y factibilidad de una planta de biogás en una vitivinícola*. Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile.

Escobar Palacio, J. C., Rúa Orozco, D. J., Melo Henríquez, A. I., Martínez Reyes, A. M. & Mambeli Barros, R. (2015). Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos. En J. M. Rincón Martínez & E. E. Silva Lora (Ed), *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad* (pp. 275-296). Bogotá: CYTED.

Fazenda, A. J. & Tavares Russo, M. A. (2016). Caracterización de residuos sólidos urbanos en Sumbe: herramienta para gestión de residuos. *Ciencias Holguín*, 22(4), 1-15.

FeoliGrant, D. (2016). *Implementación del modelo dinámico de biodigestión anaerobia ADM1 utilizando MATLAB/Simulink*. Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

Foster, S. & Elzinga, D (2020). *El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible*. Recuperado de <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>.

Grass Puga, B. D. (2013). *Evaluación y diseño para la implementación de una planta de biogás a partir de residuos orgánicos agroindustriales en la región metropolitana*. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

Mago, M. G., Flores, B. & Tovar, L. (2012). Modelación y simulación de un sistema electrógeno funcionado con biogás. *Ingeniería UC*, 19(3), 91-101.

Noticias (2011). *Perú comienza a generar energía eléctrica a partir de la basura*. Recuperado de <https://rpp.pe/economia/economia/peru-comienza-a-generar-energia-electrica-a-partir-de-la-basura-noticia-417248>.

- Panesso, A. F., Cadena, J. A., Mora Flórez, J. J. & Ordoñez, M. C. (2011). Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica. *Scientia et Technica*, 47, 23-28.
- Ramírez Vargas, C. A., Paredes, D. & Guerrero, J. (2014). Sostenibilidad financiera y económica de plantas de manejo de residuos sólidos urbanos en Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 65-77.
- Rodríguez Pachón, D. A. & García Cepeda, A. F. (2017). *Diseño y construcción de un biodigestor para la producción de biogás a partir de heces caninas*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Sáez Rico, J. (2017). *Diseño de un reactor anaerobio para la digestión de fangos*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Siles, F. A. (2012). *Generación de energía eléctrica a partir de producción de biogás*. Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., México.
- Velásquez Lozano, M. E. (2018). *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

8. ANEXOS

Anexo A. Algoritmo en Matlab desarrollado para el biodigestor

A1. Código del modelo matemático de Arrhenius

%{ MODELO DE ARRHENIUS: Considera el parámetro de la temperatura, el cual está directamente relacionada con la velocidad de degradación de la materia orgánica en el proceso de digestión anaerobia.

```

K=A*exp^(-E_a/RT)
K=Constante de velocidad en s^(-1)
A=Constante
E_a= Energía de activación en J/mol
R=Constante universal de los gases en J/mol*K
T=Temperatura en K
%}

clc
close all
clear all

E_a=77949.0064; % Unidades J/mol
R=8.314472; % Unidades J/mol*K

for A=1:1:10
    for T=1:1:10
        K (A,T)=A.*1e7*exp((-E_a/R)./(T*5+273.15))
    end
end

ax = subplot(1,1,1);
j=273.15+5:5:273.15+50;

for m=1:1:10
    plot (ax,j,K(m,:))
    hold (ax,'on')
end

```

```
hold (ax,'off')
xlabel ('Variación de T')
ylabel ('Variación de K')
title ('Variación de A en el modelo de Arrhenius')
lgd = legend ('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7')
title (lgd,'A')
```

A2. Código cálculo de la presión máxima generada en el biodigestor

```
% Vmed=Vn*(Pn/Pmed)*(Tmed/Tn) Volumenmedido
Tn=273.15; %Temperatura en condiciones normales en K
Vn=22.4; %Volumen en condiciones normales en L
Pn=101325; %Presión en condiciones normales en Pa
Tmed=323.15; %Temperatura máxima de trabajo en K
Vmed=5184600; %Volumen de biogás producido diariamente en L
```

```
Pmed=Vn*(Pn/Vmed)*(Tmed/Tn);
P_max=Pmed; %Presión máxima generada en el biodigestor en Pa
```

A3. Código modelo matemático para determinar la presión en el biodigestor

```
%{
MODELO PARA DETERMINAR LA PRESIÓN EN EL BIODIGESTOR
Presion=P_max*(1-exp^(-t*K))
Presion=Presión en el interior del biodigestor para cualquier instante de tiempo [t]
P_max=Máxima presión generada en el biodigestor en Pa
t=Tiempo en s
K=Constante de velocidad en s^(-1)
%}
```

```
for A=1:1:10
for T=1:1:10
for t=1:1:2592000
Presion(A,T,t)=P_max*(1-exp(-t.*K(A,T)));
end
end
end
```

```
t=1:1:2592000;
```

```
ax1 = subplot(1,2,1);
```

```
for m=1:1:10
```

```
    Presion1 = reshape(Presion(m,1,:),[1,2592000]);
```

```
    plot(ax1,t,Presion1)
```

```
    hold(ax1,'on')
```

```
end
```

```
hold(ax1,'off')
```

```
xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylabel('Presión [Pa]')
```

```
title('Variación de la presión en función de A a T=278.15 [K]')
```

```
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
```

```
title(lgd,'A')
```

```
ax2 = subplot(1,2,2);
```

```
for m=1:1:10
```

```
    Presion1 = reshape(Presion(m,2,:),[1,2592000]);
```

```
    plot(ax2,t,Presion1)
```

```
    hold(ax2,'on')
```

```
end
```

```
hold(ax2,'off')
```

```
xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylabel('Presión [Pa]')
```

```
title('Variación de la presión en función de A a T=283.15 [K]')
```

```
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
```

```
title(lgd,'A')
```

```
ax3 = subplot(1,2,1);
```

```
for m=1:1:10
```

```
    Presion1 = reshape(Presion(m,3,:),[1,2592000]);
```

```
    plot(ax3,t,Presion1)
```

```
    hold(ax3,'on')
```

```
end
```

```
hold(ax3,'off')
```

```
xlabel('Tiempo [s]')
```

```
ylabel('Presión [Pa]')
```

```
title('Variación de la presión en función de A a T=288.15 [K]')
```

```
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
```

```
title(lgd,'A')
```

```

ax4 = subplot(1,2,2);
for m=1:1:10
    Presion1 = reshape(Presion(m,4,:),[1,2592000]);
    plot(ax4,t,Presion1)
    hold(ax4,'on')
end

hold(ax4,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Presión [Pa]')
title('Variación de la presión en función de A a T=293.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax5 = subplot(1,2,1);
for m=1:1:10
    Presion1 = reshape(Presion(m,5,:),[1,2592000]);
    plot(ax5,t,Presion1)
    hold(ax5,'on')
end

hold(ax5,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Presión [Pa]')
title('Variación de la presión en función de A a T=298.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax6 = subplot(1,2,2);
for m=1:1:10
    Presion1 = reshape(Presion(m,6,:),[1,2592000]);
    plot(ax6,t,Presion1)
    hold(ax6,'on')
end

hold(ax6,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Presión [Pa]')
title('Variación de la presión en función de A a T=303.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

```

```

ax7 = subplot(1,2,1);
for m=1:1:10
    Presion1 = reshape(Presion(m,7,:),[1,2592000]);
    plot(ax7,t,Presion1)
    hold(ax7,'on')
end

hold(ax7,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Presión [Pa]')
title('Variación de la presión en función de A a T=308.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax8 = subplot(1,2,2);
for m=1:1:10
    Presion1 = reshape(Presion(m,8,:),[1,2592000]);
    plot(ax8,t,Presion1)
    hold(ax8,'on')
end

hold(ax8,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Presión [Pa]')
title('Variación de la presión en función de A a T=313.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax9 = subplot(1,2,1);
for m=1:1:10
    Presion1 = reshape(Presion(m,9,:),[1,2592000]);
    plot(ax9,t,Presion1)
    hold(ax9,'on')
end

hold(ax9,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Presión [Pa]')
title('Variación de la presión en función de A a T=318.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax10 = subplot(1,2,2);
    
```

```

for m=1:1:10
    Presion1 = reshape(Presion(m,10,:),[1,2592000]);
    plot(ax10,t,Presion1)
    hold(ax10,'on')
end

hold(ax10,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Presión [Pa]')
title('Variación de la presión en función de A a T=323.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

```

A4. Código modelo matemático para determinar el volumen del gas al interior del biodigestor

% MODELO PARA DETERMINAR EL VOLUMEN DEL GAS AL INTERIOR DEL BIODIGESTOR

```

% Volumen=(Vn*Pn)*(T/Tn)/(Pa+Presion)
% Volumen=Volumen de gas generado en el biodigestor para cualquier instante
de tiempo [t]
% Presion=Presión en el interior del biodigestor para cualquier instante de tiempo
[t]
% T=Temperatura del proceso en K
Pa=0; % Presión atmosférica en Pa
Tn=273.15; %Temperatura en condiciones normales en K
Vn=22.4; %Volumen en condiciones normales en L
Pn=101325; %Presión en condiciones normales en Pa

```

```

for A = 1:1:10
for T=1:1:10
for t=1:1:2592000
volumen(A,T,t)=(Vn*Pn).*((T*5+273.15)/Tn)./(Pa+Presion(A,T,t));
end
end
end

```

```
t=1000000:1:2592000;
```

```
ax11 = subplot(1,2,1);
```

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
 PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
 MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

```
for m=1:1:10
    volumen1 = reshape(volumen(m,1,1000000:2592000),[1,1592001]);
    plot(ax11,t,volumen1)
    hold(ax11,'on')
end
```

```
hold(ax11,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Volumen [L]')
title('Variación del volumen en función de A a T=278.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')
```

```
ax12 = subplot(1,2,2);
for m=1:1:10
    volumen1 = reshape(volumen(m,2,1000000:2592000),[1,1592001]);
    plot(ax12,t,volumen1)
    hold(ax12,'on')
end
```

```
hold(ax12,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Volumen [L]')
title('Variación del volumen en función de A a T=283.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')
```

```
ax13 = subplot(1,2,1);
for m=1:1:10
    volumen1 = reshape(volumen(m,3,1000000:2592000),[1,1592001]);
    plot(ax13,t,volumen1)
    hold(ax13,'on')
end
```

```
hold(ax13,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Volumen [L]')
title('Variación del volumen en función de A a T=288.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')
```

```
ax14 = subplot(1,2,2);
for m=1:1:10
```


F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
 PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
 MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

```

volumen1 = reshape(volumen(m,4,1000000:2592000),[1,1592001]);
plot(ax14,t,volumen1)
hold(ax14,'on')
end

hold(ax14,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Volumen [L]')
title('Variación del volumen en función de A a T=293.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax15 = subplot(1,2,1);
for m=1:1:10
    volumen1 = reshape(volumen(m,5,1000000:2592000),[1,1592001]);
    plot(ax15,t,volumen1)
    hold(ax15,'on')
end

hold(ax15,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Volumen [L]')
title('Variación del volumen en función de A a T=298.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax16 = subplot(1,2,2);
for m=1:1:10
    volumen1 = reshape(volumen(m,6,1000000:2592000),[1,1592001]);
    plot(ax16,t,volumen1)
    hold(ax16,'on')
end

hold(ax16,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Volumen [L]')
title('Variación del volumen en función de A a T=303.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax17 = subplot(1,2,1);
for m=1:1:10
    volumen1 = reshape(volumen(m,7,1000000:2592000),[1,1592001]);
  
```

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
 PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
 MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

```

plot(ax17,t,volumen1)
hold(ax17,'on')
end

hold(ax17,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Volumen [L]')
title('Variación del volumen en función de A a T=308.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax18 = subplot(1,2,2);
for m=1:1:10
    volumen1 = reshape(volumen(m,8,1000000:2592000),[1,1592001]);
    plot(ax18,t,volumen1)
    hold(ax18,'on')
end

hold(ax18,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Volumen [L]')
title('Variación del volumen en función de A a T=313.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax19 = subplot(1,2,1);
for m=1:1:10
    volumen1 = reshape(volumen(m,9,1000000:2592000),[1,1592001]);
    plot(ax19,t,volumen1)
    hold(ax19,'on')
end

hold(ax19,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Volumen [L]')
title('Variación del volumen en función de A a T=318.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')

ax20 = subplot(1,2,2);
for m=1:1:10
    volumen1 = reshape(volumen(m,10,1000000:2592000),[1,1592001]);
    plot(ax20,t,volumen1)

```

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

```
hold(ax20,'on')
end
```

```
hold(ax20,'off')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Volumen [L]')
title('Variación del volumen en función de A a T=323.15 [K]')
lgd = legend('1e7','2e7','3e7','4e7','5e7','6e7','7e7','8e7','9e7','10e7');
title(lgd,'A')
```

A5. Código para determinar la producción biogás en el biodigestor

```
%{
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL BIODIGESTOR
Q_biogas=RSU*MO_rsu*P_biogas
Q_biogas= Produccion de biogás en el biodigestor en m3/día
RSU= Cantidad de residuos solidos generados en kg/día
MO_rsu= Porcentaje de materia orgánica de los residuos sólidos
P_biogas= Potencial de biogás en m3/kg
%}

clc

RSU=195701.53; % Unidades kg/día
MO_rsu=0.4014;
P_biogas=0.066; % Unidades m3/kg

Q_biogas=RSU*MO_rsu*P_biogas%Unidades m3/día
```

A6. Código para determinar el potencial de generación de energía

```
%{
POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
E_total=Q_biogas*C_metano*PCI_metano
E_total= Energía disponible en kWh/día
C_metano= Fracción porcentual de metano presente en el biogás
PCI_metano= Poder calorífico del metano en kWh/m3
P_nom= Potencia disponible en kW
P_elec= Potencia eléctrica en kW
```

Efic_elec= Eficiencia eléctrica
E_elec_anual= Energía eléctrica anual en kW
F_cap= Factor de diseño
HA= Número total de horas por año en h/año
%}

C_metano=0.65;
PCI_metano=9.96; %Unidades en kWh/m³
Efic_elec=0.40;
F_cap=0.90;
HA=8760; %Unidades h/año

E_total=Q_biogas*C_metano*PCI_metano% Unidades en kWh/día
P_nom=E_total/24 % Unidades en kW
P_elec=P_nom*Efic_elec% Unidades en kW

E_elec_anual=P_elec*F_cap*HA % Unidades en kWh/año

Anexo B. Algoritmo en Matlab desarrollado para el motor de combustión

```
% Rendimiento volumétrico del ciclo Otto
% Ecuación de la gráfica
% P1=241.2/101325; %valor de presión al cual estará sometida la mezcla antes
P1=1;

% de entrar al cilindro motor
V1=2.4175; %volumen máximo del cilindro es un parámetro que limita la cantidad

% de mezcla que entra al cilindro y es propio de cada motor
T1=300; %Temperatura inicial de la mezcla aire-combustible antes de entrar

% al cilindro del motor
R=0.08205746; %[atm-L/mol-K] constante universal de los gases
w_rpm=1800; %vueltas nominales en que gira el motor
AFR=25; %relación aire combustible permite conocer la proporción de aire y

% combustible que están entrando al cilindro del motor.
m_molar_aire=28.966; %[g/mol] masa molar del aire
n_w=5e-12*w_rpm.^3-1e-7*w_rpm.^2+0.0005*w_rpm;

% cálculo del número de moles del sistema
n=(P1*V1*n_w)/(R*T1);
m_aire_g=n*m_molar_aire; %masa del aire

% AFR factor lambda, designa la proporción aire-combustible (en peso) en
% forma de mezcla que entra al cilindro de un motor de ciclo Otto
m_comb=m_aire_g/AFR; %masa del combustible
nR=n*R;
w_rad_s=w_rpm*(2*pi/60);

% este bloque tiene como salidas:
% w_rad_s: frecuencia angular en [rad/s]
% nR: constabtenR
% m_comb: masa del combustible en gramos
% m_aire_g: masa del aire en gramos

% bloque de temperatura de post compresión
cp=2.22;
cv=1.6;
k=cp/cv; % constante de evolución politrópica k=cp/cv y p es la relación de
compresión
```

% del motor de combustión interna y se define
 $\rho = V_2/V_1$; % relación de compresión del motor
 $\rho = 10.3$;
 $T_2 = T_1 * (\rho)^{(k-1)}$;

% bloque aporte calorífico
 $PCI_{gas} = 4335.5$; % [Kcal/m]
 $n_{comb} = 2e-17 * w_{rpm}^5 - 2e-13 * w_{rpm}^4 + 9e-10 * w_{rpm}^3 - 2e-6 * w_{rpm}^2 + 0.0021 * w_{rpm}$;
 $Q = m_{comb} * PCI_{gas} * n_{comb}$;
 $\Delta T = Q / ((m_{comb} + m_{aire_g}) * cv)$;
 $T_3 = T_2 + \Delta T$; % temperatura al inicio de la expansión


% bloque trabajo de compresión
 $W_c = (nR * T_1) * (\rho^{(k-1)} - 1) / (k-1)$;

% bloque trabajo expansión
 $k_e = k$;
 $W_e = (nR * T_3) * (\rho^{(1-k_e)} - 1) / (1-k_e)$;

% bloque cálculo de potencia
 $N_{cilindros} = 4$;
 $WT = W_c + W_e$; % [atm.m]

% Conversión a [J]
 $W_f = WT * (101.32)$; % [J]
 $P = W_f * N_{cilindros} * w_{rad_s}$; % [J/s]
 $P_{mec} = P / 746$

AnexoC. Certificado de cumplimiento de la consultoría con Biota




CERTIFICA

Que **LUIS OMAR SARMIENTO ÁLVAREZ** con cédula de ciudadanía **91.267.002** de Bucaramanga, director del grupo de investigación **DIANCIA**, **FREDY ALBERTO ROJAS ESPINOZA** identificado con cédula de ciudadanía **91.078.107** de San Gil, docente del semillero **GITEDI** adscrito al **Grupo de Investigación en Ingenierías y Ciencias Sociales - DIANCIA** de las Unidades Tecnológicas de Santander regional Barrancabermeja, y con el apoyo de los estudiantes **KEVIN MIGUEL SABALZA MARTÍNEZ** identificado con cédula de ciudadanía **1.096.238.827** de BARRANCABERMEJA y **RICHARD FERNANDO SANCHEZ GALVIS** identificado con cédula de ciudadanía **1.096.212.768** de Barrancabermeja, integrantes del semillero de investigación **GITEDI** adscrito al grupo de investigación en Ingenierías y Ciencias Sociales - **DIANCIA**, presentaron una propuesta denominada, "**Desarrollo de un sistema de generación de energía eléctrica renovable a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) simulado mediante la herramienta de software Matlab/simulink como alternativa ambiental y energética sostenible en Barrancabermeja**" el 2 de septiembre de 2020.

Esta propuesta es aceptada por la institución, puesto que posee la calidad que se requiere. De acuerdo al estudio generaría grandes beneficios económicos, financieros y ambientales a la institución y a la ciudad de Barrancabermeja.

La presente certificación se expide a solicitud del interesado a los 22 días del mes de septiembre de 2020



ANDRÉS CAMILO PARADA RUEDA
Gerente General

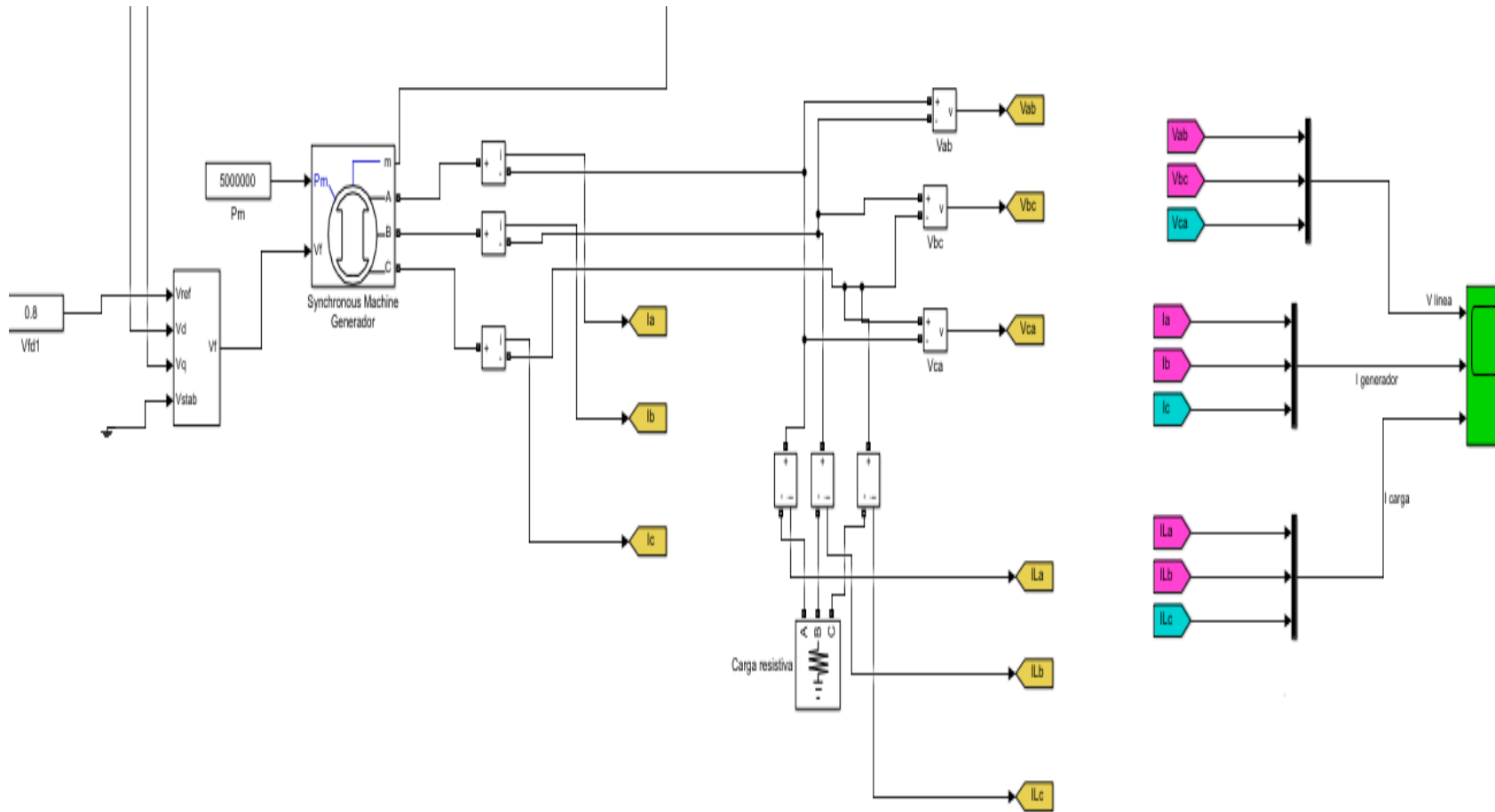
Tel.: (7)6020420 - Oficina principal Km 1.8 vía Betón - Aeropuerto, Barrancabermeja, Santander

www.biota56.com

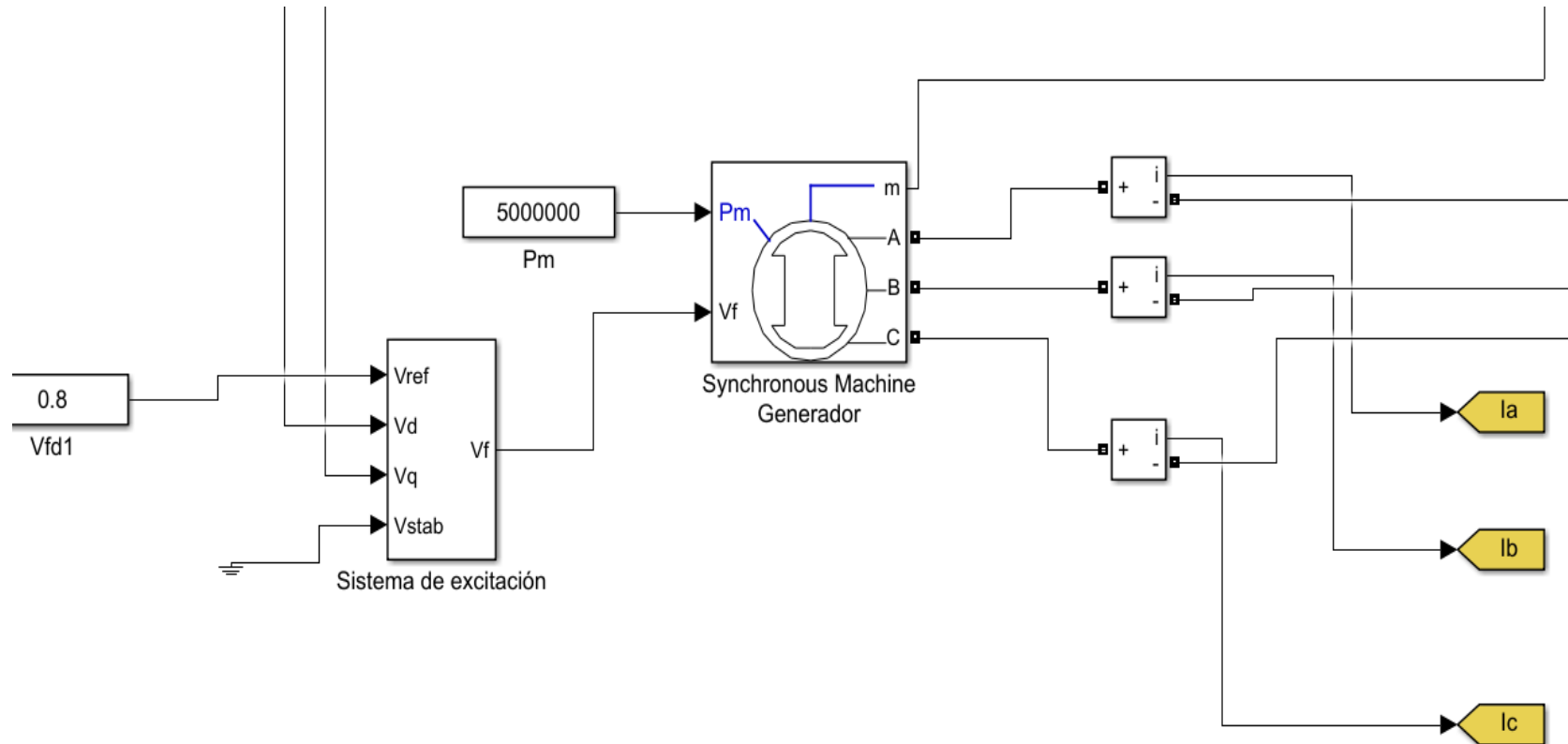
Anexo D. Modelo del motor de combustión interna



Anexo E. Modelo del motogenerador de electricidad



Anexo F. Modelo de la máquina sincrónica



Anexo G. Carga resistiva y medidores de corriente y voltaje en línea y corriente de carga por fase

