

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Simulación de biodigestión anaerobia para obtener biogás empleando la fracción orgánica de residuos sólidos para propuesta técnico/económica de planta piloto

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentada por Fernando Rafael Fortuny Wug para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química Industrial

Guatemala

2022

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



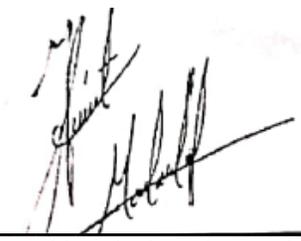
Simulación de biodigestión anaerobia para obtener biogás empleando la fracción orgánica de residuos sólidos para propuesta técnico/económica de planta piloto

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentada por Fernando Rafael Fortuny Wug para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química Industrial

Guatemala

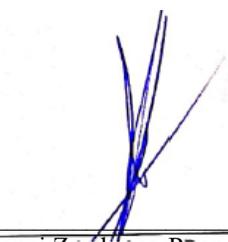
2022

Vo.Bo. Asesor:



(f) _____
Ing. Héctor Aroldo Maldonado de León – Col. 2530

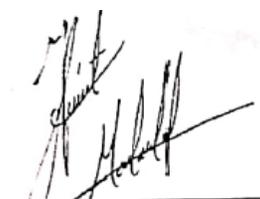
Tribunal Examinador:



(f) _____
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Rūano – Col. 686



(f) _____
Ing. Carmen Alicia Ortíz Pineda – Col. 693



(f) _____
Ing. Héctor Aroldo Maldonado de León – Col. 2530

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de junio de 2022

Prefacio

Este trabajo es el inicio y fin de una etapa en mi vida profesional, la cual hace 6 años no tenía tan clara como lo tengo ahora. Durante este tiempo adquirí conocimientos sobre los procesos químicos en la industria y cómo poder mejorarlos utilizando distintas estrategias. Pero la que mayor captó mi atención fue el uso de simuladores para poder modelar un proceso real. Al existir una gran cantidad de residuos sólidos orgánicos en Guatemala me pareció una buena idea buscar una forma de aprovechar estos materiales para la generación de energía y productos de valor. Es por esto que decidí investigar el proceso de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos realizando un modelo en el software SuperPro Designer®. Donde pude aplicar los conceptos y técnicas adquiridas en la carrera para poder aportar un poco al mejor manejo de residuos sólidos en el país. Su adecuada gestión puede traer grandes beneficios a toda la población del país generando nuevos trabajos sobre investigación e implementación de plantas de biogás en Guatemala.

Este estudio se limitó a la elaboración del modelo modular secuencial en el software SuperPro Designer® incluyendo las principales reacciones en el digestor sin tomar en cuenta la cinética por limitaciones del programa. Se incluyó el pretratamiento de los residuos y un postratamiento para aumentar el valor del producto generado. Por esto, este informe puede ser la base para un estudio a mayor detalle utilizando otras herramientas que permitan describir de mejor manera el comportamiento microbiano del reactor y el proceso.

Ahora bien, todo lo incluido en este proyecto no hubiera sido posible sin el arduo esfuerzo y soporte de mi familia. Ya que sin ellos no hubiera podido pertenecer a esta increíble casa de estudios, la cual me abrió las puertas y me consideró como uno de los suyos. Agradezco a Héctor Maldonado por compartir su sabiduría y tiempo para asesorar este trabajo, que a pesar de las responsabilidades varias del día a día a su cargo, él siempre estuvo ahí para apoyarme en todo momento. A cada uno de los catedráticos de la carrera, que tuvieron la paciencia y energía para compartir no solo conmigo, sino que, con todos mis compañeros, los conceptos y prácticas sobre ingeniería química e industrial, que sin estos no podría entender como lo hago ahora los maravillosos procesos que ocurren a nuestro alrededor. A la Universidad del Valle de Guatemala y al departamento de Ingeniería Química por compartir sus recursos e instalaciones para la investigación y finalmente a Guatemala por ser el país en donde nací y me forme como persona y profesional, para que a futuro pueda seguir aportando para su desarrollo junto a los demás guatemaltecos.

Índice

Listado de tablas	iii
Listado de figuras.....	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
I. Introducción	1
II. Objetivos	2
A. Generales.....	2
B. Específicos	2
III. Justificación	3
IV. Marco teórico.....	4
V. Antecedentes	16
VI. Metodología	18
VII. Resultados.....	27
VIII. Análisis de resultados.....	32
IX. Conclusiones	35
X. Recomendaciones	36
XI. Bibliografía	37
XII. Anexos	39
XIII. Glosario.....	64

Listado de tablas

Tabla 1. Efecto de la temperatura en el rendimiento de biogás obtenido en la digestión anaerobia.	7
Tabla 2. Efecto del tiempo de residencia de sólidos en el rendimiento de biogás obtenido en la digestión anaerobia.	7
Tabla 3. Rendimiento máximo para distintos sustratos en digestión anaerobia.....	11
Tabla 4. Análisis de error de resultado experimental y bibliografía de plantas de biogás con respecto a la tasa interna de retorno del proyecto.	24
Tabla 5. Análisis de error para el rendimiento de metano de la simulación contra los valores reportados en la literatura.....	25
Tabla 6. Rendimiento de la producción de biogás y biofertilizante.....	27
Tabla 7. Inversión de capital inicial del proyecto de 8 reactores por secciones (en miles de Quetzales)	27
Tabla 8. Costos de operación anual de la planta de biogás con 8 reactores.....	27
Tabla 9. Periodo de retorno de la inversión para planta de biogás y otros indicadores para 8 reactores.	28
Tabla 10. Inversión de capital inicial del proyecto para 1 reactor por secciones (en miles de Quetzales)	29
Tabla 11. Costos de operación anual de la planta de biogás con 1 reactor.	29
Tabla 12. Periodo de retorno de la inversión para planta de biogás y otros indicadores para 1 reactor.	30
Tabla 13. Composición de metano en el biogás después de purificación	30
Tabla 14. Composición de los desechos de alimentos utilizados en la corriente de entrada del simulador.....	47
Tabla 15. Composición de corriente de entrada principal al proceso de digestión anaerobia modalidad “seca” para ocho reactores.	47
Tabla 16. Composición de corriente de entrada principal al proceso de digestión anaerobia modalidad “seca” para un reactor.	47
Tabla 17. Inversión de capital inicial del proyecto por secciones para ocho reactores extraído de SuperPro Designer ® (en dólares estadounidenses).	49
Tabla 18. Inversión de capital inicial del proyecto por secciones para un reactor (en dólares estadounidenses).	49
Tabla 19. Costos de operación de la planta de biogás para ocho reactores (en dólares estadounidenses).	49
Tabla 20. Costos de operación de la planta de biogás para un reactor (en dólares estadounidenses).	50
Tabla 21. Desglose del Flujo de efectivo para planta con 8 reactores (en miles de quetzales).....	51
Tabla 22. Desglose del Flujo de efectivo para planta con 1 reactor (en miles de quetzales)	52
Tabla 23. Periodo de retorno de la inversión para planta de biogás con ocho reactores y otros indicadores (en dólares estadounidenses).	53

Tabla 24. Periodo de retorno de la inversión para planta de biogás con un reactor y otros indicadores (en dólares estadounidenses).	53
Tabla 25. Costo de los equipos utilizados en la planta de Digestión anaerobia con 8 reactores....	53
Tabla 26. Costo de los equipos utilizados en la planta de digestión anaerobia con 1 reactor.....	54
Tabla 27. Relaciones de costos de inversión inicial para la Planta de Biogás en SuperPro Designer ®.	54
Tabla 28. Costos de la Mano de Obra para la planta de biogás en Guatemala	55
Tabla 29. Comparación entre nutrientes en el biofertilizante obtenido del simulador y los indicados por el acuerdo gubernativo 342-2010.	55
Tabla 30. Datos básicos de las unidades de operación utilizadas en el simulador.....	55
Tabla 31. Continuación de datos básicos de las unidades de operación utilizadas en el simulador de digestión anaerobia.....	56
Tabla 32. Propiedades físicas básicas de los componentes ingresados.....	57
Tabla 33. Propiedades críticas de los componentes ingresados	58
Tabla 34. Composición de las mezclas ingresadas al simulador.....	59
Tabla 35. Corridas variando el flujo de alimentación en la planta de biogás y su efecto en las variables técnicas y económicas del proceso.	59
Tabla 36. Reacciones utilizadas en el digestor anaerobio en Super Pro Designer ®.....	63

Listado de figuras

Figura 1. Composición general de los residuos y desechos sólidos comunes en Guatemala.....	5
Figura 2. Grupos de bacterias presentes en las etapas de digestión anaerobia.....	8
Figura 3. Configuraciones de reactores anaerobios en seco vertical y horizontal.	10
Figura 4. Diagrama del proceso en SPD para un estudio empleando desechos alimenticios en digestión anaerobia.	17
Figura 5. Diagrama del pretratamiento de residuos sólidos	20
Figura 6. Diagrama de digestión anaerobia de residuos sólidos	20
Figura 7. Diagrama de sección de separación y tratamiento de digestato.....	21
Figura 8. Diagrama de purificación de biogás	21
Figura 9. Flujo de caja a 15 años del proyecto de planta de biogás con 8 reactores (en miles de Quetzales)	28
Figura 10. Flujo de caja a 15 años del proyecto de planta de biogás con 1 reactor (en miles de Quetzales)	29
Figura 11. Tasa interna de retorno contra volumen de agua requerido para purificación del biogás.	30
Figura 12. Relación entre energía eléctrica producida y consumida durante escalamiento de planta de biogás.	31
Figura 13. Diagrama completo del proceso de digestión anaerobia en SuperPro Designer ®.	45
Figura 14. Balance de masa para el digestor anaerobio en modalidad seca en Microsoft Excel ®.	48
Figura 15. Balance de masa y energía para el motor-generador del proceso en Microsoft Excel ®.	48
Figura 16. Flujo de caja a 15 años del proyecto de planta de biogás para ocho reactores.	50
Figura 17. Flujo de caja a 15 años del proyecto de planta de biogás para un reactor.	51
Figura 18. Análisis de sensibilidad de VPN en dólares estadounidenses vs alimentación.	60
Figura 19. Análisis de sensibilidad de costo de operación anual en dólares vs alimentación.....	60
Figura 20. Análisis de sensibilidad de VPN en quetzales vs alimentación.....	61
Figura 21. Análisis de sensibilidad de costo de operación anual en quetzales vs alimentación. ...	61
Figura 22. Análisis de sensibilidad de periodo de recuperación vs alimentación.....	62

Resumen

En este estudio se realizó una simulación de biodigestión anaerobia para producir biogás empleando la fracción orgánica de residuos sólidos utilizando el software SuperPro Designer®. Con el propósito de obtener una composición de metano entre 50-65% (v/v), llegar a concentraciones de azufre permisibles para su segura combustión y presentar los parámetros económicos básicos para una planta piloto. Se desarrolló el diagrama del proceso en el programa dividido en las secciones de pretratamiento, digestión, tratamiento de lodos y purificación del biogás para su uso en un motor de combustión interna acoplado a un generador eléctrico. Se obtuvo un período de recuperación de 1.33 años, una inversión inicial de 49.33 millones de quetzales (MQ), costo de operación de MQ 11.85 y un flujo de efectivo del proyecto a 15 años con flujos positivos desde el cuarto año, para un proceso donde el biogás producido posee una composición final de metano de 59.06% v/v. Estos resultados se obtuvieron con el supuesto de una composición de la materia prima de 55% m/m carbohidratos, 26% m/m proteínas y 19% m/m lípidos. Con estos datos se cumplieron los objetivos propuestos de evaluar técnica y económicamente el proyecto. Finalmente, se recomienda realizar pruebas experimentales del proceso para poder validar el modelo. Además, al incluir la cinética de las reacciones involucradas utilizando otros softwares capaces de manejar los modelos necesarios, así como contar con la caracterización de los residuos alimenticios en Guatemala en términos de carbohidratos, proteínas y lípidos mejorarían la exactitud de los resultados a obtener.

Abstract

In this study, a simulation of an anaerobic digestion process for obtaining biogas from the organic fraction of solid waste using the SuperPro Designer® software was set up. The goals included reaching a methane composition between 50-65% (v/v), permissible sulfur concentration for the safe combustion of the biogas, and providing the basic economic parameters for a pilot plant. The process flowsheet that was developed is divided into the sections of pretreatment, digestion, sludge treatment, and biogas purification for its use in an internal combustion engine coupled with an electricity generator. A payback time of 1.33 years, an CAPEX of 49.33 million quetzals (MQ), an OPEX of MQ 11.85 and a cash flow of the project at 15 years with positive flows from the fourth year were obtained. This corresponds to a scenario in which a biogas with a methane composition of 59.06% v/v is obtained. These results were found by assuming a feedstock composition of 55% m/m carbohydrates, 26% m/m protein, and 19% m/m lipids. With this data, the project goals for evaluating the project, both, technically and economically were fulfilled. To conclude, it is recommended that experimental tests must be carried out for model validation purposes. Additionally, implementing reaction kinetics by using other software capable of handling such models, and having the characterization of the food waste in Guatemala might improve the accuracy of the results.

I. Introducción

La producción de desechos sólidos ha crecido considerablemente los últimos años en todo el mundo. Junto a esto, la investigación sobre sus formas de tratamiento y aprovechamiento han evolucionado, encontrando maneras de producir energía utilizando la fracción orgánica de estos residuos en un proceso donde se descompone este material y como resultado se obtiene un combustible renovable. La digestión anaerobia es un proceso que se ha utilizado exitosamente en varias regiones de Asia y Europa empleando los residuos sólidos orgánicos de diferentes fuentes. Este proceso permite su transformación en biogás y biofertilizante. En Guatemala, la población ha incrementado rápidamente los últimos años y con ella la utilización de productos de consumo masivo. De estos, una gran parte no se consume y termina en vertederos donde no son aprovechados. Dicho esto, existe la oportunidad para que el país considere el uso de estos desechos para poder reducir el consumo de combustibles fósiles y basarse en una fuente de energía renovable. La finalidad del presente trabajo es elaborar un estudio técnico-económico sobre la digestión anaerobia de los residuos sólidos orgánicos para la producción de biogás, utilizando el software de simulación de procesos SuperPro Designer ®. Herramientas como esta permiten obtener los requerimientos técnicos y económicos de una planta de biogás que facilite la evaluación de distintos escenarios en donde el proyecto sea rentable y sostenible. Este informe incluye los objetivos planteados en el estudio, un resumen de los principios asociados al proceso a simular, los resultados de la simulación al igual que su análisis, conclusiones y recomendaciones.

Dicho todo lo anterior, se desarrolló un modelo que simula el proceso de digestión anaerobia incluyendo las fases de pretratamiento, degradación de materia orgánica, tratamiento de lodos y purificación del biogás para su posterior uso en la producción de electricidad. Se evaluaron diferentes escenarios aumentando la cantidad de reactores hasta el punto en el que el proyecto presentara resultados económicos rentables con las condiciones y supuestos establecidos en el estudio. El modelo requiere de la caracterización de los residuos en carbohidratos, proteínas y grasas, pero para el caso de Guatemala no se cuenta con dicha información, por lo tanto, se asumió una composición de 55% m/m de carbohidratos, 26% m/m de proteínas y 19% m/m de lípidos. Con base en esto, se obtuvo una composición del 59.06% (v/v) de metano en el biogás empleando 0.653 toneladas métricas (ton) / h de residuos orgánicos. El caso resultó rentable para el escenario de 8 reactores ya que presentó un período de recuperación de 1.33 años, una inversión inicial de 49.33 millones de quetzales (MQ), costo de operación de MQ 11.85 y un flujo de efectivo positivo de la planta a 15 años, con una tasa de cambio de 7.72 Q/U.S. \$. Las simplificaciones y suposiciones establecidas en este trabajo abren las puertas a estudios posteriores realizando pruebas experimentales del proceso junto a una caracterización de los residuos sólidos orgánicos del país para poder comparar con los resultados obtenidos actualmente. Finalmente, mejoras al modelo se incluyen como siguientes pasos: la incorporación de la cinética microbiana en el reactor para poder representar de manera más exacta el proceso de digestión anaerobia y evaluar cambios de temperatura y tiempos de residencia, entre otros factores.

II. Objetivos

A. Generales

Elaborar un modelo modular secuencial para la evaluación técnico-económica de una planta piloto para la producción de biogás empleando la fracción orgánica de residuos sólidos en Guatemala, implementando el programa de simulación de procesos SuperPro Designer®.

B. Específicos

- Elaborar un modelo modular secuencial de digestión anaerobia para la determinación del rendimiento en la producción de biogás empleando la fracción orgánica de residuos sólidos de Guatemala.
- Determinar la inversión de capital inicial, costos de producción, flujo de caja, y periodo de retorno de la inversión para el proceso empleando la herramienta de análisis económico del software para evaluar la rentabilidad del proyecto.
- Establecer los procesos de purificación necesarios para obtener una concentración de metano entre 50-65% del volumen total de biogás y con una concentración de sulfuro de hidrógeno permisible, para su aprovechamiento en la red eléctrica.

III. Justificación

El crecimiento poblacional ha dado origen a nuevos retos como la sobreproducción de alimentos y otros materiales que terminan como desechos sólidos debido a una mala administración de la cadena de suministro de estos productos. Considerando que dos de los pilares de la producción más limpia son la valorización interna y la minimización, se pueden aprovechar estos residuos como fuente de energía alternativa para disminuir el consumo de combustibles no renovables. Una solución que se ha desarrollado en los últimos años es la producción de biocombustibles utilizando material residual o biomasa que no se aprovechaba. Entre estos se encuentra el biogás, el cual es una mezcla de metano y otros gases generados por reacciones de degradación de materia orgánica catalizada por microorganismos en condiciones específicas de operación. Este proceso es bastante complejo y su estudio continúa hasta el día de hoy para comprender el comportamiento de los diferentes microorganismos involucrados en el proceso de descomposición y cómo estos responden a condiciones de operación, influyendo en los productos obtenidos.

Por lo tanto, se han desarrollado varios modelos matemáticos que permiten describir este comportamiento para poder realizar predicciones del proceso. Con los avances tecnológicos tan veloces hasta el día de hoy, una ventaja es contar con paquetes de software que permiten simular este proceso y estimar los parámetros técnicos y económicos para poder evaluar la implementación de una planta de este tipo. Dicho esto, se puede desarrollar un gemelo digital del proceso real, el cual es alimentado con los datos experimentales obtenidos con el sistema físico en el laboratorio o planta piloto. Al contar con esta información en el modelo digital, se pueden realizar simulaciones para estudiar el comportamiento resultante al variar parámetros clave, detectar mejoras en las operaciones y todo esto resulta en un conjunto de información de valor; que luego se puede aplicar al modelo físico. Por esto, se propone elaborar un modelo de simulación de la producción de biogás empleando la fracción orgánica de residuos sólidos para la evaluación de escenarios variando los parámetros más influyentes en el proceso y así poder fomentar el desarrollo de esta tecnología en el país y justificar la generación de la información de entrada necesaria para aplicar esta herramienta.

IV. Marco teórico

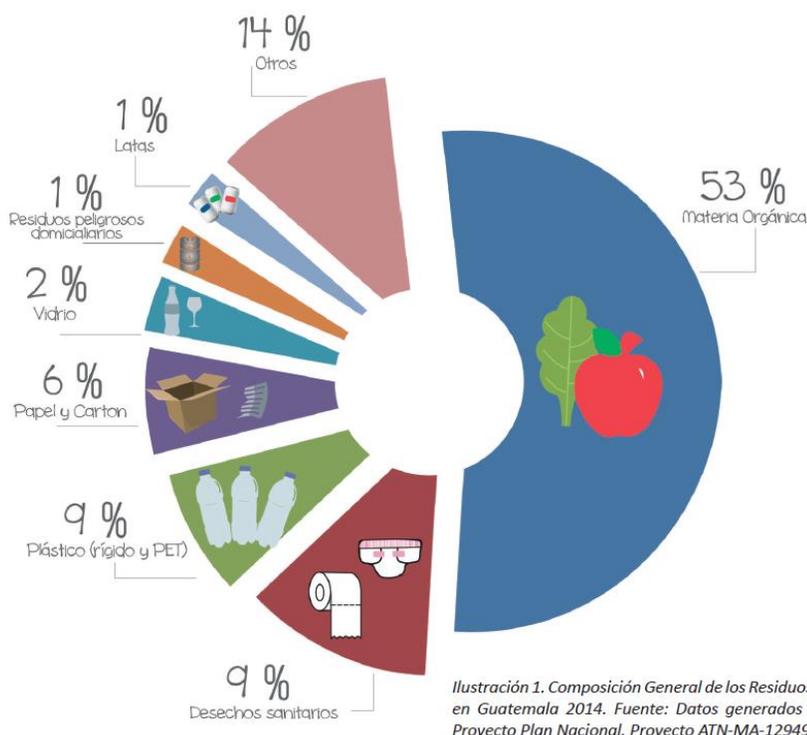
- Fracción orgánica de desechos sólidos urbanos y la importancia de su tratamiento:

La producción de desechos orgánicos está asociada al rápido crecimiento poblacional y a los nuevos estándares de vida en un mundo industrializado. Las formas en que se puede encontrar este material son en residuos caseros, desechos de jardinería, desechos forestales, heces humanas y animales, residuos de degolladeros y la fracción orgánica de los desechos sólidos municipales. Dichas fuentes deben ser tratadas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, además, en la intemperie estos materiales son descompuestos por actividad microbiana generando una sustancia líquida que contiene microbios, químicos y material degradado; el cual, si llega a un cuerpo de agua o se deposita en agua subterránea puede presentar un peligro para los seres vivos que la consumen. Dicho lo anterior, en países en vías de desarrollo se requiere el aprovechamiento de todos los recursos y materiales disponibles. Por tanto, el uso de los residuos orgánicos como materia prima para la producción de biocombustibles es una opción efectiva para aplicar las 3R (reducir, reciclar, reutilizar) y tomar acción contra los efectos causados por los combustibles fósiles, mitigar el cambio climático, reducir la dependencia de dicho recurso debido a su importación, promover la producción más limpia mediante el uso de fuentes renovables y locales (Korres, O’Kiely, Benzie & West, 2013).

En la Ciudad de Guatemala, el proceso de urbanización se ha acelerado llegando a tener 1.4 millones de habitantes, por lo que cuenta con uno de los vertederos de desechos sólidos más grandes de Latinoamérica ubicado en el centro de la ciudad. El mismo es considerado uno de los 50 más grandes del mundo. (González, 2020) Esto impacta el bienestar social, ambiental, económico y sanitario de los ciudadanos. Dicho vertedero recibe aproximadamente 300,000 toneladas de uso domiciliario, industrial y hospitalario, anualmente. Con el tiempo se ha acumulado una cantidad entre 6.3 a 9 millones de toneladas de basura; generando así 2,000 empleos informales por temas de reciclaje, comúnmente conocidos como “guajeros”. Ellos trabajan en condiciones inapropiadas clasificando la basura para su posterior comercialización. El origen de los desechos corresponde a las 22 zonas de la ciudad y de 1,700 municipios aledaños como Mixco, Chinautla, Santa Catarina Pinula, San Miguel Petapa, Villa Nueva, Villa Canales y San Pedro Sacatepéquez. El sistema de recolección se divide en 13.7% por la municipalidad de Guatemala, 71.3% por empresas privadas y 15% termina en basureros ilegales o son quemados al aire libre.

La identificación de estos desechos es una parte importante para su posterior tratamiento o aprovechamiento. En Guatemala la composición de estos se estima de 53% materia orgánica, 9% plásticos (rígido y PET), 6% papel y cartón, 2% vidrio y 1% latas. Al tener una clasificación apropiada desde el origen se contribuye a la recuperación y obtención de residuos de mejor calidad. Esto aumenta las posibilidades de ser incorporados en un proceso de reutilización o reciclaje.

Figura 1. Composición general de los residuos y desechos sólidos comunes en Guatemala.



Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2014

- Mercado energético y biogás en el mundo:

Los mercados energéticos a una escala global raramente siguen las reglas de una economía de mercado libre. La razón de esto es que el precio de la energía no se determina solamente por la oferta y demanda, sino que también por regulaciones políticas y gubernamentales. Un claro ejemplo de esto es que en la Unión Europea se han establecido requerimientos a nivel gubernamental para que la matriz energética de los países miembros esté conformada por fuentes renovables, como producir cierto porcentaje de la energía eléctrica a partir de restos alimenticios. De igual manera, el sistema de gestión de residuos sólidos en dicha región cuenta con recargos por emisión o incentivos por reducción de los gases de efecto invernadero a la atmósfera. A estas condiciones, se ha logrado promover la industria del biogás en las regiones de Europa y Asia. (Wellinger, Murphy, Baxter, 2013) Caso contrario ocurre en Guatemala, donde el sistema de gestión de residuos y la matriz energética no están lo suficientemente basados en este tipo de tecnologías. Por lo tanto, los desechos orgánicos no son separados apropiadamente del resto de sólidos y estos terminan acumulados en vertederos contaminando la atmósfera liberando metano por su descomposición y no existen penalizaciones o incentivos para cambiar dicho comportamiento.

- Digestión anaerobia y tecnología:

La digestión anaerobia es un proceso donde la materia orgánica (vegetal o animal) es descompuesta por microorganismos (bacterias) en ausencia de oxígeno y como resultado se obtienen productos útiles en la industria; como el biogás y fertilizantes. Este fenómeno ocurre de manera natural en vertederos, en lo profundo de los lagos y en los estómagos de los animales. A nivel más profesional, el proceso se aprovecha para poder capturar los gases producidos y utilizarlos en la industria o mercado energético. Dicho lo anterior, esta materia prima que puede ser: Estiércol, lodos, desechos de comida y cultivos energéticos; se coloca dentro de un contenedor cerrado llamado digestor. Dentro de este, las bacterias descomponen los materiales y esto libera un gas rico en metano denominado biogás. Este puede ser utilizado como combustible para generar calor y/o electricidad, además, para uso en vehículos o en la red eléctrica nacional después de su refinamiento. Así mismo, el material restante en el digestor, conocido como digestato, el cual es rico en nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) se utiliza como fertilizante inodoro y acondicionador de suelos. Este proceso algunos lo consideran como innovador, pero en realidad se viene utilizando desde el siglo XIX, pero no fue hasta los años 70's donde se comenzó a explotar el potencial energético de estas fuentes (Pullen, 2015).

El sustrato y sus características tienen un papel muy importante en la digestión anaerobia, ya que esto afecta en gran manera la calidad y cantidad del biogás obtenido. De los varios materiales mencionados anteriormente, estos se componen por una fracción sólida y otra líquida (humedad del material). La parte sólida puede ser muy simple como un solo compuesto o muy compleja siendo una mezcla de varios componentes sólidos. En cualquiera de los casos, el proceso no es 100% eficiente, por lo que parte de esta materia no se podrá degradar o convertir a los productos deseados. De los sólidos totales, los sólidos volátiles (VS, por sus siglas en inglés) son los que pueden transformarse mientras que el resto pasa desapercibido por los microorganismos. Dependiendo del tipo de materia prima se tienen distintas proporciones de los sólidos volátiles. Usualmente para desechos de comida de supermercados, se tiene un valor de 94% de sólidos volátiles de los sólidos totales presentes. (Moretti, 2021)

A nivel microbiológico, la digestión anaerobia se puede ordenar en pasos específicos en los cuales se van consumiendo y generando los componentes necesarios para llegar al producto final. En estas etapas participan distintos grupos de bacterias las cuales caracterizan cada etapa y se encargan de tareas específicas en el proceso. El primer grupo consta de las bacterias fermentativas e hidrolíticas. Las últimas hidrolizan el sustrato (reducen polímeros a monómeros) y las primeras fermentan los monómeros resultantes en un amplio conjunto de productos de fermentación. Algunos de los productos finales de esta etapa son ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, y compuestos con mayor número de carbonos como ácido propiónico, butírico y alcoholes. Luego siguen las bacterias acetogénicas que no podrían actuar si no se encuentran junto a otro grupo de bacterias distintas. Su función en el proceso de digestión es crucial debido a que estas convierten los intermediarios fermentativos en sustratos metanogénicos (hidrógeno, ácidos acéticos y dióxido de carbono).

Las bacterias metanogénicas se conforman del tipo hidrogenotróficas y acéticas. Las primeras utilizan el hidrógeno producido por las bacterias acetogénicas. En esta etapa el ácido propiónico, butírico, dióxido de carbono y los ácidos grasos de cadena larga son convertidos a metano y agua. El rendimiento de estas bacterias se ve afectado por la temperatura de operación del reactor. En la Tabla 1 podemos observar cómo afecta este parámetro al rendimiento de biogás obtenido, aumentando junto con la temperatura. De igual manera, el tiempo de residencia de los sólidos afecta de la misma manera al rendimiento como se observa en la Tabla 2. (Rocamora, *et al*, 2020)

Tabla 1. Efecto de la temperatura en el rendimiento de biogás obtenido en la digestión anaerobia.

	Mesófilas (35 °C)	Termófilas (45 °C)
Rendimiento de biogás (m³ CH₄ kg⁻¹ VS)	0.128	0.631

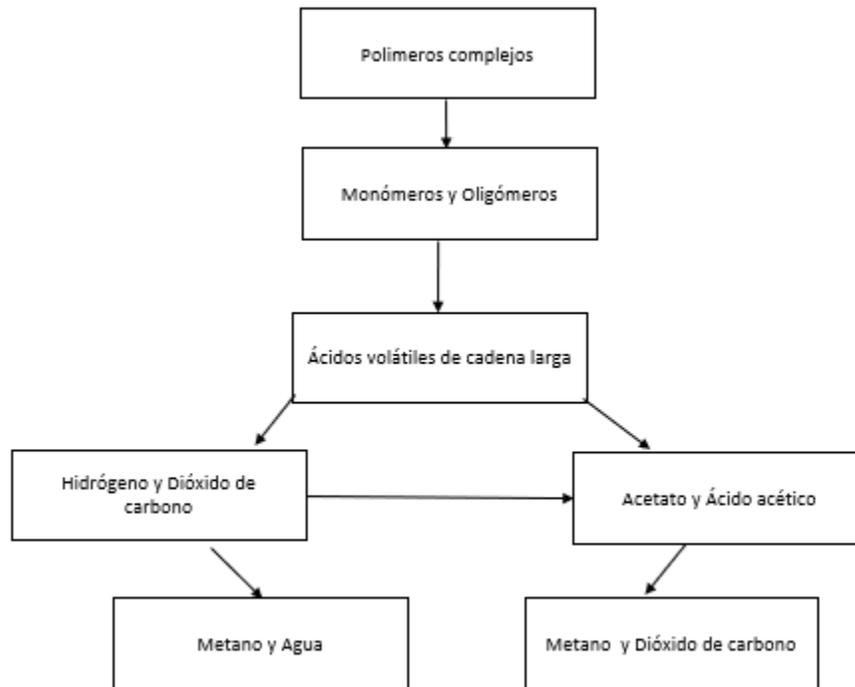
Fuente: Rocamora, *et al*, 2020

Tabla 2. Efecto del tiempo de residencia de sólidos en el rendimiento de biogás obtenido en la digestión anaerobia.

	Tiempo de retención de sólidos (días)	
	20	29
Rendimiento de biogás (m³ CH₄ kg⁻¹ VS)	0.128	0.631

Fuente: Rocamora, *et al*, 2020

Figura 2. Grupos de bacterias presentes en las etapas de digestión anaerobia.



Tomado de: Wellinger, Murphy, Baxter, 2013

La digestión anaerobia ha sido reconocida por su uso en el tratamiento de aguas residuales y desechos orgánicos industriales; y acorde con el párrafo anterior también ha tenido su presencia en la producción de bioenergía. Su producto principal, el biogás, contiene metano entre el 55% - 80%, dióxido de carbono en un 20% - 45% y el resto son rastros de otros gases como nitrógeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno en una relación volumen-volumen. Si este se purifica removiendo los componentes distintos al metano, el resultante puede ser utilizado en la red de gas natural para propósitos de calentamiento o uso vehicular. El uso del biogás en países en vías de desarrollo, como Guatemala, permitiría el calentamiento y cocción en áreas rurales. En países de Asia se tiene una gran cantidad de digestores (superando los 8 millones) y en ciertos países de Europa se utiliza hasta un 97% este tipo de energía como alternativa al gas natural y fuente para la generación de electricidad. Considerando que cada sustrato contiene características diferentes, se tiene una variedad de digestores dependiendo del contenido de sólidos secos (DS, por sus siglas en inglés), el número de etapas que implique, la temperatura de operación y el método de alimentación al sistema; que puede ser por lotes o continuo en estado “seco” para sustratos con alto contenido de sólidos, proceso por lotes secuenciales para la fracción orgánica de residuos sólidos municipales (OFMSW, por sus siglas en Inglés) y biorreactores tubulares de flujo continuo ascendente (UASB, por sus siglas en Inglés) (Korres, *et al*, 2013).

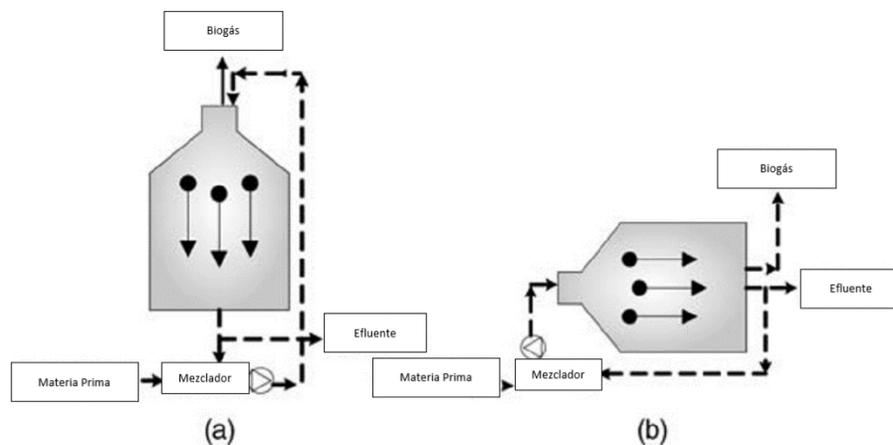
La digestión anaerobia en modalidad seca es comúnmente utilizada para tratar materiales con alto contenido de sólidos (20%-40% m/m). Siendo esto atractivo para el tratamiento de la fracción orgánica de desechos sólidos municipales o desechos agrícolas. Además ha presentado rendimientos de metano entre 0.2-0.6 m³ de metano por kg de sólidos volátiles dependiendo del sustrato a utilizar. A diferencia del proceso en modalidad húmeda, la digestión anaerobia en seco no requiere agitación interna. Lo anterior, ya que una parte del digestato se mezcla con la corriente de alimentación virgen para mezclar el contenido interno del reactor. Otras ventajas de la modalidad seca es un consumo menor de agua, mayores tasas de alimentación de materia orgánica y reducción en la abrasión dentro del reactor debido a la ausencia de partes móviles. Todos estos factores permiten trabajar con volúmenes de reactor menores, simplificar la operación de la planta y minimizar los residuos líquidos y pérdida de nutrientes en la etapa de pretratamiento de los residuos. Trabajando por lotes, el reactor es alimentado y la producción de gas inicia, aumenta, llega a su punto máximo, disminuye y luego termina. Al finalizar, el reactor se abre y se remueve aproximadamente la mitad del material orgánico, el resto sirve como inóculo. Las ventajas de trabajar por lotes consisten en su simplicidad, menor demanda energética y procesamiento de la materia prima.

En Guatemala, se han efectuado proyectos implementando biodigestores, como lo fue una compañía extractora de aceite de palma africana ubicada en Tecún Umán, San Marcos. Este actualmente aprovecha el biogás para generar electricidad para las plantaciones aledañas de banano en sustitución de motores diésel de las bombas de riego utilizando motores eléctricos. De igual manera, por parte de las granjas avícolas, bovinas y porcinas en el país se han implementado estas tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales generadas por la actividad animal; logrando independizarse energéticamente aprovechando la cantidad de biogás producido para las necesidades térmicas de las plantas. Otra aplicación de la digestión anaerobia en Guatemala se encuentra en la producción de etanol a partir de melaza o jugo de caña de azúcar. Esto genera entre 10 a 15 L de vinazas por litro de etanol producido. El tratamiento de este por medio de digestión anaeróbica presenta ventajas energéticas y ambientales. Ya que su aplicación reduce la carga orgánica de ácidos láctico y acético, glicerol y etanol principalmente y mantiene el contenido de nutrientes inorgánicos, los cuales son importantes para el fertirriego en los campos.

Otro sector fuerte en materia orgánica son los beneficios de café, los cuales generan efluentes con una carga de 303,750 kg de materia orgánica. Los cuales se pueden procesar y obtener, según la literatura, hasta 77,000 m³ de metano que es equivalente a 53,782 kWh de generación eléctrica durante la cosecha del grano. Otro ejemplo es la industria del hule natural de Guatemala, la cual produce y exporta caucho y látex concentrado. Su proceso emplea entre 20 a 30 m³ de agua por tonelada del producto; generando un efluente con compuestos orgánicos ricos en proteínas y nitrógeno amoniacal. Dicho lo anterior, se puede obtener una concentración de metano en el biogás alrededor del 72% (Universidad del Valle de Guatemala, 2017). Por otro lado, en las áreas rurales se tienen 50 biodigestores que operan utilizando desechos animales y humanos; los cuales se aprovechan para actividades como la cocina, calefacción y otros temas domésticos. La fracción sólida se emplea como fertilizante debido a su alto contenido de nutrientes. Acorde a esto, el estudio y propuesta de un sistema de aprovechamiento de los residuos orgánicos sólidos en Guatemala puede presentar buenos resultados en el sector industrial y agroindustrial (Barrios, 2013).

Los tipos de reactores que se pueden utilizar para este proceso varían dependiendo la forma de operación a la cual se desee trabajar. Para el diseño óptimo de estos se debe de tomar en cuenta todas las características posibles de la materia prima a utilizar. Aquí se incluyen el contenido de sólidos secos, volatilidad de los sólidos, biodegradabilidad, densidad, gravedad específica y tamaño de partícula. Los reactores pueden trabajar en seco o húmedo, por lotes o continuos y por una o más etapas de digestión. Los reactores en seco de tipo continuo tienden a ser del tipo flujo de pistón o PFR (por sus siglas en inglés). En estos sistemas el sustrato es introducido por una de las entradas del reactor y fluye hacia su interior sin necesidad de mezclado. El sustrato virgen se inocula por una recirculación del flujo de salida. Si el tubo es lo suficientemente largo, todos los sólidos volátiles se degradarán al llegar al otro extremo del reactor. Estos reactores pueden ser verticales u horizontales.

Figura 3. Configuraciones de reactores anaerobios en seco vertical y horizontal.



Fuente: Wellinger, Murphy, Baxter, 2013

La empresa Organic Waste Systems (OWS) utiliza el proceso DRANCO para el tratamiento responsable y económico de residuos orgánicos derivados de residuos sólidos urbanos. Con su experiencia y amplia lista de referencias, su proceso es catalogado como una tecnología de digestión anaerobia reconocida y confiable. Ellos la comercializan en todo el mundo a través de socios con licencia exclusivos. Su proceso patentado es único debido a su diseño vertical, la elevada concentración de residuos sólidos y la ausencia de mezcla dentro del digestor. Estas plantas funcionan con un contenido de materia seca de hasta 40%. Otras características del proceso son su alimentación en la parte superior con una salida cónica en la parte inferior; digestión de una sola fase con reciclaje intensivo del digerido; funcionamiento termofílico o mesofílico, digestores compactos y bien aislados con requerimientos de calefacción mínimos y altos índices de producción de biogás con digestión en seco. Las ventajas que trae este sistema son: Volúmenes pequeños de digestor, evitar formación de costras o sedimentos, extracción en la base del reactor, no presenta acumulación, mínimos requerimientos de superficie, ausencia de mantenimiento riguroso y fallas en el reactor y capacidades de hasta 60,000 toneladas métricas por año de residuos orgánicos domésticos. (Organic Waste Systems, 2021)

Un sustrato en particular tiene un rendimiento teórico máximo de metano basado en su contenido de carbono. No es posible exceder este valor a pesar del diseño y operación que se tenga en la planta. En la práctica este valor no se puede alcanzar debido a que los microorganismos consumen cierta parte de esta energía para su mantenimiento y crecimiento. Del mismo modo que cierta parte del carbono no se convertirá debido a que no es biodegradable anaeróbicamente. Para el caso de desechos de alimentos, el estudio realizado por Wellinger, Murphy y Baxter en el 2013, presentó un rendimiento máximo de $0.470 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$ y otros estudios han llegado a valores entre $0.435\text{-}0.450 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$. Se realizaron curvas de la producción de metano para distintos tipos de sustrato, las cuales variaron significativamente. Sustratos con una mayor proporción de fibras, como celulosa y otros desechos presentaron periodos lag largos al inicio, quedándose mucho tiempo en la fase de hidrólisis. Los demás sustratos presentaron crecimientos acelerados del gas, en especial los desechos alimenticios la cual continuó hasta que casi todo el potencial de metano fue liberado.

Tabla 3. Rendimiento máximo para distintos sustratos en digestión anaerobia.

Parámetro	Desechos de alimentos	Maíz ensilado	Slurry de ganado
Rendimiento máximo $\text{m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$	0.47	0.345	0.26

Fuente: Wellinger, Murphy, Baxter, 2013

La purificación del biogás generado de la digestión anaerobia trae varios beneficios en su calidad y opciones de uso. Al tener un alto contenido de CO_2 se reduce su poder calorífico y limita el pico de potencia a alcanzar por el motor-generador. Es por esto que la remoción del dióxido de carbono es una opción atractiva para el uso de biogás en motores-generadores de combustión interna. Estos sistemas dependen del dimensionamiento del equipo, la presión del gas, su composición original, flujo de agente removedor y su pureza. Los scrubbers de agua son un ejemplo de estas tecnologías. Estos sistemas pueden trabajar a corriente paralela o a contracorriente. En la parte inferior se tiene la entrada del biogás y la salida del líquido absorbente (en este caso agua) y en la superior una corriente fresca de agua entrando al sistema y la salida del biogás purificado. Estudios han demostrado una remoción de hasta el 100% del CO_2 , pero depende mucho de las condiciones mencionadas anteriormente. Este equipo puede contener un empaque que permita tener una mejor área de contacto entre el líquido y el gas. Algunos ejemplos de empaques disponibles en el mercado son sillas de Berl y los anillos Pall. El estudio de Rahivgandhi y Singaravelu en el 2014, reveló que para un flujo de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ de biogás y agua a una presión de 10 bar con anillos de Pall de 25 mm, se dimensionó una columna de 0.3 m de diámetro, 3 m de altura de empaque y 5 m de altura total de la torre. A estas condiciones se logró obtener un 92% de absorción del CO_2 inicial en el gas. (Rahivgandhi, Singaravelu, 2014)

El producto gaseoso generado por la digestión anaerobia se puede aprovechar de varias maneras, una de ellas es utilizar una unidad combinada de calor y potencia (CHP, por sus siglas en inglés). La utilización del biogás como combustible de un motor-generador es una tecnología comprobada alrededor del mundo. La mayoría de las instalaciones utilizan motores de chispa de propano o gas natural modificados para operar con biogás. También motores Diesel y de cuatro tiempos han sido modificados para trabajar con este gas. Los segundos pueden encontrarse con capacidades entre pocos kilowatts hasta 10 MW y con eficiencias eléctricas mayores a 40%. La eficiencia térmica de estos se encuentra entre 40%-50%. Generalmente, la conversión a energía eléctrica disminuye a mayores concentraciones de CO₂. Es importante mencionar que la mayoría de los motores pueden operar el biogás sin purificación si los niveles de compuestos azufrados son bajos (100 ppm o menos). En estos sistemas, entre el 10-15% de la energía del biogás es perdida en el proceso. Se requiere por supuesto un sistema de enfriamiento para estos motores. Comúnmente se utiliza agua de enfriamiento para transferir el calor generado, la cual sale a una temperatura entre 90-130 °C. Estos motores generalmente se trabajan a relaciones de aire combustible cercanas a 1, lo cual equivale a el uso de la cantidad de aire estequiométrico para que se dé la combustión completa del combustible. El aumentar o disminuir en gran grado esta relación solamente reducirá la eficiencia de la reacción de combustión. (Wellinger, Murphy, Baxter, 2013)

Por otra parte, la fracción líquida resultante del proceso se puede recircular debido a su alto contenido de nutrientes y materia orgánica. Para poder lograr esto el digestato debe ser de buena calidad, no solamente rico en nutrientes para plantas, sino que también debe estar libre de cualquier material contaminante de tipo físico, químico o biológico. Lo que más influye en la calidad del digestato es la calidad de la alimentación al reactor, siendo directamente proporcionales. Existen mediciones estándar para la calidad de este producto según las regulaciones de cada país. El propósito con este material es que sea de buena calidad para su posterior uso agrícola. Algunas veces se puede utilizar directamente como se obtiene o puede pasar por un refinamiento para mejorar su calidad. Al procesarlo se puede obtener biofertilizantes de alta calidad o reducir la carga de nutrientes lo suficiente para que se pueda desechar sin ningún problema. Algunas de las tecnologías de separación sólido-líquido más comunes para procesar el digestato son el separador de tornillo prensa y los decantadores centrífugos. (Wellinger, Murphy, Baxter, 2013)

En Guatemala se cuentan con ciertos acuerdos gubernativos que se encargan de administrar las actividades relacionadas y que involucren a este tipo de fertilizantes en el mercado local. Considerando el decreto 36-98 que establece la Ley de Sanidad Vegetal y Animal, establece que se debe ejercer control, supervisión y vigilancia en la calidad y seguridad de la producción, importación, exportación, transporte, registro, disposición y uso de productos plaguicidas y fertilizantes. Siguiendo estándares internacionalmente aceptados y con esto establecer reglamentos que contribuyan a la aplicación eficiente y eficaz de la misma. Uno de ellos es el acuerdo gubernativo 342-2010 el cual es el reglamento para el registro de fertilizantes, enmiendas y sustancias afines a fertilizantes o a enmiendas, ante el ministerio de agricultura, ganadería y

alimentación. En el artículo 2 mencionan las definiciones correspondientes a los productos que son considerados fertilizantes y sus relacionados para poder clasificarlos de una manera clara y sencilla. (MAGA, 2010)

- Simulación de procesos:

El modelado y simulación de procesos es la forma en que la humanidad ha tratado de explicar procesos de la vida real, prever sus efectos y modificarlos para obtener los resultados esperados. Para esto se define un sistema como una o varias unidades relevantes al estudio objetivo y este se delimita por una frontera física o imaginaria del resto de unidades (alrededores). Este se ve afectado por variables específicas que se relacionan entre sí para presentar modelos matemáticos que representen los cambios que tiene el sistema al variar uno o más de sus parámetros. Los sistemas se pueden clasificar en tres tipos: abiertos, cerrados y aislados; donde el primero permite el intercambio de materia y energía entre un sistema y sus alrededores, el cerrado solamente permite la transferencia de energía y el aislado no permite ninguno de los anteriores. Llegados a este punto, un proceso es una serie de actividades que ocurren dentro de un sistema y afectan de cierta manera las propiedades de este. Según esto, pueden existir procesos no estacionarios en donde estas variables cambian con el tiempo dentro del sistema; y estacionarios donde no se presentan cambios a lo largo del tiempo. El modelado de un proceso consta de tres puntos clave que se relacionan entre sí: especificaciones, eventos iniciales y efectos; ya que teniendo los dos primeros se puede predecir el último punto (Upreti, 2017).

En la digestión anaerobia, al entender los mecanismos del proceso y su cinética se puede llegar a especificar el diseño del biorreactor, sus condiciones de operación, producción de metano y estabilidad. Varios modelos han sido desarrollados para comprender de mejor manera la forma de trabajo del proceso bioquímico de la digestión anaerobia. Desde la década de 1960 se han presentado modelos mejorados y más complejos para describir los demás escenarios posibles en la actividad microbiana. Idealmente, los modelos deben de describir los aspectos cuantitativos y cualitativos de las reacciones microbiológicas, abarcando desde la hidrodinámica y transferencia de masa hasta la dinámica poblacional de la biomasa generada en el reactor a diferentes configuraciones internas y externas. La digestión anaerobia es considerada un proceso dinámico de varias etapas donde actúan varios grupos de bacterias, las cuales reaccionan de distinta manera a cambios en el tipo de materia prima, tiempo de retención, temperatura, tipo de reactor y condiciones de operación. Debido a su alta complejidad, se establecen ciertos supuestos que en consecuencia resultan en una variación del fenómeno en el mundo real pero manteniendo este efecto al mínimo para poder seguir utilizando dicho modelo (Yu, Wensel, Ma & Chen, 2013).

La utilidad que trae la simulación de procesos es la mejora en las predicciones de sus resultados, ya que al inicio del desarrollo de un modelo que represente algún proceso químico se realizan pruebas y se evalúa la precisión y exactitud de este. Un modelo que contemple de mejor manera las variables e interacciones entre estas presentará una mayor cercanía a los resultados del proceso real. Si en dado caso los valores esperados y los productos obtenidos difieren de gran manera, se debe de revisar el modelo para que este alcance valores con menos desviación. Al alcanzar un modelo confiable, este se utiliza para predecir los efectos en el sistema bajo diferentes circunstancias; estableciendo los supuestos apropiados y condiciones iniciales con las que se trabajará el proceso. Se debe agregar que no se necesita hacer las pruebas reales con todos los posibles escenarios, ya que para eso se cuenta con el simulador; solamente hasta llegar a los

resultados dentro del intervalo de confianza establecido ya se puede hacer la prueba real para validar que coincidan la predicción y la realidad. Es decir, que invertir tiempo y recursos repitiendo todo el proceso real desde un inicio con cada situación posible; esto conlleva un ahorro de recursos financieros y tiempo de montaje de todos los equipos involucrados que se utilizarían en una planta real (Upreti, 2017).

Los procesos químicos usualmente son considerados de tipo continuo; esto quiere decir que se maneja un flujo permanente de entrada y de salida durante todo el tiempo que lleve la actividad. Cosa distinta ocurre con los procesos por lotes, estos se caracterizan por trabajar con agrupaciones del material o lotes y estos se procesan uno a la vez. Los sistemas de este tipo suelen ser complejos de modelar debido a que las variables cambian con el tiempo y en representación matemática esto se expresa en ecuaciones diferenciales; donde estas pueden llegar a ser no lineales y, por lo tanto, su resolución analítica se vuelve complicada y en algunos casos imposible de obtener. Por esto, el desarrollo de softwares que permitan realizar cálculos matemáticos de ese nivel ha sido de gran apoyo para la generalización y estudio de cualquier tipo de sistema. En el estudio de la simulación de eventos se encuentra la dinámica de sistemas, que es un concepto que representa procesos complejos que cambian en el tiempo. En dicha área, un sistema es representado como una unidad compuesta de elementos que interactúan entre sí, impactando unos a otro hasta llegar a una convergencia. Este busca explicar su comportamiento según las relaciones existentes entre los objetos que pertenecen al sistema; haciendo a un lado el estudio individual de cada objeto y enfocándose en el todo (Aracil, 1995).

Un software que facilita el modelado, evaluación y optimización de procesos por lotes y continuos integrados en una amplia gama de industrias (Biotecnología, Farmacia, Químicos, Alimentos, Metalurgia, entre otros) es SuperPro Designer®. Es por esto que más de 500 empresas alrededor del mundo lo han incluido en sus procesos y herramientas del día a día. Además, es una gran herramienta de enseñanza e investigación, por lo que varias casas de estudios lo utilizan en diversos cursos de ingeniería para preparar a los estudiantes con habilidades útiles en los sectores industriales antes mencionados. De igual forma, la herramienta cuenta con un módulo ambiental que permite el control y tratamiento de residuos para encontrar soluciones innovadoras ante la contaminación ambiental hoy en día. Su interfaz permite modelar procesos por lotes y continuos de manera eficiente y una combinación de ambos; a través de la construcción de un diagrama de flujo se representa de forma amigable el proceso que se desea modelar. El sistema cuenta con una base de datos que contienen compuestos químicos generales en la industria incluyendo sus propiedades físicas y termodinámicas; pero también permite la definición de nuevos materiales requeridos por el usuario (Intelligen, 2020).

SuperPro Designer® proporciona balances de masa y energía, dimensionamiento de equipos y clasificación, análisis del costo de los insumos, programación del proceso, análisis del tiempo de ciclo del proceso, análisis de rendimiento y cuellos de botella, escalamiento y análisis de impacto ambiental. En los procesos tipo lote, las unidades de proceso pueden realizar una o varias operaciones y se establece una secuencia de ejecución; y para cada operación se establece un modelo matemático que efectúa los balances de masa y energía. Por otra parte, algunas de las unidades de proceso que puede modelar el software son reactores (Fermentador, Lote/Continuo, Digestor Anaerobio, Contenedor con Ventilación, entre otros), Separación de fases (Cristalizador, Centrífugas, Condensador, Adsorbedor, entre otros), Homogeneización (de alta Presión, Molinos, entre otros), Cromatografía (Intercambio iónico, Afinidad, Filtración por Gel, entre otros), Secado

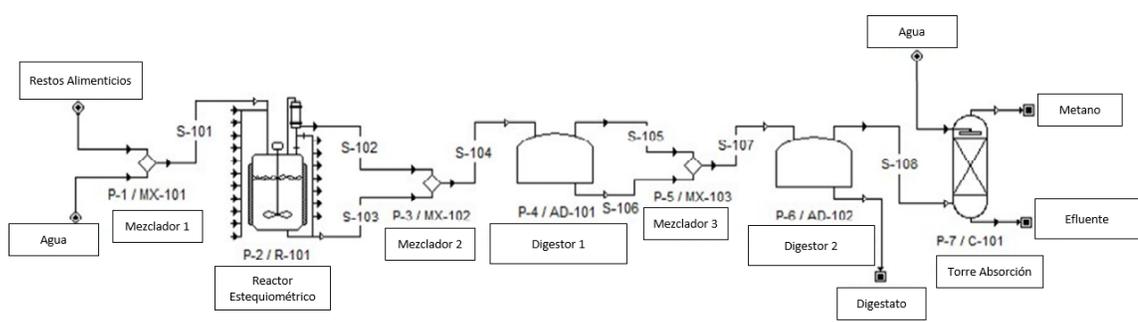
(Rotatorio, Evaporador Flash, Evaporador Rotatorio, entre otros), Cambios de Presión (Bombas, Compresores, Sopladores), Operaciones unitarias generales (Calentador/Enfriador, Separadores, Intercambiadores de calor, entre otros) y varias más (Intelligen, 2020).

V. Antecedentes

Los modelos matemáticos desarrollados para los reactores de digestión anaerobia se estudian desde 1960. En estos modelos, la degradación de acetato era el paso limitante de la cinética y, por lo tanto, el paso más importante del proceso. Estos modelos demostraron que patrones simples de inhibición podían crear comportamientos complejos durante la digestión que hasta el día de hoy continúan en investigación. Debido a esto varios estudios se han enfocado en generar modelos más robustos que puedan reconocer y representar varios tipos importantes de inhibiciones. De igual forma, estos deben poder representar los distintos tipos de sustratos utilizados en el proceso para identificar los componentes básicos que los conforman (carbohidratos, proteínas y lípidos). Considerando un flujo de alimentación inicial para esta mezcla, se logró describir cómo afectan estos la cinética y el crecimiento o decaimiento de la biomasa. (Angelidaki, Ellegaard y Ahring, 1998)

En un estudio de simulación de digestión anaerobia empleando el software SuperPro Designer® las reacciones bioquímicas y su cinética fueron tomadas con base al modelo de digestión anaerobia 1 (ADM1, por sus siglas en inglés). La caracterización de la materia prima se basó en un estudio realizado en Malasia en donde se determinó la composición de sus residuos sólidos en general, con valores de 55%, 26% y 19% para carbohidratos, proteínas y lípidos, respectivamente. Luego se eligieron las unidades a utilizar en la elaboración del diagrama de flujo. En este estudio se establecieron dos etapas de reacciones; la primera corresponde a las reacciones de hidrólisis que se analizaron solamente de forma estequiométrica y la segunda, incluye las reacciones que sí se configuraron como dependientes de una cinética establecida. Para esto se colocaron dos digestores anaerobios, uno trabajando de forma estequiométrica y el otro con una cinética establecida. Ambos reactores trabajaron a las condiciones de 1 atm y 55 °C. Ambas salidas del reactor 1 se alimentaron al reactor 2 para luego ya separar las corrientes de biogás y digestato producido observado en la figura 4. El biogás pasa a una torre de absorción tipo scrubber de agua en donde se purificó obteniendo una composición final de 98.7% (v/v) de metano. El scrubber operó a las condiciones de 40 °C y 1 atm.

Figura 4. Diagrama del proceso en SPD para un estudio empleando desechos alimenticios en digestión anaerobia.



Fuente: Harun, *et al*, 2018

Otros estudios han tomado de referencia otros modelos y diseños del proceso a desarrollar en el software. El estudio de Achinas en el 2019 analizó el proceso desde el transporte de los desechos orgánicos por camión. Luego llega a una banda transportadora de 20 m que lleva el material a un triturador. Utilizando una bomba centrífuga se bombea el material a la entrada del reactor. Las condiciones dentro del reactor fueron mesofílicas (35 °C). Este estudio evaluó tres tipos de sustrato: hierba seca, estiércol de vaca y pulpa de remolacha azucarera. En la sección de aprovechamiento del biogás, una turbina-generator de gas se emplea para generación eléctrica empleando los gases de combustión para el aprovechamiento del calor de la corriente de salida del generador. Para el material digerido utilizaron una bomba centrífuga para bombear el fluido a una prensa de tornillo para luego llegar a un tanque de almacenamiento. El estudio consideró los precios en su momento del mercado para la venta de electricidad y fertilizante. (Achinas, Martherus, Krooneman & Euverink, 2019).

VI. Metodología

1. Definición del problema: La acumulación de residuos alimenticios es un problema a nivel global y por ende se seleccionó este proyecto para poder aprovechar este material orgánico en el proceso de digestión anaerobia para generar biogás como biocombustible y reducir la cantidad de estos productos que terminan en vertederos o áreas verdes dañando al medio ambiente con emisiones de gases de efecto invernadero.
2. El alcance de este trabajo se limitó a la realización del simulador del proceso de transformación de la materia prima a biogás tomando en cuenta la etapa de pretratamiento de disminución de tamaño de partícula, la degradación de la materia orgánica, la purificación de producto gaseoso rico en metano y el post tratamiento del digestato para su separación en fase líquida y sólida. Los temas de venta del producto terminado, logística y ubicación de la planta quedaron fuera del alcance de este estudio.
3. Encontrar un estimado de la cantidad de residuos alimenticios generados en Guatemala para utilizar como dato de referencia en la alimentación de esta materia prima al simulador.
4. Definir el modo de operación del proceso de digestión anaerobia apropiado para el tratamiento de residuos alimenticios al igual que las posibles formas de purificación del biogás. Tomando en cuenta si el proceso sería por lotes o continuo. Según la literatura del marco teórico, la digestión anaerobia en modalidad seca en un reactor tipo PFR (operación continua) es el modo más común de tratar residuos alimenticios. Por lo tanto, en el simulador se eligió un reactor de digestión anaerobia operando de forma continua.
5. Investigar los fundamentos químicos e ingenieriles de la forma de operación seleccionada para familiarizarme con la degradación de los alimentos utilizando microorganismos y factores que pueden influir en dichas reacciones a esas condiciones. Al igual que conocer los equipos necesarios para la operación principal y la purificación posterior del biogás junto a las condiciones de operación a considerar.
6. Indagar en los modelos matemáticos desarrollados en la actualidad para poder simular la digestión anaerobia y comprender el flujo del proceso basado en ecuaciones que representan las varias etapas involucradas en el mismo y qué información de entrada básica se necesita para poder aplicar el modelo.
7. Seleccionar las ecuaciones de las etapas de la digestión anaerobia (ver Tabla 34) para trabajar con una composición de carbohidratos (Celulosa), proteínas (Gelatina) y lípidos (Trioleína) de los residuos alimenticios de referencia como información de entrada básica

al simulador para poder trabajar de forma estequiométrica. La celulosa se eligió debido a que es uno de los carbohidratos más comunes y abundantes en la naturaleza. La gelatina es una mezcla heterogénea de proteínas con una composición de aminoácidos promedio, la cual es representativa de las proteínas animales. La trioleína al ser hidrolizada se produce ácido oléico el cual es uno de los compuestos más abundantes en los aceites vegetales. Por estas razones se seleccionaron dichos compuestos de referencia para la composición básica de los residuos alimenticios en el simulador.

8. Obtener información de entrada básica requerida por SuperPro Designer ® para el modelo de digestión anaerobia en modalidad “seca”, como la composición de referencia del material orgánico a procesar, condiciones de operación, propiedades fisicoquímicas de los diferentes compuestos a incluir en el modelo, precios de los equipos, tasas de impuestos, costo de los servicios auxiliares, precio de los productos, entre otros.
9. Diseñar el modelo en SuperPro Designer®
 - Definir el modo de operación de la simulación (continuo) y el tiempo de operación de la planta (330 días al año).
 - Ingresar los componentes y mezclas a utilizar definidas anteriormente en el programa según los compuestos definidos en las reacciones de digestión anaerobia.
 - Ajustar las propiedades fisicoquímicas de los componentes necesarios para que el programa utilice la información correcta para cada compuesto.
 - Ingresar las unidades de proceso en el simulador separadas en las siguientes fases:
 - Pretratamiento (Figura 5)
 - Digestión anaerobia (Figura 6)
 - Separación y tratamiento de digestato (Figura 7)
 - Purificación de biogás y CHP (Figura 8)

Figura 5. Diagrama del pretratamiento de residuos sólidos

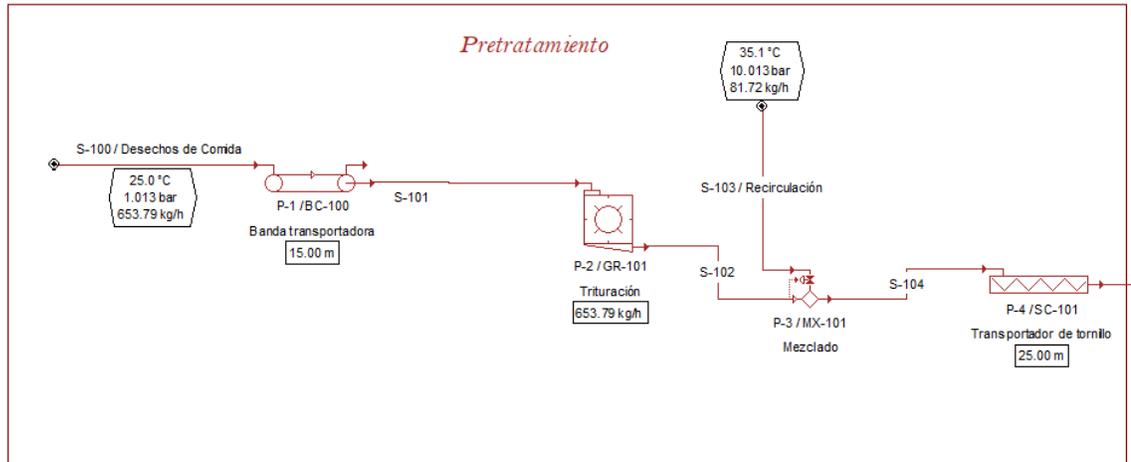


Figura 6. Diagrama de digestión anaerobia de residuos sólidos

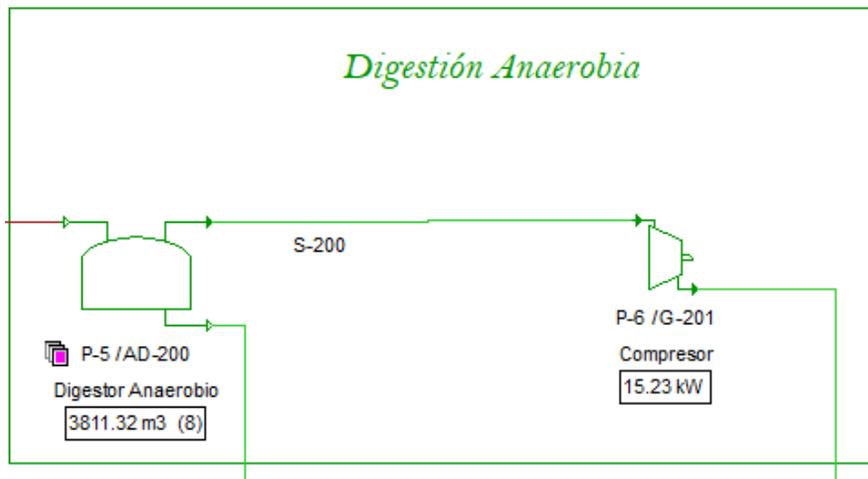


Figura 7. Diagrama de sección de separación y tratamiento de digestato

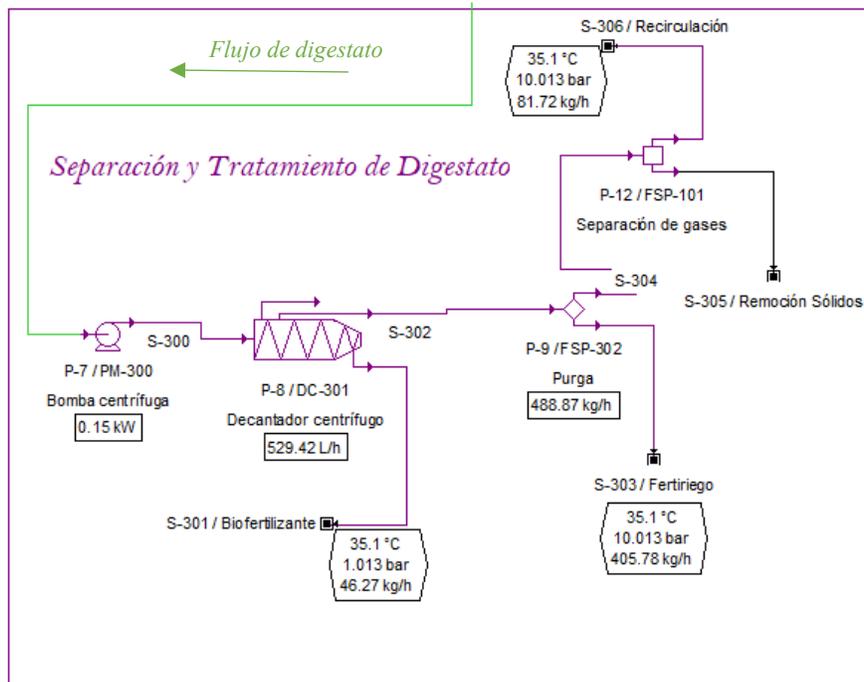
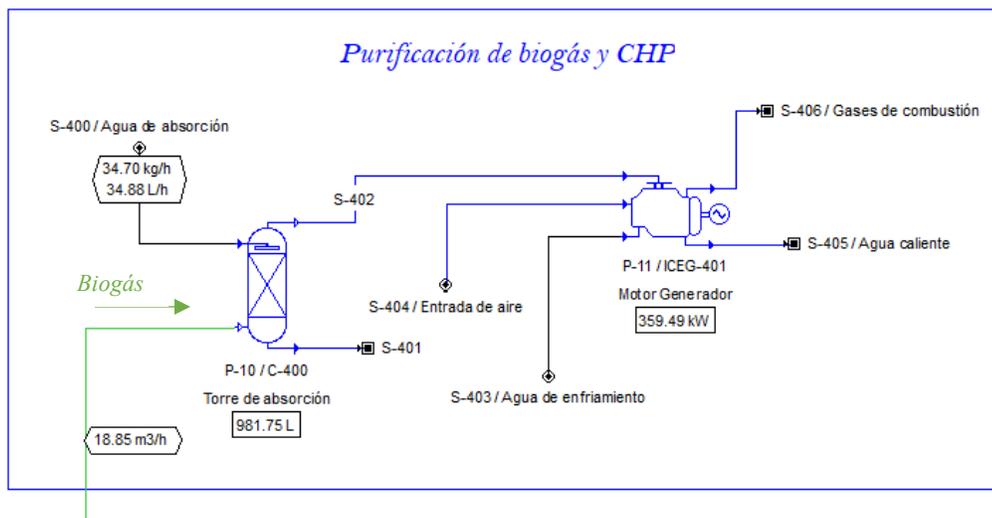


Figura 8. Diagrama de purificación de biogás



- Construir las líneas de flujo entre los equipos de cada una de las etapas establecidas
- Ingresar en cada uno de los equipos sus dimensiones solicitadas, consumos energéticos, eficiencias de ser necesarias, condiciones de operación y costo de adquisición.
- Ingresar el flujo de alimentación principal al inicio del diagrama de flujo del proceso. Indicando la composición de residuos alimenticios y humedad de la materia prima.
- Revisar que el simulador contara con los parámetros económicos necesarios para los cálculos de los costos de inversión y operación de la planta en el tiempo establecido.
- Ingresar la cantidad de personas necesarios para la operación de la planta junto a los salarios establecidos en Guatemala para el año 2022 según el Ministerio de Trabajo.
- Seleccionar los servicios auxiliares (agua o aire) necesarios para cada uno de los equipos del proceso.

10. Cálculos en el simulador

- Calcular los balances de masa y energía con las condiciones establecidas anteriormente con la primera unidad del proceso.
- Identificar si se presentaron errores en los cálculos de los balances de masa y energía del proceso en la simulación e indagar en su causa.
- Iterar las veces necesarias los balances de masa y energía hasta que ya no haya errores en los cálculos del simulador.
- Habilitar otra unidad del proceso (Tabla 25) al diagrama y volver a evaluar los balances de masa y energía para corroborar la correcta operación de las unidades en conjunto.
- Realizar el mismo procedimiento con cada una de las unidades del proceso hasta que todas estén incluidas y no presenten errores en los cálculos.

- Evaluar escenarios en el simulador aumentando la cantidad de residuos alimenticios a tratar (Tabla 35) para encontrar el escenario con mayores beneficios técnicos (menos unidades de proceso) y económicos (Valores presentes Netos positivos y periodos de recuperación de la inversión bajos) trabajando con una sola planta de biogás.

11. Análisis de los resultados obtenidos

- Recolectar y evaluar los datos de salida para el reactor, torre de absorción y el motor de combustión interna. Con el programa se obtienen los siguientes reportes en donde se incluyen estos equipos:
 - Evaluación económica de la planta: el cual devuelve los costos de cada uno de los equipos, costos directos e indirectos, ingresos, ganancias entre otros.
 - Análisis de flujo de efectivo: Devuelve los flujos de efectivo para el tiempo de vida establecido de 15 años de la planta como tiene por defecto el programa.
 - Costo detallado: El cual devuelve los costos específicos para cada sección de la planta y sus equipos, costos de mano de obra, servicios auxiliares, entre otros.
- Realizar los balances de estos equipos manualmente en un Microsoft Excel ® para Microsoft 365 para corroborar que los resultados del simulador sean los valores que cumplan con la masa y energía total tratada en los equipos.

12. Verificación del modelo de simulación

Comparar los resultados del simulador respecto a las variables de entrada y resultados de experimentos con condiciones de operación similares reportados en literatura. Para tener un respaldo de los datos obtenidos por el simulador de digestión anaerobia se compararon los datos de la tasa interna de retorno después de impuestos (IRR) respecto a los valores encontrados en otros estudios. Los valores encontrados por: Gozan, *et al.*, 2018, Ekinci, *et al.*, 2015 y Asian Development Bank, 2020 la IRR para plantas de biogás se encuentran en la siguiente tabla. Con el valor experimental de 12.6% se obtuvieron los errores estimados para cada estudio. Dicho análisis se hizo para los tres estudios de referencia empleando Microsoft Excel ® para Microsoft 365. Con lo que se estableció que el error relativo global del modelo fue de 3.56% \pm 3.64%. Lo cual indica que hay una tendencia en el modelo hacia los datos reportados en la literatura y que este está realizando los cálculos apropiados para obtener los resultados esperados.

Tabla 4. Análisis de error de resultado experimental y bibliografía de plantas de biogás con respecto a la tasa interna de retorno del proyecto.

Medición	Autores				Media aritmética
	Gozan, <i>et al.</i>	Ekinci. <i>et al.</i>	Asian Development Bank Estimates	Este estudio	
IRR (%)	12.50	12.33	11.70	12.6	12.18
Error estimado	0.80%	2.19%	7.69%		3.56%
Desviación estándar del error					3.64%

Con un valor experimental obtenido de 0.58 m³ CH₄ kg⁻¹ VS se comparó el rendimiento de metano contra los estudios de referencia utilizando Microsoft Excel ® para Microsoft 365. Obteniendo los errores presentes en la siguiente tabla. Demostrando una tendencia del valor obtenido hacia los resultados reportados en otros experimentos, de modo que los cálculos que realiza el simulador devuelven los resultados esperados referencia condiciones similares de los otros experimentos.

Tabla 5. Análisis de error para el rendimiento de metano de la simulación contra los valores reportados en la literatura.

Medición	Autores				Media aritmética
	Wellinger, <i>et. al.</i>	Islam, <i>et. al.</i>	Yangyang, <i>et. al.</i>	Este estudio	
Rendimiento (m³ CH₄ kg⁻¹ VS)	0.60	0.59	0.56	0.58	0.58
Error estimado	2.80%	0.48%	3.29%		2.19%
Desviación estándar del error					1.50%

Estos valores fueron evaluados para una planta de biogás con 8 reactores. Se seleccionó este escenario debido a que se obtuvieron resultados técnicos y económicos satisfactorios para el proyecto y se consideró que a una cantidad mayor de 8 digestores se requeriría otra planta para poder procesar los residuos alimenticios.

13. Recolección de resultados de simulación

Consta de la obtención de los resultados presentados por el modelo de digestión anaerobia empleando la fracción orgánica de los residuos sólidos para los dos escenarios a evaluar.

- Registrar los datos técnicos de cada una de las unidades de operación en el simulador (Reactor, Torre de absorción, motor generador, entre otros)
- Generar los resultados económicos de la planta utilizando los reportes generados por el simulador para cada uno de los escenarios tratados:
 - Evaluación económica del proyecto.
 - Flujo de Caja del proyecto.
 - Seccionamiento de Costos de Operación
- Obtener los flujos de masa en el proceso utilizando el reporte de flujo de materiales presente en el simulador.
- Registrar los datos energéticos de cada uno de los equipos en el proceso como energía consumida, generada, % de disipación de calor, eficiencias, entre otros.

14. Análisis de resultados.

- Evaluación de los datos obtenidos en base a los objetivos planteados y a los datos de referencia para el rendimiento de biogás y la tasa interna de retorno del proyecto.
- Analizar el volumen del reactor y evaluar cuántos reactores serían necesarios para cada uno de los escenarios.
- Realizar el análisis empleando un balance de masa de la torre de absorción para remover el dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.
 - Diagnóstico de los valores obtenidos por el simulador contra las pruebas realizadas en Microsoft Excel ® para la determinación de la altura y diámetro de la torre
 - Revisar en la literatura que los valores obtenidos se encuentren entre los rangos permitidos para las condiciones de operación de la torre.
 - Evaluar para cada escenario el consumo de agua de absorción y el efecto que tiene en la composición final de metano del biogás y los costos de consumo de agua.
- Comparar los parámetros económicos obtenidos de los escenarios evaluados para determinar qué escenario es más atractivo para invertir económicamente y que se acople a los equipos necesarios para una sola planta de biogás, tomando en cuenta todos los supuestos establecidos y condiciones en el simulador.
- Evaluar los precios establecidos para los productos de venta final (electricidad, agua caliente, biofertilizante y fertiriego) contra los valores teóricos encontrados en la literatura y realizar ajustes razonables a los productos posibles para poder generar mejores resultados económicos en el proyecto.

VII. Resultados

Tabla 6. Rendimiento de la producción de biogás y biofertilizante.

	m³ CH₄/kg VS	kg fertilizante/kg de desechos alimenticios
Rendimiento de biogás	0.5831	0.5481
Rendimiento de fertilizante	0.2282	0.2145

Nota: 0.8 VS/kg de desechos alimenticios

A. Análisis económico del proyecto:

Tabla 7. Inversión de capital inicial del proyecto de 8 reactores por secciones (en miles de Quetzales)

Sección	Costo compra de equipo	Costos directos fijos	Capital de trabajo	Iniciación y validación	Inversión total de capital
Pretratamiento	216.07	1,248.64	33.30	62.43	1,344.38
Digestión anaerobia	8,086.70	44,894.98	72.23	2,244.75	47,211.96
Digestato	19.79	123.03	9.61	6.15	138.80
Purificación Biogás	76.07	473.04	141.32	23.65	638.01
Total	8,398.61	46,739.69	256.47	2,336.98	49,333.14

Nota: tasa de cambio de 7.72 Q el dólar estadounidense. El desglose de los costos de los equipos se encuentra en la Tabla 25 en la sección de anexos.

Tabla 8. Costos de operación anual de la planta de biogás con 8 reactores.

Rubro	Miles de Q	%
Materia Prima	1,134.84	9.57
Mano de obra	1,158.00	9.80
Instalaciones y equipo	8,854.84	74.72
Laboratorios	177.56	1.47
Servicios auxiliares	524.96	4.44
Total	11,850.20	100.00

Nota: tasa de cambio de 7.72 Q el dólar estadounidense.

Figura 9. Flujo de caja a 15 años del proyecto de planta de biogás con 8 reactores (en miles de Quetzales)

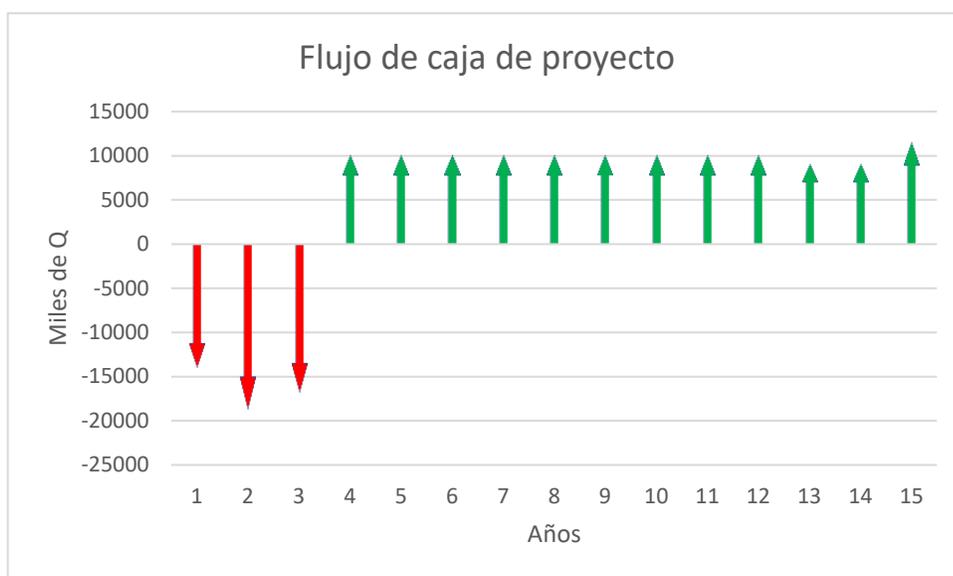


Tabla 9. Periodo de retorno de la inversión para planta de biogás y otros indicadores para 8 reactores.

Indicador	Valor	Unidad
Margen de ganancias brutas	398.62	%
Retorno de la inversión	120.32	%
Periodo de retorno de la inversión	1.33	años
Tasa interna de retorno (después de impuestos)	12.60	%
Valor presente neto (a 7.0% de interés)	17,939	Miles de Q

Nota: tasa de cambio de 7.72 Q el dólar.

Tabla 10. Inversión de capital inicial del proyecto para 1 reactor por secciones (en miles de Quetzales)

Sección	Costo compra de equipo	Costos directos fijos	Capital de trabajo	Iniciación y validación	Inversión total de capital
Pretratamiento	216.07	1,248.64	33.30	62.43	1,344.38
Digestión anaerobia	1,669.45	9,707.92	55.79	485.40	10,249.10
Digestato	19.79	123.03	9.36	6.15	138.54
Purificación	76.07	473.04	43.68	23.65	540.38
Total	1,981.36	11,552.62	142.14	577.63	12,272.40

Nota: tasa de cambio de 7.72 Q el dólar. El desglose de los costos de los equipos se encuentra en la Tabla 26 de los anexos.

Tabla 11. Costos de operación anual de la planta de biogás con 1 reactor.

Rubro	Miles de Q	%
Materia Prima	61.76	9.57
Mano de obra	1,158.00	9.8
Instalaciones y equipo	2,177.04	74.72
Laboratorios	177.56	1.47
Servicios auxiliares	339.68	4.44
Total	3,914.04	100

Nota: tasa de cambio de 7.72 Q el dólar.

Figura 10. Flujo de caja a 15 años del proyecto de planta de biogás con 1 reactor (en miles de Quetzales)



Tabla 12. Periodo de retorno de la inversión para planta de biogás y otros indicadores para 1 reactor.

Indicador	Valor	Unidad
Margen de ganancias brutas	60.16	%
Retorno de la inversión	12.52	%
Periodo de retorno de la inversión	7.99	años
Tasa interna de retorno (después de impuestos)	N. A	%
Valor presente neto (a 7.0% de interés)	- 25,380	Miles de Q

B. Purificación de biogás utilizando torre de absorción

Tabla 13. Composición de metano en el biogás después de purificación

Compuesto en biogás	Composición en entrada (%v/v)	Composición en salida (%v/v)	Composición con TIR indefinida (%v/v)
Metano	54.91	59.06	93.14
Sulfuro de hidrógeno	0.02 (0.28 ppm)	0.009 (1.23 ppm)	

Figura 11. Tasa interna de retorno contra volumen de agua requerido para purificación del biogás.

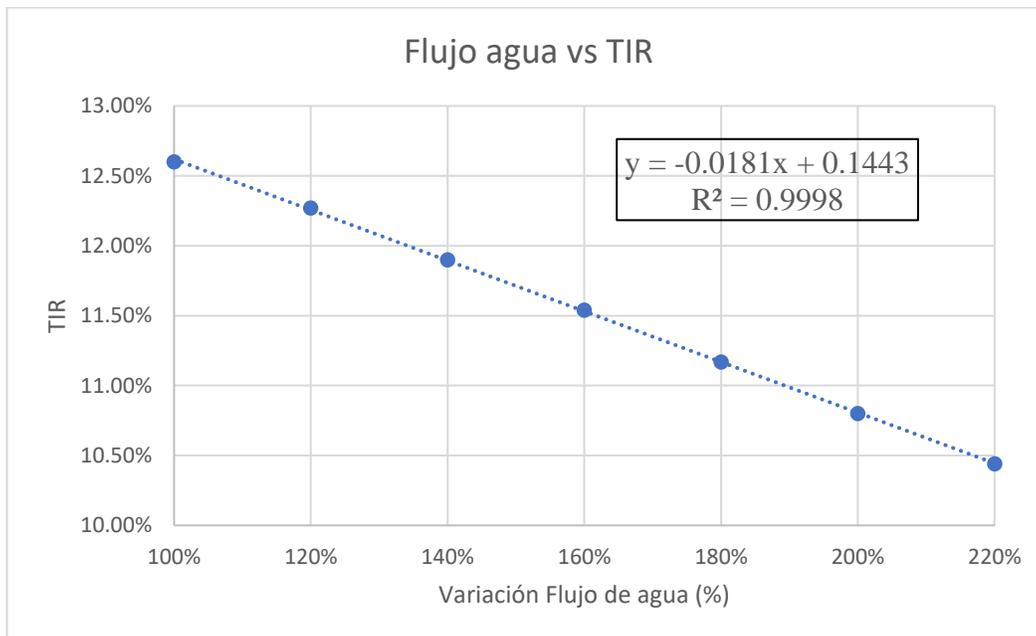
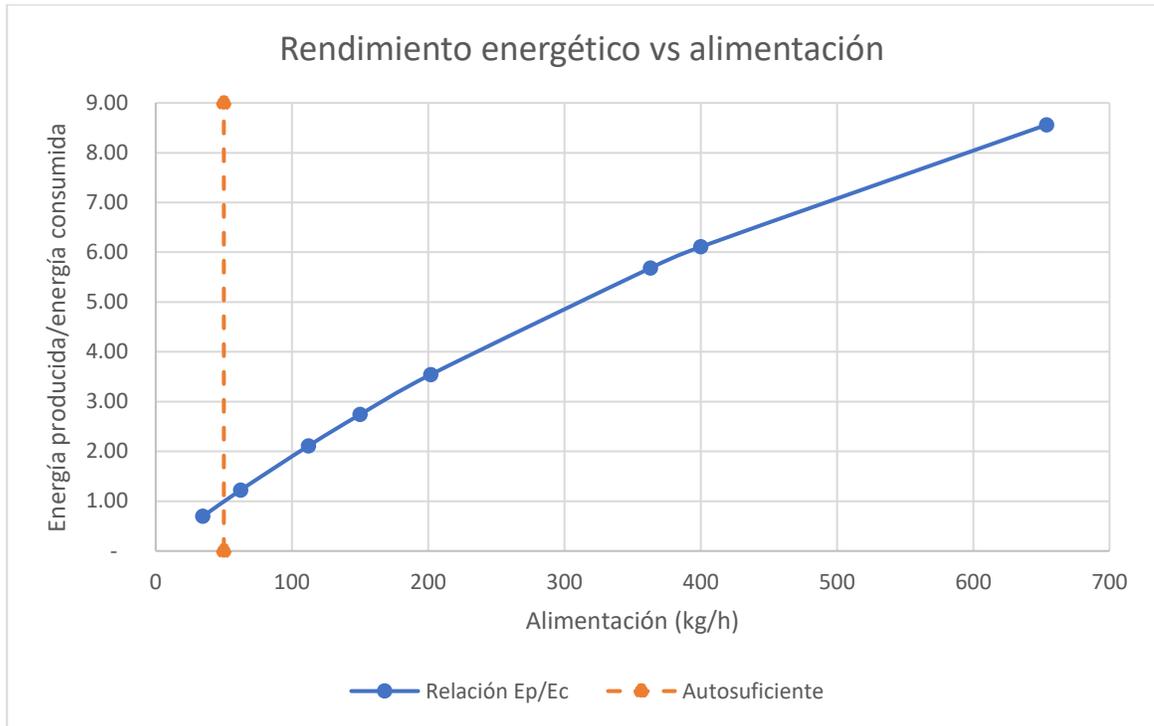


Figura 12. Relación entre energía eléctrica producida y consumida durante escalamiento de planta de biogás.



VIII. Análisis de resultados

Se cumplió el objetivo principal de este trabajo al realizar la simulación del proceso de digestión anaerobia empleando la fracción orgánica de los desechos sólidos. Los temas técnico-económicos fueron evaluados y se presentan en las figuras y tablas en la sección de resultados. Cabe resaltar que este proyecto se enfocó en elaborar un simulador capaz de operar con una composición de residuos alimenticios genérica conociendo su composición en carbohidratos, lípidos y proteínas, para que en un futuro en Guatemala se utilice para realizar predicciones y mejoras en este proceso. De las 1.273 millones de toneladas métricas de desechos reportadas por el UNEP FOOD WASTE INDEX el 2021 en Guatemala, se determinó en dos escenarios de simulación que la cantidad utilizada del valor mencionado anteriormente para el proceso evaluado corresponde a un rango entre 0.01% a 0.20% en el escenario con un reactor como el valor inferior y con 8 reactores para el valor superior. Esto indica que la cantidad de materia prima disponible a tratar es sumamente mayor a la capacidad que puede tratar una sola planta, por lo que la disponibilidad de materia prima no sería un problema para el proyecto. Esto, por supuesto, sin tomar en cuenta los temas de la composición real de los restos alimenticios en el país, logística y ubicación de la planta para el transporte de la materia prima y del fertilizante para su venta.

La simulación estableció un rendimiento de $0.58 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$. Dicho valor presentó un error promedio del $2.19\% \pm 1.50\%$ contra los valores reportados en la literatura y recopilados en la Tabla 5. Esto demuestra que el simulador se acerca suficientemente a los valores reportados en otros experimentos. La simulación permitió establecer las condiciones de temperatura, presión, tiempo de residencia y porcentaje de volumen de trabajo del digestor, los cuales afectan directamente al rendimiento. El trabajar a $35 \text{ }^\circ\text{C}$ pudo afectar significativamente al mismo, ya que existen estudios que han operado a temperaturas de hasta $55 \text{ }^\circ\text{C}$ demostrando que a esas condiciones se logran los mejores rendimientos de biogás debido a un mayor crecimiento microbiano y generación de metano, como se observó en la Tabla 1 del marco teórico. Igualmente ocurre con el tiempo de residencia, a mayor tiempo se consideró una mejor degradación resultando en mejores conversiones a metano e hidrógeno, como se presentó en la Tabla 2. El volumen de trabajo del digestor se estableció como un 90% del volumen total, normalmente se trabaja con un 80% por regla gruesa, pero al dejar tanto espacio libre la cantidad de reactores necesarios aumentaba considerablemente y la capacidad de los demás equipos se volvía insuficiente. La temperatura y tiempo de residencia fueron establecidos según el estudio realizado por Achinas, Martherus, Krooneman & Euverink en el 2019. Pero las consecuencias debidas a estos parámetros en el rendimiento no fueron el enfoque principal de este estudio.

De igual manera, el no considerar una cinética de reacción debido a su alta complejidad y actual investigación de las varias reacciones involucradas genera aún más discrepancia entre los valores dados por la simulación y los demás estudios experimentales realizados. Cabe resaltar las propias limitaciones del simulador ya que este no toma en cuenta el pH del sistema, el cual sí afecta al rendimiento, ya que este se debe encontrar levemente por encima del valor neutro ($\text{pH} = 7$), pero menor a 7.5. Factores como inhibiciones, cantidad de nutrientes necesarios para el medio y características del sustrato pueden afectar directamente al mismo. El haber contado con datos teóricos sobre la caracterización de los desechos alimenticios en Guatemala pudo ser de utilidad para conocer con mayor certeza el porcentaje de sólidos volátiles presentes en los desechos a procesar. Dada la relevancia de la composición de los residuos orgánicos en la producción de biogás, el rendimiento puede variar significativamente de modo que la simulación describa de forma más exacta, el comportamiento real del proceso que se puede esperar al procesar la fracción orgánica de residuos sólidos del país.

Ahora bien, el fertilizante generado se tomó como producto de venta principal con un rendimiento de 0.2282 kg de fertilizante/kg de VS. El producto presentó concentraciones de fósforo y nitrógeno que son de los nutrientes principales que debe contener todo fertilizante, ya que estos mejoran las propiedades biológicas y químicas del suelo. De igual manera, su composición es 60% biomasa lo cual es una parte representativa del total del producto. En Guatemala según el acuerdo gubernativo 342-2010 sí se considera como fertilizante el producto obtenido ya que cumple con las características mencionadas en el marco teórico y resumidas en la Tabla 27 en la sección de anexos. La fracción de purga se consideró como fuente para fertiriego, que según el acuerdo gubernativo 236-2006, puede utilizarse libremente para su aplicación de riego agrícola, cultivos comestibles y para pastos entre otros cultivos que no cuenten con un límite máximo de demanda bioquímica de oxígeno y coliformes fecales.

En la parte B de la sección de resultados se encuentran los parámetros económicos del proyecto en un escenario con un solo reactor y otro con 8 reactores para comparar contra los datos reportados en literatura, probando inicialmente el proceso DRANCO mencionado por OWS en el marco teórico. En el segundo caso los costos de inversión inicial y de operación anual fueron mayores por aumentar la capacidad de la planta y el número de reactores a utilizar. No obstante, el flujo de caja presentó ingresos netos desde el año cuatro de operación de la planta a diferencia de los valores negativos para un solo reactor como se observa al comparar las figuras 9 y 10. Los demás indicadores como el periodo de recuperación (PR), tasa interna de retorno después de impuestos (IRR) y el valor presente neto (VPN) demostraron, por su parte, valores prometedores para la inversión en el proyecto de 8 reactores. Esto se logró identificar realizando un análisis de sensibilidad para el PR, VPN e IRR variando la alimentación de residuos alimenticios en el simulador. Esta variación comenzó desde la cantidad necesaria para operar con un solo reactor del volumen mínimo de 1640 m³ que se encontró en el mercado e incrementando esta cantidad hasta llegar a los 8 reactores utilizados. De los 13 puntos evaluados en la Figura 20, solamente los últimos cinco presentaron un VPN positivo junto a PR's bajos e IRR's razonables según los estudios realizados sobre plantas de biogás presentados en la Tabla 4.

Lo anterior, se debió al fenómeno conocido como economías de escala, es decir la capacidad de una empresa de producir más productos a un menor costo de producción debido a que a medida que la producción crece sus costos se reducen¹. Dicho esto, las plantas de tamaño pequeño o mediano no resultaron atractivas para su inversión debido a que no se obtienen beneficios a corto, mediano o largo plazo en el proyecto. Por lo tanto, la opción de montar una planta piloto no resultó atractiva económicamente, pero a nivel técnico podría favorecer en la detección de inconvenientes a escala intermedia y analizarlos para un escalamiento apropiado de la planta.

Otro factor económico de alto impacto en el proyecto se observó en la Tabla 13. El elevar el flujo de agua requerido en la torre de absorción impactó negativamente a la tasa interna de retorno del proyecto como se observó en la Figura 11. Al llegar a un valor de 93.14% v/v de metano final con un 796% de incremento en el flujo de agua, la TIR del proyecto se volvió indefinida y poco atractiva para inversionistas. Sin embargo, para su ingreso al motor-generador la mezcla gaseosa sí cumplió con los requerimientos necesarios de una cantidad permisible de H₂S menor a 100 ppm para su combustión sin presentar daños considerables al equipo según la literatura. Pero cabe resaltar que a mayores concentraciones de metano se pudo obtener una combustión más limpia y generar mayor energía en forma de electricidad que también fue una fuente de ingresos para el proyecto. El excedente de energía generado se puede observar en la Figura 12 para los ocho valores de alimentación evaluados. El punto de equilibrio se encontró entre los 53 kg/h, por lo que se debería de comenzar a operar desde este punto en adelante por temas energéticos. A valores mayores donde se procesa mucha más materia orgánica se generó mayor energía en forma de electricidad para poder venderla a la red nacional. Cabe resaltar que en la simulación se asumieron condiciones ideales y base seca dentro de la torre de absorción para la simplificación de los cálculos de transferencia de masa.

¹ (Sullivan, 2003)

IX. Conclusiones

- El proceso simulado con base en un modelo modular secuencial para la producción de biogás a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos empleando el software SuperPro Designer® presentó resultados técnico-económicos similares a proyectos revisados en la literatura. A pesar de resultar en un proyecto rentable con todos los supuestos aclarados en el estudio, este solamente abarcó el 0.2% de los desechos producidos por el país anualmente.
- El rendimiento obtenido de la simulación de $0.583 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$ presentó un margen de error del $2.19\% \pm 1.50\%$ respecto a otros artículos en la literatura. Este error es permisible, sin embargo, la realización de pruebas experimentales con los residuos alimenticios de Guatemala y la consideración de la cinética del proceso puede llegar a variar considerablemente este valor con relación a lo obtenido en la simulación.
- Los análisis económicos obtenidos de SuperPro Designer® presentaron resultados positivos y atractivos para el proyecto empleando 8 reactores. Pero hace falta más validación del proyecto para poder evaluar con certeza la rentabilidad.
- La composición obtenida de metano en el biogás purificado fue de 59.06% (v/v) luego de su limpieza. El valor se encontró dentro de los rangos establecidos en los objetivos, pero una limitante para llegar a porcentajes mayores fue el consumo de agua la torre de absorción. Afectando económicamente al proyecto. La búsqueda de alternativas más eficientes podría mejorar los rendimientos energéticos de la planta.

X. Recomendaciones

- Realizar una caracterización en términos de carbohidratos (celulosa), proteínas (gelatina) y grasas (trioleína) y pruebas experimentales de los residuos alimenticios en el país para poder tener una mejor estimación del rendimiento de biogás obtenido.
- Utilizar algún otro software en donde se pueda tomar en cuenta el comportamiento complejo de la cinética con inhibición presente en la digestión anaerobia en modalidad seca.
- Considerar un tratamiento apropiado para el agua de salida de la torre de absorción para la remoción del sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono presente. De modo que se pueda aprovechar de alguna manera o que se gestione su disposición de manera responsable.
- Realizar un estudio experimental con las condiciones establecidas en este informe para realizar una validación de los resultados en el simulador, de modo que se ajusten ciertos parámetros para aumentar su exactitud y capacidad predictiva del proceso.
- Establecer claramente las bases de diseño del proceso, incluyendo un estudio técnico/económico, de mercado y de ubicación más detallado. Al igual que presentar un dimensionamiento de equipos y diagramas que permitan construir una planta rentable y sostenible.
- Visitar la planta de biogás de Grupo Central Agrícola en Guatemala u otras instalaciones similares para poder conocer a mayor detalle el proceso de investigación, diseño y desarrollo para la instalación de una planta de biogás. Ya que esto permitirá recabar más información sobre temas legales, técnicos y económicos sobre el proceso acercando aún más la simulación a lo que representa el proceso real con relación a los aspectos mencionados anteriormente.

XI. Bibliografía

- Angelidaki, I; Ellegaard. L y Ahring. B. 1998. *A Comprehensive Model of Anaerobic Bioconversion of Complex Substrates to Biogas*. The Technical University of Denmark. Denmark. 10 pp."
- Achinas. et. al. 2019. *Preliminary Assessment of a Biogas-Based Power Plant from Organic Waste in the North Netherlands*. University of Groningen. Netherlands. 16 pp.
- Aracil, J, Gordillo, F. (1995). *Dinámica de Sistemas*. Alianza Editorial. 58 pp
- Asian Development Bank. 2020. *People's Republic of China: Integrated Renewable Biomass Energy Development Sector Project*. 64 pp.Extraído de <https://www.adb.org/sites/default/files/project-documents/40682/40682-013-pcr-en.pdf>
- Barrios, R, Sierra, C. (2013). *Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación*. Universidad de Cartagena. Colombia.
- Ekinci, K., Kulcu, R., Kaya, D., Yaldiz, O., Ertekin, C and Ozturk, H. 2010. *The prospective of potential biogas plants that can utilize animal manure in Turkey*. Energy Exploration & Exploitation. 28 (3). Pp. 187-206
- González, B. (2020). *Los desechos sólidos en la Ciudad de Guatemala*. Extraído de <http://investigacionparatodos.usac.edu.gt/art%C3%ADculos-principales/item/25-desechos-s%C3%B3lidos>
- Gozan, M., Aulawy, N, Rahman, F., Budiarto, R. 2018. *Techno-Economic Analysis of Biogas Power Plant from POME (Palm Oil Mill Effluent)*. International Journal of Applied Engineering Research. 13 (8). pp. 6151-6157.
- "Harun, N, et al. 2018. *Simulation of Anaerobic Digestion for Biogas Production from Food Waste Using SuperPro Designer*. University of Malaysia. 1315-1320 pp."
- Intelligen. 2020. *SuperPro Designer*. Extraído de <https://www.intelligen.com/products/superpro-overview/>
- Korres. et al. (2013). *Bioenergy Production by Anaerobic Digestion*. Routledge Publisher. 473 pp.
- MAGA. (2010). *ACUERDO GUBERNATIVO No. 342-2010* (pp. 1–2). Guatemala.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. 2014. *Guía para la Identificación Gráfica de los Residuos Sólidos Comunes*. Departamento para el Manejo de los Residuos y los Desechos Sólidos. 16 págs.

"Moretti, *et al.* 2021. *Characterization of municipal biowaste categories for their capacity to be converted into a feedstock aqueous slurry to produce methane by anaerobic digestion.* Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil. 18 pp."

Organic Waste Systems. 2021. *Dranco Process*. DRANCO. Extraído de https://dranco.be/household_waste/dranco/

Pullen. T. (2015). *Anaerobic Digestion - Making Biogas - Making Energy*. Routledge Publisher. 201 pp

Rajivgandhi, M.M., & Singaravelu, M. (2014). *Purification and Upgrading of Biogas by Physical Absorption Process*. Trends in Biosciences, 7, 1278-1282.

Rocamora. I. *et al.* 2020. *Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance*. Bioresource Technology. Volume 299

Rolz. C. *Procesamiento de aguas domésticas e industriales, basura municipal y desechos agroindustriales como productores netos de energía*. Universidad del Valle de Guatemala. 98 pp.

Upreti, *et al.* (2017). *Process Modeling and Simulation for Chemical Engineers: Theory and Practice*. Wiley. 345 pp.

Wellinger. A, Murphy. J, Baxter. D. (2013). *The Biogas Handbook*. Woodhead Publishing Limited. 512 págs.

Yu, L., Wensel, P., Ma, J., & Chen, S. (2013). *Mathematical Modeling in Anaerobic Digestion (AD)*. Journal of Bioremediation and Biodegradation, 2014, 1-12.

XII. Anexos

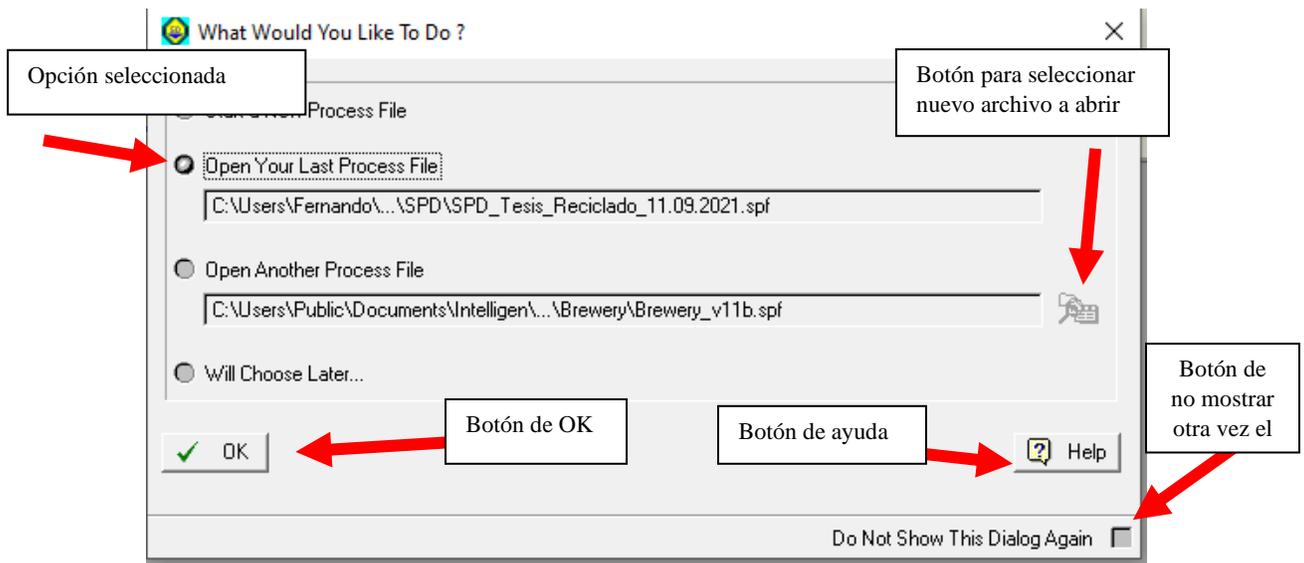
A. Guía rápida para uso de SuperPro Designer ®

A continuación, se presenta una guía básica para el manejo del software SuperPro Designer ® versión 10, compilación 10 para el desarrollo de una simulación de procesos.

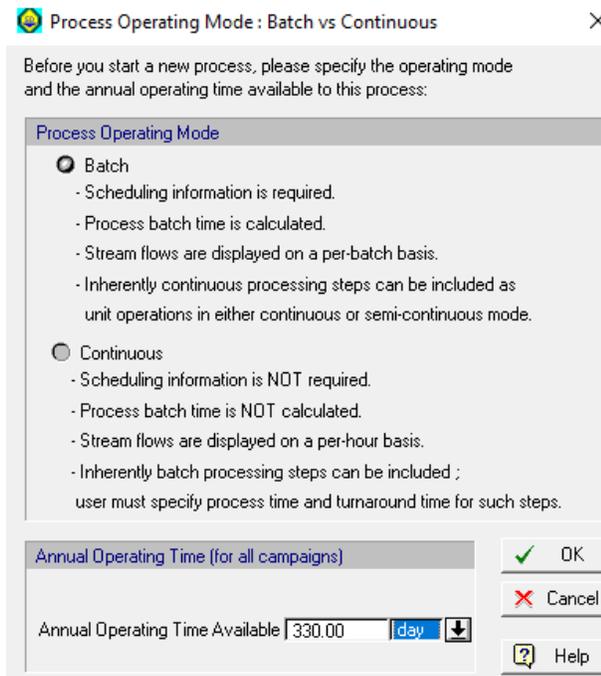
1. Dar doble clic en el ícono de SuperPro Designer ® en la pantalla principal del ordenador.



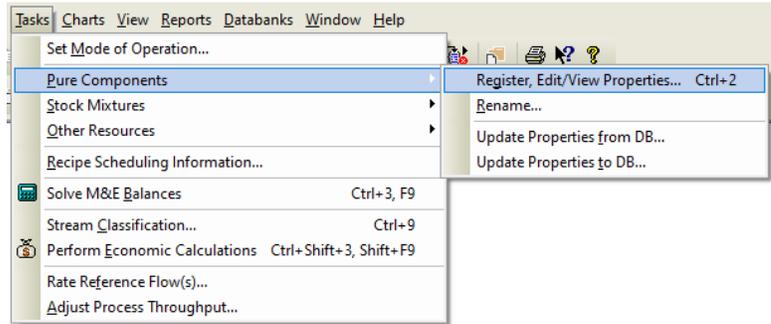
2. Elegir la opción a iniciar en el programa según la imagen siguiente. Se puede elegir entre: Abrir un nuevo archivo, abrir el último archivo utilizado, abrir algún otro archivo y finalmente indicar que se especificará luego esta decisión. Seleccionar la opción dando clic en ícono circular a la izquierda de las opciones y luego clic en el botón de ok. Se puede seleccionar el recuadro inferior derecho con un clic para no volver a mostrar este mensaje al iniciar el software.



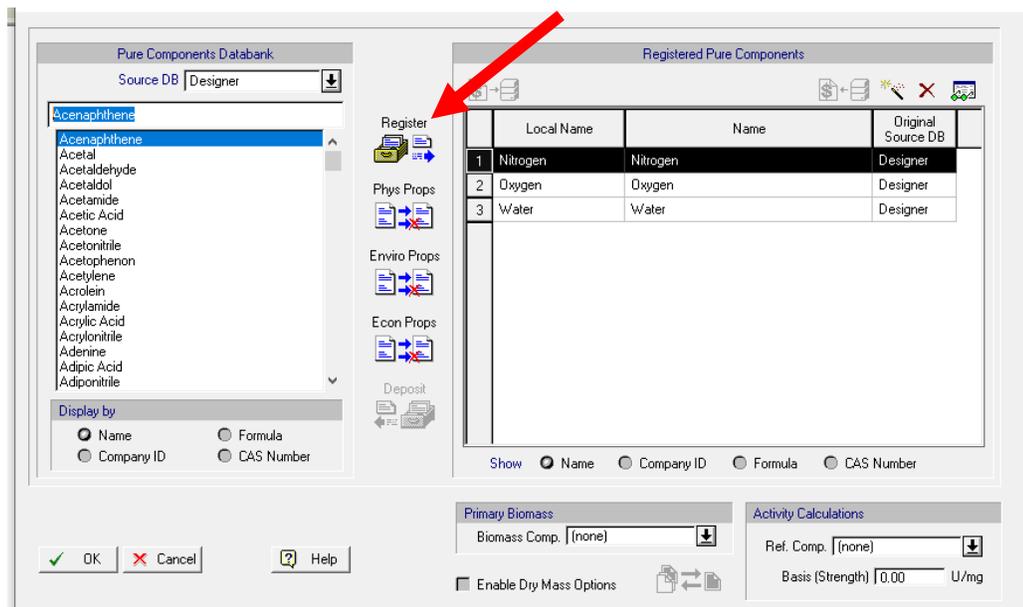
3. Tomando el caso de un nuevo archivo aparecerá un recuadro en donde se deberá elegir el modo de operación del proceso a modelar dando clic en la opción deseada, continuo o por lotes. También muestra el tiempo anual de operación de la planta, y este se puede modificar tanto su valor como sus unidades en que aparece.



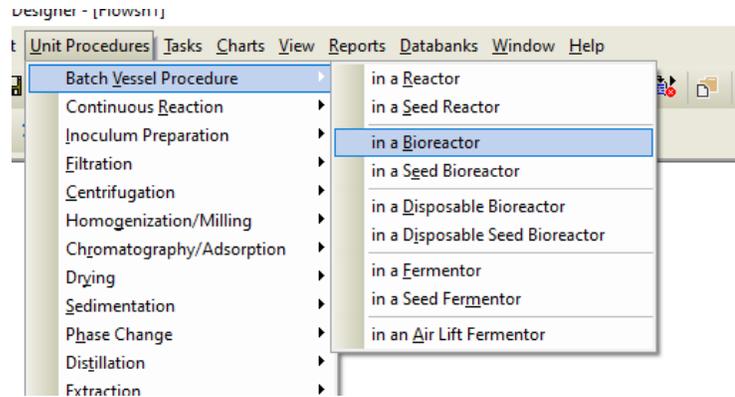
- Luego aparecerá la pantalla principal del programa, una hoja en blanco y un tablero con varios símbolos y secciones.
- Para agregar los componentes con los que se trabajará en el programa se sigue la secuencia de selecciones: *Tasks>Pure components>Register* como se muestra en la siguiente imagen.



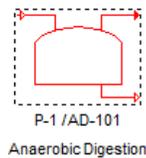
- Esto abrirá una nueva ventana con la opción de los compuestos registrados en la base de datos del software. Para agregar un nuevo componente a la librería del archivo oprimir el botón de Register o dar doble clic en el compuesto deseado.



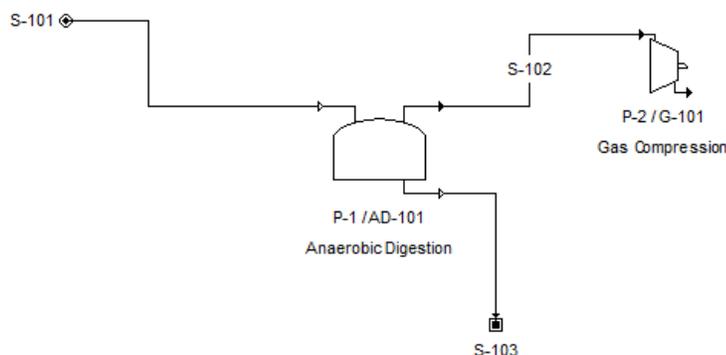
- Para agregar unidades de proceso es una secuencia similar, en el tablero se sigue la siguiente ruta: *Unit Procedures* y se selecciona la unidad deseada. Puede que en algunas ramas haya más opciones a seleccionar de equipos, esto depende del proceso que se esté buscando.



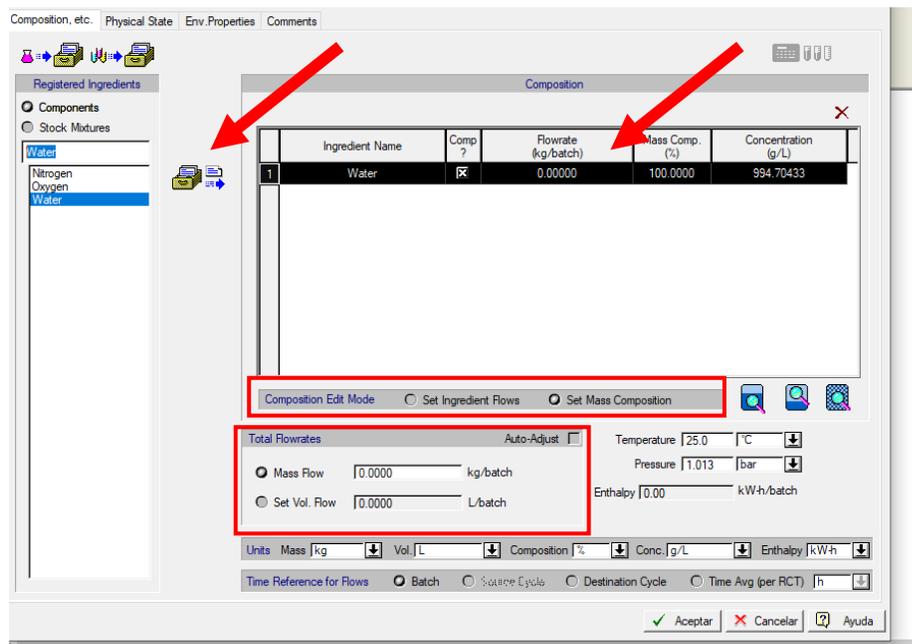
8. Luego se debe dar clic en la pantalla en blanco para poder agregar la unidad de operación en el modelo. Como se muestra en la siguiente imagen:



9. Para agregar una corriente de flujo se debe seleccionar el siguiente símbolo  luego en la pantalla en blanco elegir un área en donde se desea colocar la línea y dar clic para comenzar a crearla. Después de iniciar con ella, al dar un clic podrán hacer cruces en 90 grados para la línea. Para finalizar con ella, dar doble clic en el punto final o un solo clic en la entrada seleccionada del equipo continuo. Esto funciona de igual manera para líneas que salen de algún equipo.



10. Para configurar las líneas de flujo dar doble clic en ellas y esto abrirá una nueva ventana en donde se podrán seleccionar los componentes a agregar en la corriente. Oprimir el botón mostrado en la siguiente imagen o dar doble clic en el componente a agregar.



11. Se puede modificar el flujo directo de cada componente en la tercera columna del recuerdo central blanco o se puede indicar un flujo total (kg/lote o kg/h) en el espacio de Total Flowrates. Esto se modifica en los botones de Composition edit mode como se muestra en la imagen anterior.

12. Luego se pueden configurar las condiciones de operación para cada unidad en el simulador, estas aparecen al dar doble clic en la unidad y varía dependiendo del tipo.

13. Una vez teniendo los flujos y condiciones establecidas se pueden establecer los parámetros económicos del proceso con la siguiente ruta: *Edit>Process Options>Economic Evaluation Parameters*.

14. Esto abrirá una nueva ventana en donde se podrán establecer valores como el tiempo de evaluación del proyecto, sus tasas de interés, financiamiento, nivel de producción y otros costos misceláneos a detallar.

Economic Evaluation Parameters for Entire Project

Time Valuation | Financing | Production Level | Misc.

Time Parameters

Year of Analysis: 2021

Year Construction Starts: 2021

Construction Period: 30 months

Startup Period: 4 months

Project Lifetime: 15 years

Inflation (to update equip. cost): 4.00 %

NPV Interest

Low: 7.00 %

Medium: 9.00 %

High: 11.00 %

Aceptar Cancelar Ayuda

15. Teniendo definido esto, se pueden realizar los balances de masa y energía del proceso y actualizar los parámetros económicos para cada unidad. Esto se realiza oprimiendo los siguientes símbolos  . Si todos los flujos de materia fueron realizados de manera apropiada, esto no dará ningún error. Pero de haber algún fallo, se desplegará en la parte inferior del programa y se deberá analizar.

B. Información ingresada y obtenida de SuperPro Designer ® en presente estudio

Figura 13. Diagrama completo del proceso de digestión anaerobia en SuperPro Designer ®.

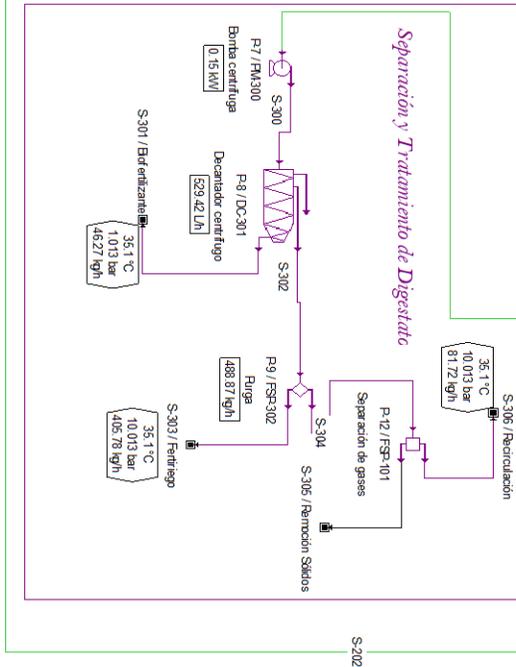
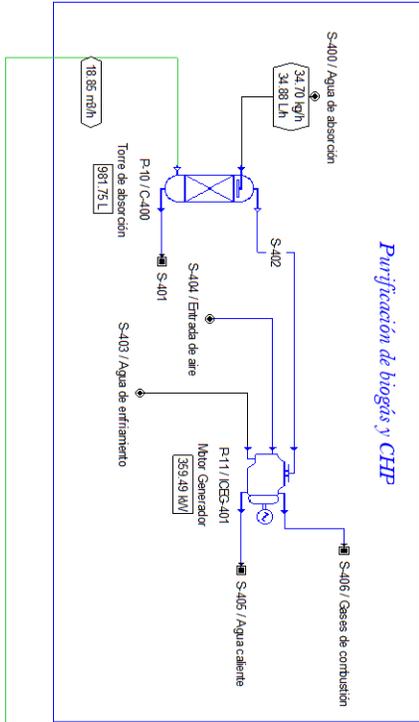
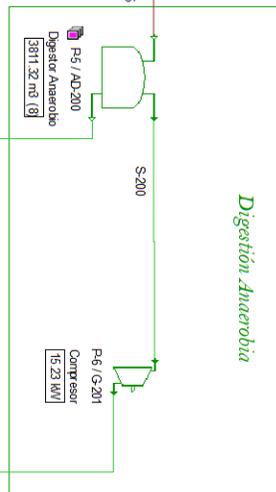
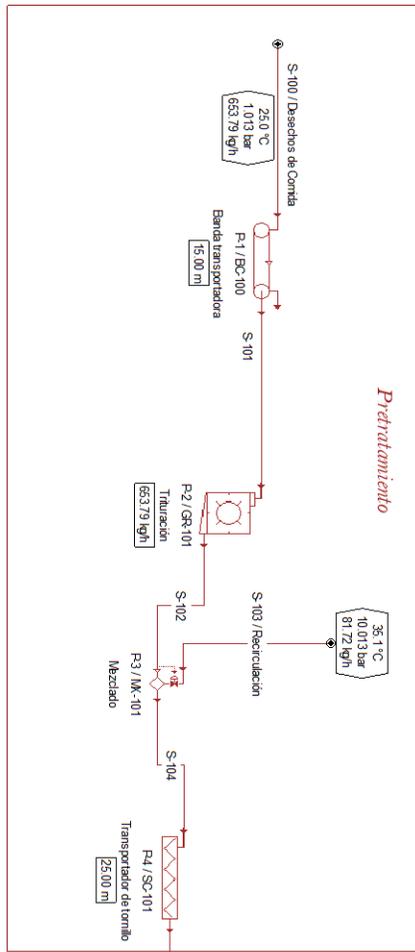


Tabla 14. Composición de los desechos de alimentos utilizados en la corriente de entrada del simulador.

Componente	Composición (% m/m)
Carbohidratos insolubles	55
Proteínas insolubles	26
Trioleína	19

Tabla 15. Composición de corriente de entrada principal al proceso de digestión anaerobia modalidad “seca” para ocho reactores.

Componente	Flujo (kg/h)	Composición (% m/m)
Residuos de Alimentos (FW)	215.7507	33
Agua	438.0393	67

Tabla 16. Composición de corriente de entrada principal al proceso de digestión anaerobia modalidad “seca” para un reactor.

Componente	Flujo (kg/h)	Composición (% m/m)
FW	11.4180	33
Agua	23.1820	67

Figura 14. Balance de masa para el digestor anaerobio en modalidad seca en Microsoft Excel ®.

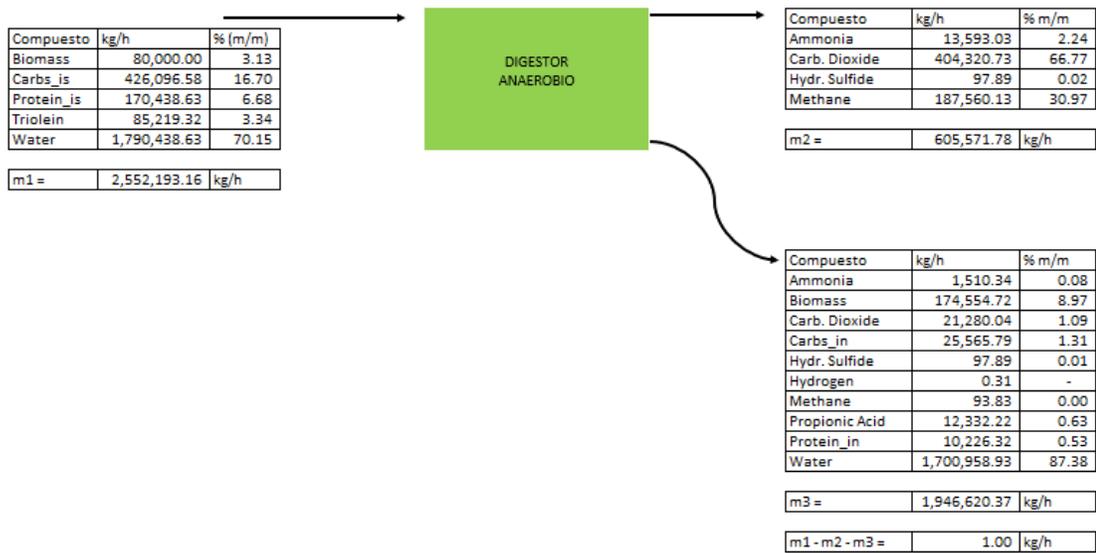


Figura 15. Balance de masa y energía para el motor-generador del proceso en Microsoft Excel ®.

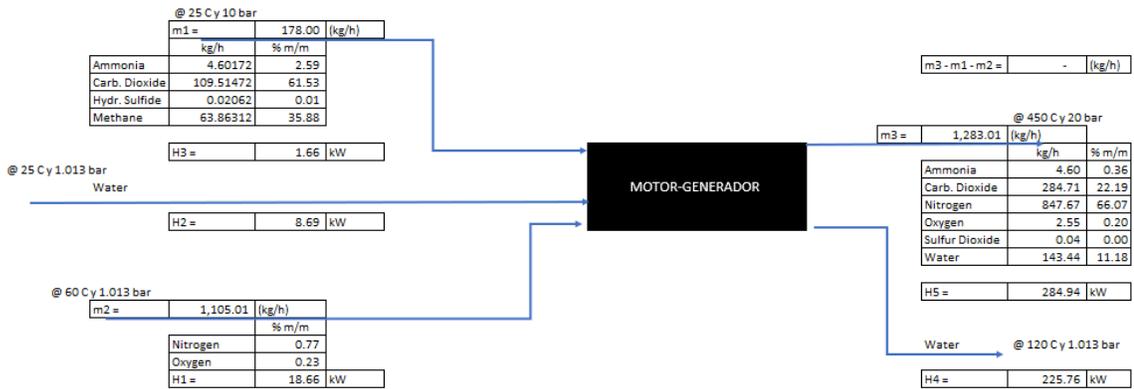


Tabla 17. Inversión de capital inicial del proyecto por secciones para ocho reactores extraído de SuperPro Designer ® (en dólares estadounidenses).

Sección	Costo compra de equipo	Costos directos fijos	Capital de trabajo	Iniciación y validación	Inversión total de capital
Pretratamiento	27,988	161,741	4,314	8,087	174,142
Digestión anaerobia	1,047,500	5,815,412	9,356	290,771	6,115,539
Digestato	2,563	15,937	1,245	797	17,979
Purificación biogás	9,853	61,275	18,306	3,064	82,644
Total	1,087,903	6,054,364	33,221	302,718	6,390,303

Tabla 18. Inversión de capital inicial del proyecto por secciones para un reactor (en dólares estadounidenses).

Sección	Costo compra de equipo	Costos directos fijos	Capital de trabajo	Iniciación y validación	Inversión total de capital
Pretratamiento	27,988	161,741	4,314	8,087	174,142
Digestión anaerobia	216,250	1,257,502	7,227	62,875	1,327,604
Digestato	2,563	15,937	1,213	797	17,946
Purificación biogás	9,853	61,275	5,658	3,064	69,997
Total	256,653	1,496,454	18,412	74,823	1,589,689

Tabla 19. Costos de operación de la planta de biogás para ocho reactores (en dólares estadounidenses).

Rubro	US \$	%
Materia Prima	147,000	9.57
Mano de obra	150,000	9.8
Instalaciones y equipo	1,147,000	74.72
Laboratorios	23,000	1.47
Servicios auxiliares	68,000	4.44
Total	1,535,000	100

Tabla 20. Costos de operación de la planta de biogás para un reactor (en dólares estadounidenses).

Rubro	US \$	%
Materia Prima	8,000	1.53
Mano de obra	150,000	29.63
Instalaciones y equipo	282,000	55.65
Laboratorios	23,000	4.44
Servicios auxiliares	44,000	8.75
Total	507,000	100.00

Figura 16. Flujo de caja a 15 años del proyecto de planta de biogás para ocho reactores.

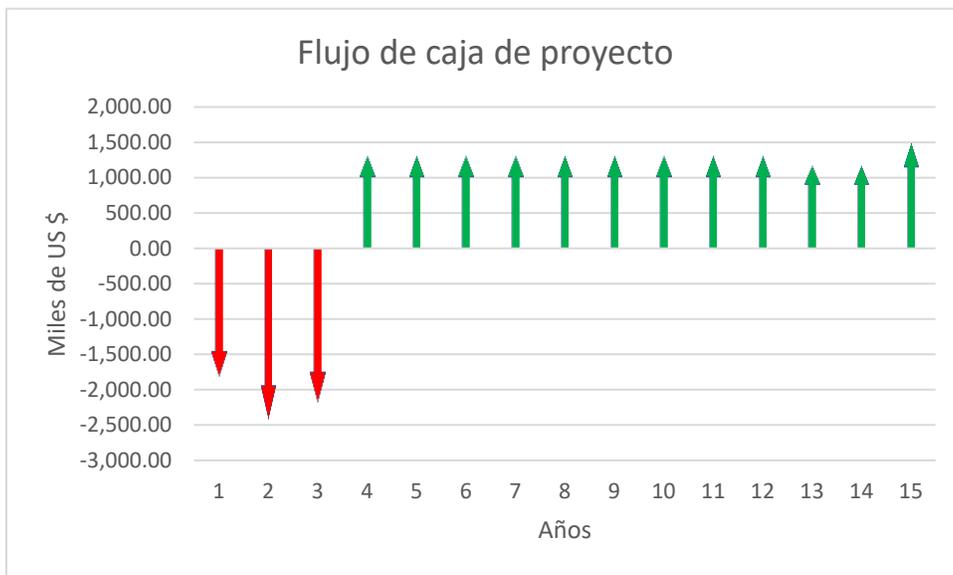


Tabla 21 Desglose del Flujo de efectivo para planta con 8 reactores (en miles de quetzales)

Año	Inversión Inicial	Ventas	Costo de Operación	Depreciación	Impuestos	Flujo neto de Caja
1	- 14,020	-	-	-	-	-
2	- 18,698	-	-	-	-	-
3	- 14,174	3,065	10,129	4,439	-	16,806
4	-	18,366	10,723	4,439	1,915	10,175
5	-	18,366	10,723	4,439	1,915	10,175
6	-	18,366	10,723	4,439	1,915	10,175
7	-	18,366	10,723	4,439	1,915	10,175
8	-	18,366	10,723	4,439	1,915	10,175
9	-	18,366	10,723	4,439	1,915	10,175
10	-	18,366	10,723	4,439	1,915	10,175
11	-	18,366	10,723	4,439	1,915	10,175
12	-	18,366	10,723	4,439	1,915	10,175
13	-	18,366	6,284	-	3,019	9,063
14	-	18,366	6,284	-	3,019	9,063
15	2,494	18,366	6,284	-	3,019	11,557

Figura 17. Flujo de caja a 15 años del proyecto de planta de biogás para un reactor.

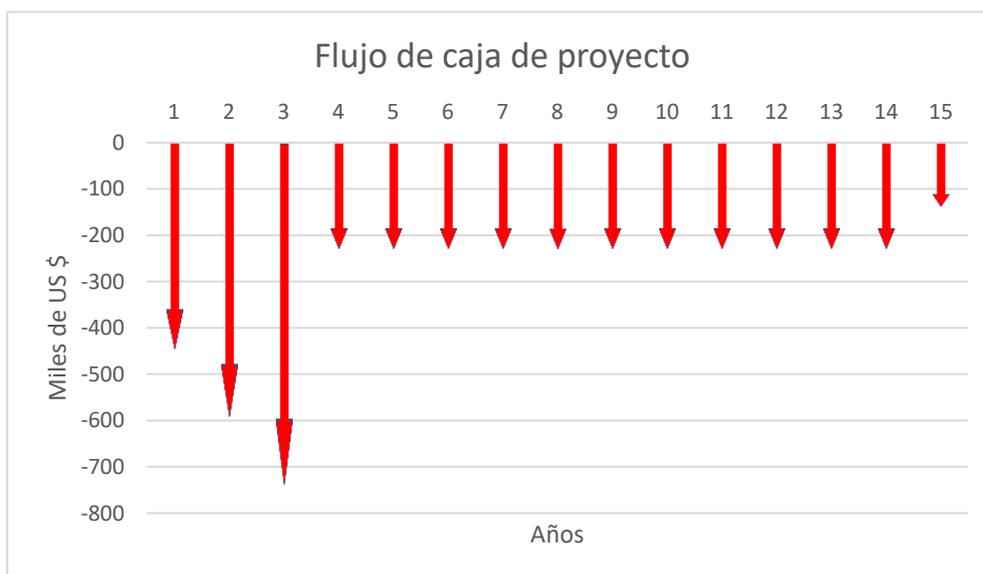


Tabla 22 Desglose del Flujo de efectivo para planta con 1 reactor (en miles de quetzales)

Año	Inversión Inicial	Ventas	Costo de Operación	Depreciación	Impuestos	Flujo neto de Caja
1	- 3,466	-	-	-	-	- 3,466
2	- 4,624	-	-	-	-	- 4,624
3	- 3,605	162	3,435	1,096	-	- 5,782
4	-	980	3,922	1,096	-	- 1,837
5	-	980	3,922	1,096	-	- 1,837
6	-	980	3,922	1,096	-	- 1,837
7	-	980	3,922	1,096	-	- 1,837
8	-	980	3,922	1,096	-	- 1,837
9	-	980	3,922	1,096	-	- 1,837
10	-	980	3,922	1,096	-	- 1,837
11	-	980	3,922	1,096	-	- 1,837
12	-	980	3,922	1,096	-	- 1,837
13	-	980	2,818	-	-	- 1,837
14	-	980	2,818	-	-	- 1,837
15	718	980	2,818	-	-	- 1,119

Tabla 23. Periodo de retorno de la inversión para planta de biogás con ocho reactores y otros indicadores (en dólares estadounidenses).

Indicador	Valor	Unidad
Margen de ganancias brutas	398.62	%
Retorno de la inversión	120.32	%
Periodo de retorno de la inversión	1.33	años
Tasa interna de retorno (después de impuestos)	12.60	%
Valor presente neto (a 7.0% de interés)	2,407,194.00	US \$

Tabla 24. Periodo de retorno de la inversión para planta de biogás con un reactor y otros indicadores (en dólares estadounidenses).

Indicador	Valor	Unidad
Margen de ganancias brutas	60.16	%
Retorno de la inversión	12.52	%
Periodo de retorno de la inversión	7.99	años
Tasa interna de retorno (después de impuestos)	N. A	%
Valor presente neto (a 7.0% de interés)	- 3,281,769.00	US \$

Tabla 25. Costo de los equipos utilizados en la planta de Digestión anaerobia con 8 reactores.

Código	Descripción	Cantidad	Costo unitario (US \$)	Costo total (US \$)
AD-200	Digestor anaerobio	8	95,000	760,000
G-201	Compresor centrífugo	1	78,000	78,000
SC-101	Transportador de tornillo	1	10,000	10,000
GR-101	Triturador	1	9,000	9,000
C-400	Torre de absorción	1	7,000	7,000
BC-100	Banda transportadora	1	4,000	4,000
DC-301	Decantador centrífugo	1	1,000	1,000
PM-300	Bomba centrífuga	1	1,000	1,000
ICEG-401	Motor-generador IC	1	1,000	1,000
	Equipo no enlistado			218,000
Total				1,089,000

Tabla 26. Costo de los equipos utilizados en la planta de digestión anaerobia con 1 reactor.

Código	Descripción	Cantidad	Costo unitario (US \$)	Costo total (US \$)
AD-200	Digestor anaerobio	1	95,000	95,000
G-201	Compresor centrífugo	1	78,000	78,000
SC-101	Transportador de tornillo	1	10,000	10,000
GR-101	Triturador	1	9,000	9,000
C-400	Torre de absorción	1	7,000	7,000
BC-100	Banda transportadora	1	4,000	4,000
DC-301	Decantador centrífugo	1	1,000	1,000
PM-300	Bomba centrífuga	1	1,000	1,000
ICEG-401	Motor-generador IC	1	1,000	1,000
	Equipo no enlistado			218,000
Total				424,000

Tabla 27. Relaciones de costos de inversión inicial para la Planta de Biogás en SuperPro Designer[®].

Relaciones de costos de inversión	%	Derivado
Costo de compra de equipo no enlistado	20	PC
Costos directos		
Tuberías	35	PC
Instrumentación	40	PC
Aislamiento	3	PC
Instalaciones eléctricas	10	PC
Edificios	45	PC
Mejoras del suelo	15	PC
Instalaciones auxiliares	40	PC
Costos indirectos		
Ingeniería	25	DC
Construcción	35	DC
Otros		
Tarifa de contratista	5	(DC + IC)
Contingencia	10	(DC + IC)

Nota: PC = Costo de compra de equipo listado, DC = Costos directos, IC = Costos indirectos

Tabla 28. Costos de la Mano de Obra para la planta de biogás en Guatemala

	Salario		Cantidad
	US \$/h	Q/h	
Colaboradores			
Operadores	3.91	30.19	4
Supervisores	6.09	47.01	3

Nota: Salarios basados en jornada diurna por el Ministerio de Trabajo de Guatemala 2022

- C. Corroboración de nutrientes presentes en el biofertilizante obtenido según el acuerdo gubernativo 342-2010.

Tabla 29. Comparación entre nutrientes en el biofertilizante obtenido del simulador y los indicados por el acuerdo gubernativo 342-2010.

Nutrientes	Presentes en el producto	Presentes en el acuerdo
Nitrógeno	Sí	Sí
Fósforo	Sí	Sí
Potasio	No	Sí

- D. Parámetros básicos empleados en las operaciones del simulador

Tabla 30. Datos básicos de las unidades de operación utilizadas en el simulador.

	Operación(es)	Parámetro	Valor	Unidad
Banda transportadora	P-1/BC 100	Largo	15	m
		Ancho	0.07	m
		Potencia	0.5	kW
Triturador	P-2/GR-101	Potencia	7.5	kW
		Potencia disipada a calor	15	%
Transportador de tornillo	P-4/SC-103	Largo de tubería	25	m
		Diámetro de tubería	0.08	m
		Potencia	18.5	kW
		Velocidad angular	59	RPM
Reactor anaerobio	P-5/AD-200	Volumen total	3811.32	m ³
		Temperatura de salida	35	°C
		Presión de operación	1.013	bar
		Tiempo de residencia de sólidos	25	días
		Relación volumen de trabajo/volumen total	90	%
		Eficiencia de transferencia de calor	85	%

Operación(es)		Parámetro	Valor	Unidad
Compresor	P-6/G-201	Potencia	15.23	kW
		Eficiencia	98.71	%
		Cambio en presión	9	bar
		Eficiencia de transferencia de calor	97	%
		Potencia disipada a calor	1.29	%
Bomba centrífuga	P-7/PM-300	Potencia	0.15	kW
		Eficiencia	88	%
		Potencia disipada a calor	12	%
		Cambio en presión	9	bar

Tabla 31. Continuación de datos básicos de las unidades de operación utilizadas en el simulador de digestión anaerobia.

Operación(es)		Parámetro	Valor	Unidad
Decantador centrífugo	P-8/DC-301	Caudal	0.53	m ³ /h
		Potencia	0.1135	kW
		Potencia disipada a calor	20	%
Torre de absorción	P-10/C-400	Altura	5	m
		Diámetro de torre	0.5	m
		Tipo de empaque	Anillos Pall	-
		Material de empaque	Plástico	-
		Diámetro del empaque	0.016	m
		Presión de operación	10	bar (a)
		Especificación de temperatura en flujos de salida	Asumir equilibrio térmico	-
		Absorción de CO ₂	16	%
		Absorción de H ₂ S	60	%
		Motor de combustión interna-generador	P-11/ICEG-401	Potencia
Exceso de oxígeno	1			%
Flujo de aire	1105			kg/h
Calor entrante	0.88			MW
Pérdidas de calor	12			%
Temperatura de salida de gases de chimenea	450			°C
Presión de salida de gases de chimenea	20			bar (a)
Eficiencia térmica	45			%
Eficiencia del generador	90			%
Eficiencia eléctrica	40.5	%		

E. Datos ingresados al simulador para los compuestos utilizados en el proceso.

Tabla 32. Propiedades físicas básicas de los componentes ingresados

Componente	Peso molecular (g/gmol)	T. ebullición (° C)	T. fusión (° C)	H ^o _f (J/gmol)
Ácido acético	60.05	117.95	16.65	- 484,500.00
Ácido acrílico	72.06	140.05	13.00	- 383,880.00
Amoníaco	17.03	- 33.37	- 77.74	- 45,898.00
Argón	39.95	- 185.87	- 189.37	0.00
Biomasa	113.12	287.85	- 273.15	0.00
Ácido butírico	88.11	164.85	- 5.20	- 533,800.00
Dióxido de carbono	44.01	- 87.40	- 78.00	- 393,510.00
Carbohidratos	162.14	100.05	- 273.15	0.00
Carbohidratos inertes	162.14	100.05	- 273.15	0.00
Carbohidratos insolubles	162.14	100.05	- 273.15	0.00
Carbohidratos solubles	162.14	100.05	- 273.15	0.00
Grasas	147.60	100.05	- 273.15	0.00
Glicerol	92.09	287.85	18.18	- 669,600.00
Sulfuro de hidrógeno	34.08	- 60.35	- 85.47	- 20,630.00
Hidrógeno	2.02	- 252.71	- 259.20	0.00
Hidrógeno propionato	2.02	- 252.71	- 259.20	0.00
Hidrógeno butirato	2.02	- 252.71	- 259.20	0.00
Metano	16.04	- 161.45	- 182.46	- 74,520.00
Nitrógeno	28.01	- 195.76	- 210.00	0.00
Ácido oleico	282.47	359.85	13.38	- 802,491.00
Oxígeno	32.00	- 182.84	- 218.79	0.00
Ácido propiónico	74.08	140.65	- 20.70	- 508,500.00
proteínas inertes	27.89	100.05	- 273.15	0.00
proteínas insolubles	27.89	100.05	- 273.15	0.00
Proteínas solubles	27.89	100.05	- 273.15	0.00
Proteínas	27.89	100.05	- 273.15	0.00
Dióxido de azufre	64.06	- 9.95	- 73.15	- 296,840.00
Trioleína	885.40	419.10	- 13.00	- 35,996.00

Componente	Peso molecular (g/gmol)	T. ebullición (° C)	T. fusión (° C)	H^o_f (J/gmol)
Ácido valérico	102.13	186.35	0.00	- 490,679.00
Agua	18.02	100.00	0.00	- 285,830.00

Tabla 33. Propiedades críticas de los componentes ingresados

Componente	Tc (° C)	Pc (bar)	Zc
Ácido acético	321.30	57.90	0.20
Ácido acrílico	341.85	56.70	0.23
Amoníaco	132.39	117.06	0.24
Argón	- 122.29	48.98	0.29
Biomasa	1,086.85	50.00	0.23
Ácido butírico	342.55	40.64	0.23
Dióxido de carbono	31.03	75.27	0.27
Carbohidratos	374.19	221.20	0.24
Carbohidratos inertes	374.19	221.20	0.24
Carbohidratos insolubles	374.19	221.20	0.24
Carbohidratos	374.19	221.20	0.24
Grasas	374.19	221.20	0.24
Glicerol	576.85	75.00	0.28
Sulfuro de hidrógeno	100.38	89.63	0.28
Hidrógeno	- 240.15	12.90	0.30
Hidrógeno propionato	- 240.15	12.90	0.30
Hidrógeno butirato	- 240.15	12.90	0.30
Metano	- 82.75	46.00	0.29
Nitrógeno	- 146.90	34.65	0.29
Ácido oleico	507.85	13.90	0.21
Oxígeno	- 118.39	51.81	0.29
Ácido propiónico	327.66	46.17	0.22
Proteínas inertes	374.19	221.20	0.24
Proteínas insolubles	374.19	221.20	0.24
Proteínas	374.19	221.20	0.24
Proteínas	374.19	221.20	0.24
Dióxido de azufre	157.60	78.84	0.27
Trioleína	4,145.18	2.46	0.05

Componente	Tc (° C)	Pc (bar)	Zc
Ácido valérico	370.85	36.30	0.24
Agua	374.19	221.20	0.24

Tabla 34. Composición de las mezclas ingresadas al simulador.

	Ingrediente	%(m/m)
FW	Proteínas insolubles	26.00
	Trioleína	19.00
	Carbohidratos insolubles	55.00
	Ingrediente	%(m/m)
Aire	Oxígeno	23.29
	Nitrógeno	76.71

Tabla 35. Corridas variando el flujo de alimentación en la planta de biogás y su efecto en las variables técnicas y económicas del proceso.

No.	Alimentación (kg/h)	Volumen (m ³)	N	Biogás original (m ³ /h)	Biogás NTP (m ³ /h)	Flujo de agua (m ³ /h)	VPN (\$)	PR	OPEX (\$)
1	35	1614	1	1.00	9.23	1.85	(3,281,769)	7.96	507,492
2	62	2905	1	1.80	16.61	3.32	(2,615,507)	5.89	514,784
3	112	2614	2	3.23	29.90	5.98	(2,493,995)	3.55	651,347
4	150	3498	2	4.32	40.01	8.00	(1,634,748)	2.90	661,319
5	202	3137	3	5.82	53.85	10.77	(1,477,509)	2.22	798,413
6	250	3886	3	7.21	66.68	13.34	(528,659)	1.97	811,075
7	300	3498	4	8.65	80.02	16.00	(500,008)	1.73	947,675
8	363	3388	5	10.47	96.87	19.37	(175,514)	1.68	1,087,742
9	400	3731	5	11.53	106.70	21.34	392,357	1.54	1,097,426
10	450	3498	6	12.97	120.03	24.01	411,760	1.48	1,234,023
11	500	3886	6	14.41	133.37	26.67	1,314,159	1.40	1,247,173
12	550	3664	7	15.86	146.71	29.34	1,333,567	1.37	1,383,770
13	654	3811	8	18.85	174.41	34.88	2,407,194	1.33	1,534,526

Notas: N = número de reactores, VPN = Valor Presente Neto, PR = Periodo de recuperación de la inversión, OPEX = Costos de operación anuales.

Figura 18. Análisis de sensibilidad de VPN en dólares estadounidenses vs alimentación.

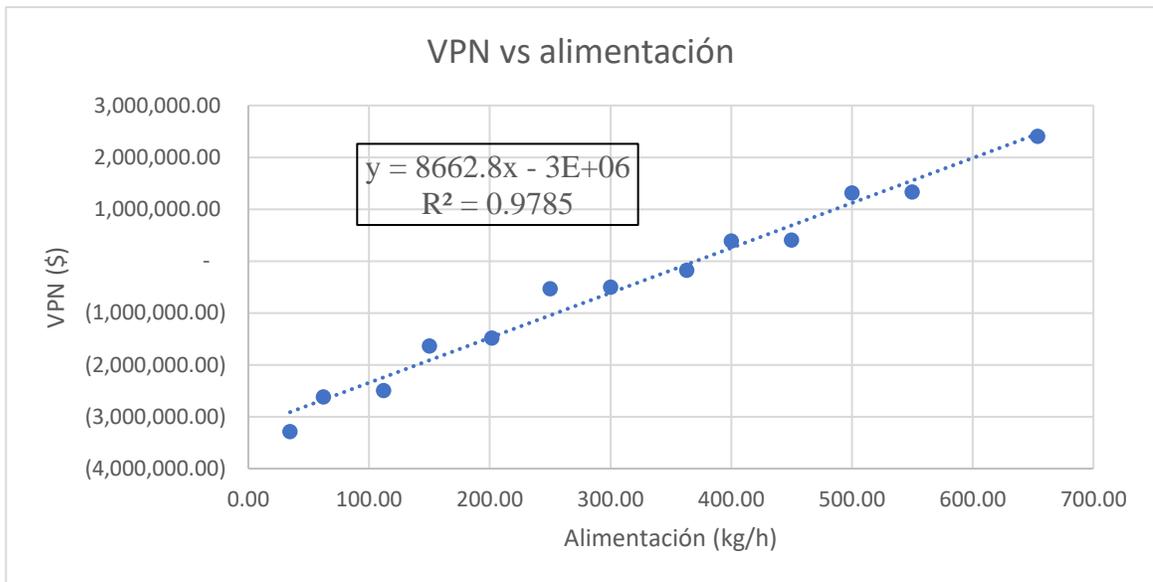


Figura 19. Análisis de sensibilidad de costo de operación anual en dólares vs alimentación.

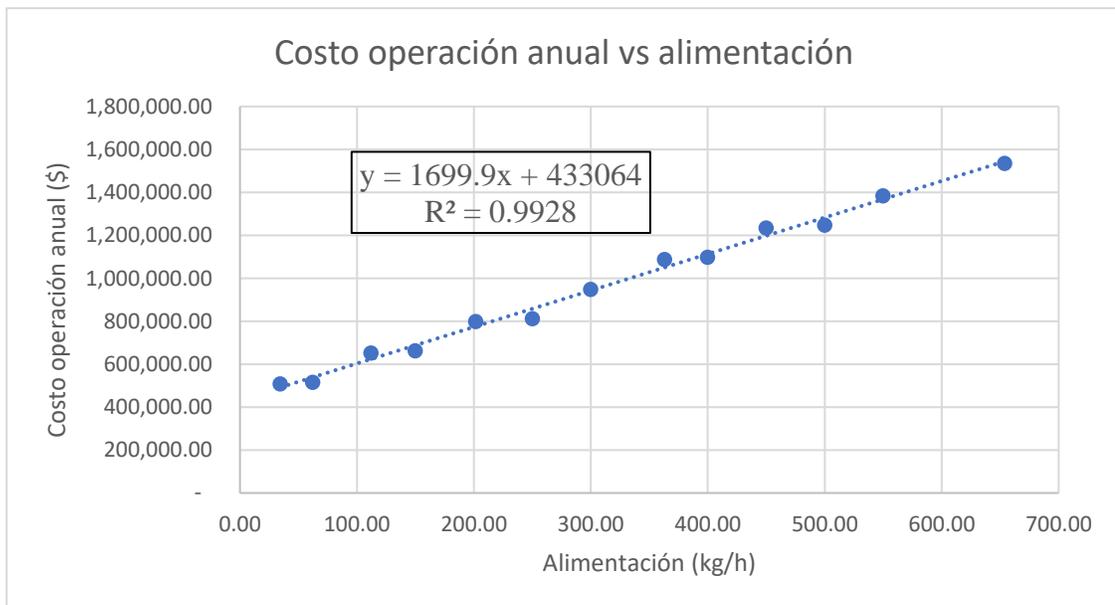


Figura 20. Análisis de sensibilidad de VPN en quetzales vs alimentación

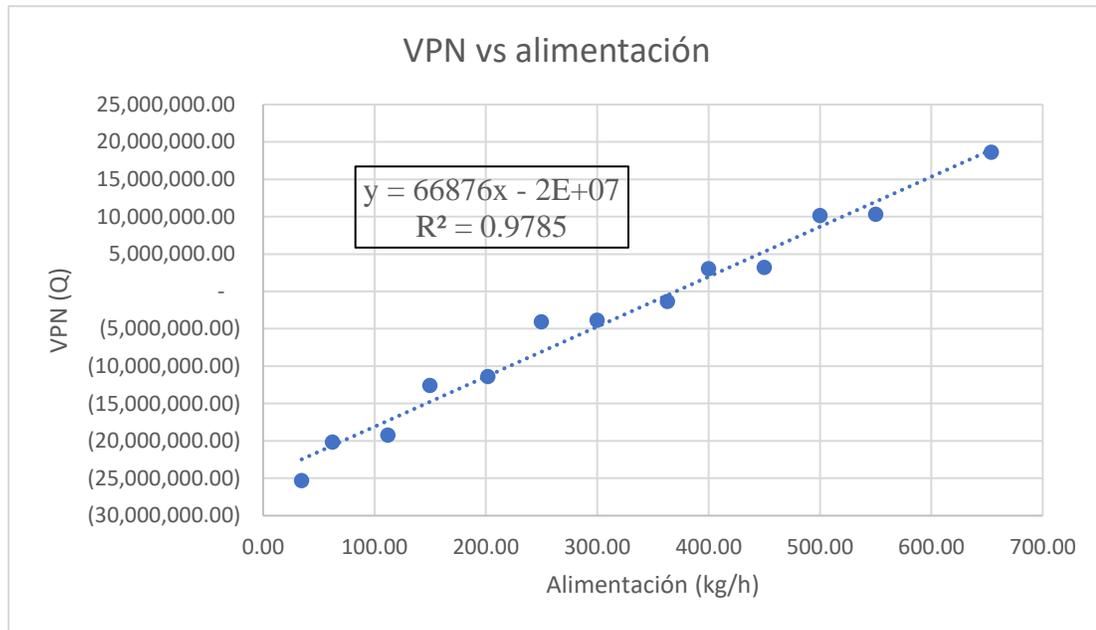


Figura 21. Análisis de sensibilidad de costo de operación anual en quetzales vs alimentación.

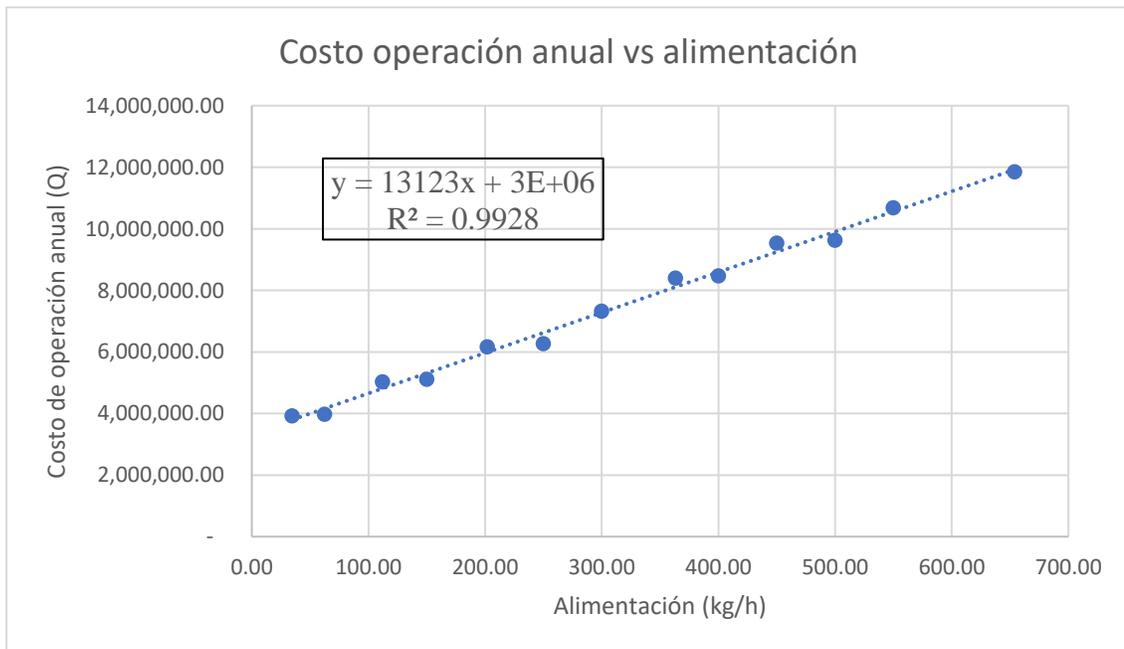
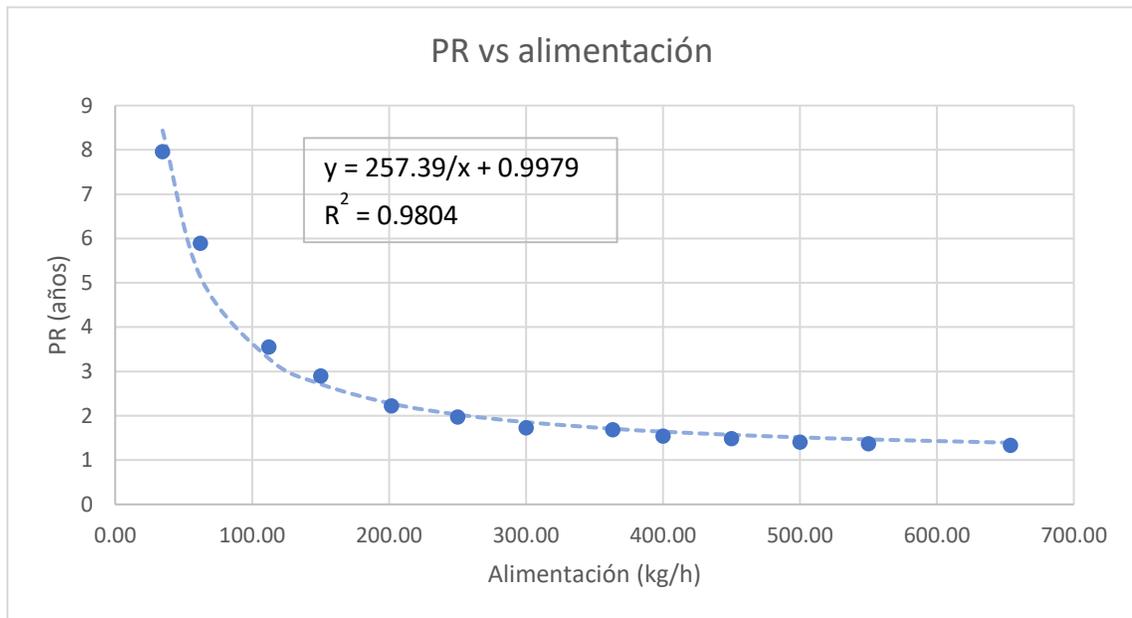


Figura 22. Análisis de sensibilidad de periodo de recuperación vs alimentación.



F. Reacciones ingresadas al reactor de digestión anaerobia. basado en: Liang, 2013

Tabla 36. Reacciones utilizadas en el digestor anaerobio en Super Pro Designer ®

Reacciones del proceso de digestión anaerobia	ΔH_f° (J/g)
$0.0062(C_6H_{10}O_5)_{is} \rightarrow 0.0058(C_6H_{10}O_5)_s + 0.004(C_6H_{10}O_5)_{in}$	-
$C_{57}H_{104}O_6 + 3H_2O \rightarrow C_3H_8O_3 + 3C_{18}H_{34}O_2$	-5.280E + 03
$0.0359(CH_{2.03}O_{0.6}N_{0.3}S_{0.001})_{is} \rightarrow 0.0337(CH_{2.03}O_{0.6}N_{0.3}S_{0.001})_s + 0.0022(CH_{2.03}O_{0.6}N_{0.3}S_{0.001})_{in}$	-
$(CH_{2.03}O_{0.6}N_{0.3}S_{0.001})_s + 0.31H_2O$ $\rightarrow 0.30C_2H_4O_2 + 0.28NH_3 + 0.02C_5H_7NO_2 + 0.02C_4H_8O_2 + 0.08CO_2 + 0.0010H_2S + 0.029C_3H_6O_2$ $+ 0.0132C_5H_{10}O_2$	1.867E + 05
$0.1115NH_3 + (C_6H_{10}O_5)_s \rightarrow 0.7440C_2H_4O_2 + 0.1115C_5H_7NO_2 + 0.4409C_4H_8O_2 + 0.6909CO_2 + 0.5C_3H_6O_2 + 0.0254H_2O$	3.740E + 05
$0.0458NH_3 + C_3H_6O_2 + 1.764H_2O \rightarrow 0.9345C_2H_4O_2 + 0.0458C_5H_7NO_2 + 0.9020CO_2 + 2.804H_2$	1.010E + 06
$0.1701NH_3 + 0.25CO_2 + 0.9998C_{18}H_{34}O_2 + 15.2398H_2O \rightarrow 8.6988C_2H_4O_2 + 0.1701C_5H_7NO_2 + 14.5H_2$	-1.130E + 05
$0.0544NH_3 + C_4H_8O_2 + 0.0544CO_2 + 1.7818H_2O \rightarrow 1.8909C_2H_4O_2 + 0.0544C_5H_7NO_2 + 1.8930H_2$	-8.720E + 04
$0.0830NH_3 + 3.8334CO_2 + 14.5H_2 \rightarrow 0.0838C_5H_7NO_2 + 3.4139CH_4 + 7.4997H_2O$	-1.610E + 08
$0.0653NH_3 + 0.5543CO_2 + C_5H_{10}O_2 + 0.8044H_2O \rightarrow 0.8912C_2H_4O_2 + 0.0652C_5H_7NO_2 + 0.002H_2 + 0.4454CH_4 + C_3H_6O_2$	-4.570E + 05
$0.0161NH_3 + 0.7413CO_2 + 2.804H_2 \rightarrow 0.0161C_5H_7NO_2 + 0.6614CH_4 + 1.45H_2O$	-3.110E + 07
$0.0109NH_3 + 0.4999CO_2 + 1.8930H_2 \rightarrow 0.0109C_5H_7NO_2 + 0.4452CH_4 + 0.97805H_2O$	-2.120E + 07
$C_2H_4O_2 + 0.022NH_3 \rightarrow 0.022C_5H_7NO_2 + 0.945CO_2 + 0.945CH_4 + 0.066H_2O$	1.350E + 06
$0.0407NH_3 + 0.0291CO_2 + C_3H_8O_3 \rightarrow 0.0407C_5H_7NO_2 + 0.9418C_3H_6O_2 + 1.093H_2O$	-3.640E + 03

XIII. Glosario

Bacterias mesofílicas: Son organismos vivos que se desarrollan de mejor manera en un ambiente con temperatura entre 25-40 °C. Mientras que a otras temperaturas su desempeño disminuye.

Biogás: Mezcla gaseosa que se compone principalmente de metano (50-75%), dióxido de carbono (20-50%) y trazas de vapor de agua, oxígeno, azufre y sulfuro de hidrógeno.

Biomasa: Conjunto de microorganismos que se ingresan a un sistema y que se reproducen con el tiempo.

Digestato: Fase líquida que es producto de la digestión anaerobia y puede ser utilizado como biofertilizante o procesado para mejorar su calidad y agregarle valor al producto.

Digestión anaerobia: Proceso realizado por una variedad de microorganismos en ausencia de oxígeno que genera un producto gaseoso rico en metano y uno líquido cargado de nutrientes como nitrógeno y potasio.

Exceso de oxígeno: es la cantidad de oxígeno adicional que se suministra en una corriente normalmente de aire para mejorar la conversión a energía de una combustión.

Modelo modular secuencial: Simulación basada en módulos independientes que siguen un orden específico como las operaciones de un proceso químico, donde se requiere el ingreso de los datos de entrada al modelo para calcular los valores de salida y otros parámetros de interés.

Modelo: Es la representación matemática de un proceso conocido empleando una o varias ecuaciones donde se incluyen las variables que controlan su comportamiento.

Residuos sólidos orgánicos: Son la fracción de los residuos sólidos que puede ser degradada por acción microbiana y obtener productos de valor.

Scrubber: Término en inglés para una torre de absorción de gases para remover un soluto de interés en la mezcla utilizando un líquido donde se pueda extraer el compuesto deseado.

Sólidos volátiles: Tipo de sólidos que pueden transformarse por la acción de microorganismos para obtener productos intermedios en procesos químicos.

Sustrato: Denominación que se le da a la materia prima utilizada en un proceso que involucra microorganismos, el cual es consumido por estos.

Tiempo de residencia: Valor en unidades de tiempo que le toma a la reacción completarse en el reactor utilizado.

Unidad combinada de calor y potencia: Unidad en donde se aprovecha la combustión de un combustible para la cogeneración de calor y energía eléctrica