

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

PERSPECTIVA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON BIO-METANO A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS(VERDURAS)

**REALIZAR UNA INVESTIGACIÓN REFERENTE A LA
PRODUCCIÓN DE GAS BIO-METANO A PARTIR DE DESECHOS
ORGÁNICOS Y, ESPECÍFICAMENTE, DE DESECHOS DE
VERDURAS. SE DEBERÁ ANALIZAR ASPECTOS DE DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE BIODIGESTORES, ASÍ COMO TAMBIÉN,
ASPECTOS DE EVALUACIÓN DEL PODER CALÓRICO DEL GAS
BIO-METANO A SER OBTENIDO.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

JUAN CARLOS SANTANA RAMIREZ

juan.santana01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. PAUL FABRICIO VASQUEZ MIRANDA

paul.vasquez@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Juan Carlos Santana Ramírez declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Juan Carlos Santana Ramírez

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Juan Carlos Santana Ramírez, bajo mi supervisión.

Ing. Paúl Fabricio Vásquez Miranda
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JUAN CARLOS SANTANA RAMIREZ

PAÚL FABRICIO VASQUEZ MIRANDA

DEDICATORIA

Esta tesis dedicó a mis padres, por darme el apoyo en los momentos más difíciles de mi carrera, por ayudarme a superarme en todo momento y así lograr culminar la carrera de ingeniería eléctrica.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por darme su apoyo incondicional especialmente a mi madre por permanecer a mi lado en los momentos más complicados y difíciles, siendo una guía para mi enseñándome a salir adelante con su ejemplo motivándome a superarme cada día.

A mi hermana por sus consejos sirviéndome como un ejemplo de superación personal y seguir adelante.

A los profesores de la Escuela Politécnica Nacional, que han sido la fuente de enseñanza a lo largo de estos años de estudio, siendo un pilar fundamental en los conocimientos profesionales adquiridos.

A mi director de tesis al Dr. Paul Vásquez, muchas gracias por la paciencia, dedicación, consejos y supervisión en la realización de esta tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCION.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Importancia de generación de energía eléctrica.....	3
1.4.2 Generación Distribuida.....	6
1.4.3 Tipos de generación de energía eléctrica.....	8
1.4.4 Biomasa	12
1.4.5 Procesos de transformación de energía.....	15
2 METODOLOGÍA.....	19
2.1 Producción de biometano a partir de desechos vegetales.....	19
2.1.1 Propiedades de la materia orgánica.....	19
2.1.2 Descomposición de la materia a biomasa	23
2.1.3 Recolección, almacenamiento y pretratamiento de la biomasa	24
2.1.4 Tecnologías del biodigestor	26
2.2 Estimación de biogás	35
2.2.1 A partir de concentración de sólidos volátiles (VS).....	36
2.2.2 A partir de la cinética de crecimiento de células.....	36
2.2.3 Calidad y Refinamiento de biogás.....	39
2.2.4 Almacenamiento de Biogás y Biometano	41
2.2.5 Diagrama de flujo obtención de biometano	43
2.3 Análisis económico y ambiental	44
2.3.1 Evaluación de costos y viabilidad económica.....	44
2.3.2 Impacto ambiental y emisiones asociadas.	50
2.3.3 Comparación con otras fuentes de energía renovable.	51
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52

3.1	Resultados	52
3.1.1	Estimación del Biometano.....	52
3.1.2	Viabilidad del Proyecto.....	60
3.2	Conclusiones	71
3.3	Recomendaciones	72
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
5	ANEXOS	79
	ANEXO I. Script de estimación de Biometano.....	80
	ANEXO II. Diagrama de bloques modelo de Monod	83
	ANEXO III. Diagrama de flujo obtención de biometano.....	84
	ANEXO IV. Análisis de Proyección a 20 años antes de ajuste de precio	85
	ANEXO V. Análisis de Proyección a 20 años después de ajuste de precio	86
	ANEXO VI. Análisis de Proyección a 15 años.....	87

RESUMEN

La presente investigación detalla los procesos necesarios para la obtención de biometano a partir de desechos vegetales, para esto se explica varios aspectos claves como su composición química, como la tecnología del biodigestor anaeróbico y el potencial rendimiento de obtención de biometano.

Además del aspecto técnico, se lleva a cabo un análisis financiero para evaluar la viabilidad económica de este proceso. Este análisis financiero es esencial para determinar la rentabilidad a largo plazo de la generación de biometano a partir de desechos vegetales.

PALABRAS CLAVE: biometano, biomasa, biogás, anaeróbico, hidrólisis.

ABSTRACT

This research details the processes necessary to obtain biomethane from plant waste, for this it explains several key aspects such as its chemical composition, such as the anaerobic biodigester technology and the potential yield for obtaining biomethane.

In addition to the technical aspect, a financial analysis is conducted to evaluate the economic viability of this process. This financial analysis is essential to determine the long-term profitability of generating biomethane from plant waste.

KEYWORDS: biomethane, biomass, biogas, anaerobic, hydrolysis.

1 INTRODUCCION

La dependencia de los recursos no renovables ha provocado en la actualidad la degradación de la capa de ozono, provocado por las elevadas cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero, como se muestra en la siguiente figura, donde la emisión de estos agentes contaminantes ha aumentado exponencialmente con el tiempo.

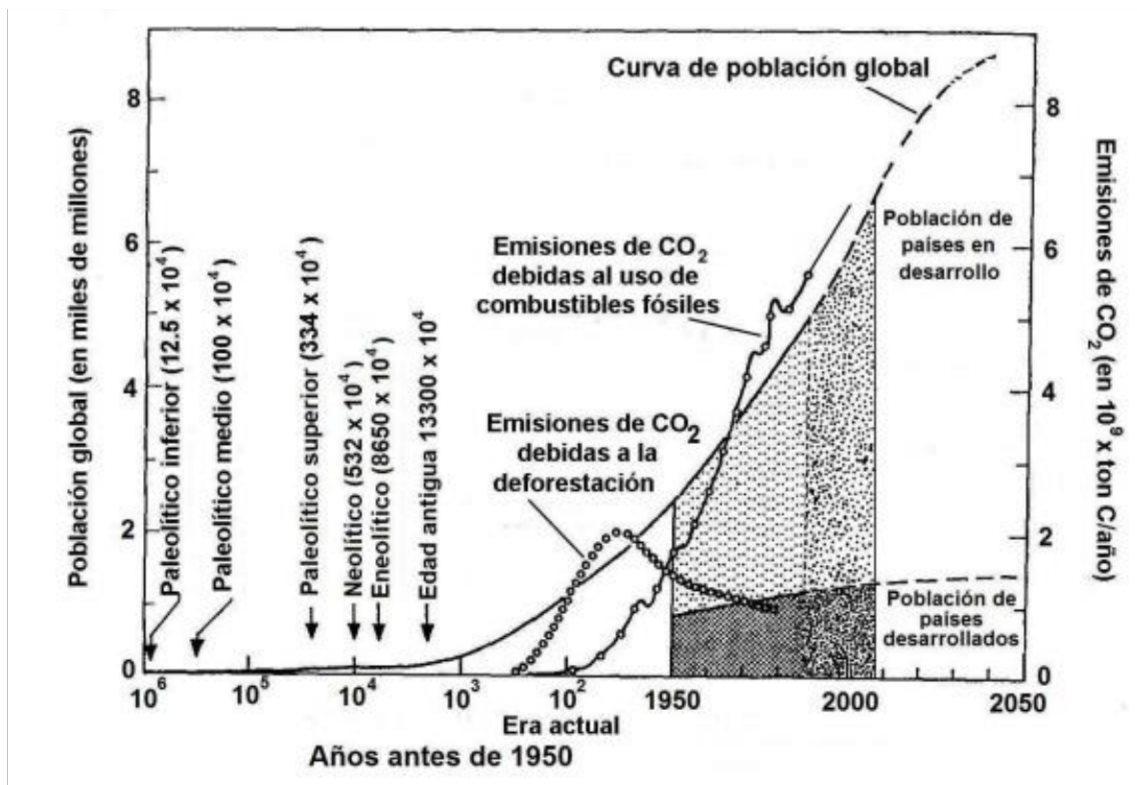


Figura 1.1. Correlación con la curva de emisión de CO₂ en el tiempo [1].

En los últimos años, en Ecuador, la combinación del uso irresponsable de recursos no renovables y la falta de inversión en el sector eléctrico desencadena problemas sociales y ambientales debido a la dependencia energética de combustibles fósiles. Ecuador se ha colocado como uno de los países que menos invierte en el aumento de la capacidad instalada, lo que ha generado interrupciones en el suministro eléctrico, molestias para la ciudadanía y, por ende, promovido el uso de combustibles contaminantes para la generación de electricidad. Este panorama da a conocer la necesidad urgente de explorar y adoptar alternativas respetuosas y sostenibles con el medio ambiente en el sector energético.

En este sentido, el uso de energías renovables emerge como una solución prometedora para mitigar los impactos negativos de la dependencia de los combustibles fósiles. Una de las nuevas y prometedoras fuentes de energías renovable es la generación eléctrica a partir

del biometano generada por residuos orgánicos, siendo esta una fuente renovable, sustentable y limpia debido a que realiza gestión eficiente de residuos orgánicos.

En Ecuador se generan alrededor de 20'483.220 toneladas de diversos cultivos, los residuos de estas cosechas están subutilizados, lo que genera problemas ambientales al no tratar este tipo de residuos correctamente y llegándoles a dar un segundo uso mediante el procesado y tratado de la biomasa orgánica [2].

Al considerar esta problemática, la presente investigación describe los procesos para la obtención de biometano mediante el tratamiento de residuos orgánicos. Además, se busca su caracterización mediante modelos matemáticos y se presenta una propuesta financiera para impulsar la implementación de estas tecnologías.

También se describen de forma parcial energías renovables ya implementadas y conocidas en el país para realizar una breve comparativa con este nuevo tipo de generación.

1.1 Objetivo general

Describir detalladamente los procesos para la obtención de biometano a partir de desechos de verduras en biodigestores con fines de generación de energía eléctrica, mediante investigación y análisis riguroso de referencias académicas nacionales e internacionales.

1.2 Objetivos específicos

1. Investigar sobre los distintos procesos para la obtención de biometano a partir de desechos de verduras en biodigestores con fines de generación de energía eléctrica en base a referencias y estudios ya realizados.
2. En base al análisis de referencias bibliográficas caracterizar la cantidad de biometano que se puede obtener a partir de desechos de verduras para determinar la energía eléctrica que se pueda obtener de este bio gas.
3. Establecer un conjunto de elementos a ser considerados en el diseño de biodigestores para la obtención de bio-metano, estos serán tomados a partir de modelos ya implementados internacionalmente.
4. En base a estudios ya realizados nacional e internacionalmente determinar el poder calórico y calidad del gas bio-metano que podría obtenerse en base a desechos de verduras, encontrando un modelo matemático que caracterice la operación del biodigestor.

1.3 Alcance

En base de la información proporcionada por las fuentes bibliográficas internacionales, se investigará un diseño y modelo ya implementado en el sector de generación a partir de biomasa. Se describirán y detallarán los procesos de construcción del bio digestor para desechos de verduras. También se explicará sus procesos de obtención y suministro que conlleve el sistema, que tendrá como objetivo final un biogás con las cualidades necesarias para ser usado en la generación de energía eléctrica.

Se realizarán análisis a partir de datos obtenidos de artículos internacionales sobre tipos de residuos orgánicos (verduras). En este análisis se explicará la eficiencia de producción de biometano a partir de dichos residuos, comparando los diferentes componentes de estos residuos.

Con el fin de analizar las condiciones de operación de los biodigestores, se elaborará simulaciones en un programa computacional (MATLAB). Esta modelación en el software permitirá conocer el funcionamiento teórico del biodigestor anaeróbico. Los eventos por variar en la simulación serán diferenciaciones de tiempo, cantidad de desechos y de temperatura.

Finalmente, se realizará una investigación detallada de la estimación de los combustibles provenientes de desechos de verduras. En bases bibliográficas se escogerá un modelo matemático que a partir del tipo del biodigestor y la cantidad de verdura ingresada a este aproxime la cantidad de bio gas resultante para la generación de energía eléctrica.

1.4 Marco teórico

En esta sección del presente trabajo, se aborda el análisis de antecedentes relacionados con las alternativas para generar energía eléctrica renovable en donde se enfatiza la generación a partir de biomasa. Se proporciona una descripción minuciosa de las características fundamentales de cada una de estas fuentes energéticas.

1.4.1 Importancia de generación de energía eléctrica

La generación de energía eléctrica es un proceso fundamental en la sociedad moderna ya que proporciona la base para el funcionamiento de la mayoría de las actividades económicas, sociales y domésticas. La electricidad se ha convertido en una necesidad básica de la vida diaria de las personas, impulsando el desarrollo de la ciencia y la tecnología, la industria, la comunicación y el bienestar de las personas. Por lo que es de vital importancia tomar en cuenta tanto alternativas de generación de energía como un

aumento de la carga instalada debido a la demanda por aumento de número de clientes y consumo. En este marco teórico, se explorará la importancia de la generación de energía desde diferentes perspectivas.

Puntos de Desarrollo:

➤ Desarrollo económico y productividad:

El suministro de electricidad fiable y accesible es un factor crucial en el avance económico. La generación de electricidad permite el funcionamiento de la maquinaria industrial, lo que ayuda en gran proporción a la producción en masa, estimula la innovación tecnológica y facilita la creación de empleo. La energía es un recurso fundamental en sectores como la industria, la agricultura, la minería y los servicios, contribuyendo a la productividad y competitividad de las economías.

➤ Sostenibilidad y medio ambiente:

La generación de energía también juega un papel vital en el desarrollo sostenible de la sociedad y la protección del ambiente. La transición a fuentes de energía renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica es primordial para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y atenuar los efectos del cambio climático. La electricidad generada a partir de fuentes renovables es limpia, no emite gases de efecto invernadero y reduce la contaminación del aire y del agua. Impulsar la generación de energía sustentable es una estrategia necesaria para asegurar un futuro energético limpio y más respetuoso con el entorno natural [3].

➤ Acceso universal a la energía:

La generación de electricidad es un factor decisivo para cerrar la brecha de acceso a la energía. Millones de personas en todo el planeta aún no tienen acceso a la energía eléctrica, lo que limita la calidad de vida y oportunidades de desarrollo. La expansión de la infraestructura de generación de energía es fundamental para proporcionar electricidad, iluminación, saneamiento mejorado, oportunidades educativas y desarrollo socioeconómico en comunidades rurales y áreas remotas. La generación de energía es un factor clave para conseguir el acceso universal a los servicios básicos [4].

➤ Seguridad energética:

La generación de electricidad juega un papel vital en la seguridad energética nacional. La diversificación de las fuentes de generación de energía y el fortalecimiento de la infraestructura son esenciales para garantizar un suministro energético ininterrumpido. La

dependencia exclusiva de una fuente de generación energética o de importaciones expone a un país al riesgo de interrupciones en el suministro eléctrico, así como a fluctuaciones en los precios de la energía. Estas variaciones estarán influenciadas por la oferta y la demanda, factores que dependerán de la capacidad de generación existente y serán gestionados por el operador nacional de electricidad. La diversificación y descentralización de la energía eléctrica aumentan la flexibilidad y la fiabilidad del sistema eléctrico, al tiempo que reducen la dependencia de fuentes externas.

En base a lo manifestado, la generación de electricidad es culminante en el desarrollo económico, la protección ambiental, el acceso a servicios básicos y la seguridad energética. La electricidad aumenta la productividad, mejora la calidad de vida, fomenta la innovación y estimula el crecimiento económico. Además, promover políticas y tecnologías que fomenten la producción de electricidad eficiente, diversa y respetuosa con el medio ambiente es crucial para garantizar un futuro sostenible y próspero. La generación de electricidad sostenible y universal son elementos clave para abordar desafíos globales como el cambio climático y la desigualdad [5].

1.4.1.1 Importancia de la transición a energías limpias o renovables

La transición de energías ha llamado la atención a gran parte de los países en la actualidad debido al cambio climático y sus efectos perjudiciales sobre el medio ambiente, la migración hacia fuentes de energía renovables se ha catalogado como una prioridad necesaria. Según datos proporcionados por la NASA, la temperatura media en 2020 aumentó 1,02°C en comparación con el período de 1950 a 1980. Este aumento se atribuye en gran medida a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, que provocan el derretimiento de los glaciares, el aumento del nivel del mar, la desertificación y un aumento de fenómenos climáticos extremos como huracanes, inundaciones e incendios.

Para afrontar este desafío, se ha fijado el objetivo de limitar el calentamiento global a menos de 2 grados Celsius, y preferiblemente a 1,5 grados Celsius, mediante la transición energética. Este proceso pasa por transformar los sistemas basados en combustibles fósiles en otros impulsados por fuentes de energía bajas en emisiones o libres de carbono, poniendo énfasis en la electrificación del consumo de energías renovables y la digitalización de las redes para optimizar la eficiencia energética, logrando así importantes reducciones de emisiones.

La transición energética no sólo protege el clima, sino que también impulsa las economías y beneficia a la sociedad en su conjunto. Las tecnologías renovables como la energía solar

y eólica son cada vez más baratas y rentables, creando empleos en industrias emergentes y ayudando a reducir la contaminación. Además, una transición energética inclusiva promueve el desarrollo sostenible de la sociedad y proporciona oportunidades de empleo en el sector. En este sentido, la adopción de energías renovables es un pilar fundamental para proteger el planeta, estimular la economía y asegurar un futuro sostenible para las generaciones futuras [6].

1.4.2 Generación Distribuida

La generación distribuida, es un proceso de producción de energía eléctrica o como un método de generación de electricidad a escala reducida y más cercana a los usuarios finales, a menudo se conceptualiza como el uso de fuentes de energía no tradicionales, como sistemas de paneles fotovoltaicos de baja potencia y pequeñas centrales hidroeléctricas operadas a través de pequeñas centrales eléctricas y microturbinas capaces de alimentar comunidades aisladas o conectarse a la red a nivel del alimentador de distribución. No obstante, es importante destacar que en las centrales eléctricas distribuidas también se pueden utilizar motores alternativos diésel o de gas natural, biogás, así como pilas de combustible o microturbinas de gas [7].

La generación distribuida tiene un papel vital al minimizar las pérdidas de la red y al mismo tiempo optimizar la confiabilidad y la calidad del sistema eléctrico. Su fuerte conexión con las energías renovables se debe a su idoneidad al encontrarse cerca del punto de consumo. Las características básicas de la generación distribuida se presentan de la siguiente manera:

- Reducir las pérdidas de la red:

La proximidad a los consumidores significa redes de transporte más cortas, lo que da como resultado menores pérdidas de energía durante la transmisión de electricidad desde las centrales eléctricas a los consumidores. Este enfoque también evita la necesidad de aumentar el voltaje de transporte, afectando así la eficiencia.

- Mejorar la confiabilidad y calidad del sistema eléctrico:

Pequeñas fuentes de generación de energía se distribuyen por todo el territorio para garantizar que una falla en una sola fuente de energía no cause problemas graves al sistema eléctrico. La dispersión de estas fuentes, incluida la micro generación, contribuye a la estabilidad y solidez del sistema.

- Potencias Reducidas:

La potencia de los micro grupos electrógenos es generalmente inferior a 3 kW, y la pauta general es que la potencia instalada no supere los 10 kW. Este enfoque en energía más modesta es característico de la generación distribuida, que enfatiza la descentralización y diversificación de las fuentes de energía.

➤ Enfoque en Energías Renovables:

La generación distribuida se caracteriza por su clara preferencia por las fuentes de energía renovables y se considera más adecuada si se ubica cerca del punto de consumo. Este enfoque apoya el desarrollo sostenible y se alinea con los objetivos ambientales, consolidando el lugar de la energía renovable en el corazón de la generación distribuida [8].

Según las estadísticas del año 2022 publicadas por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, el Ecuador en un 61,21% genera energía eléctrica mediante fuentes renovables, en un 39,79% lo hace de fuentes no renovables.

De la energía producida por fuentes sustentables, las fuentes no convencionales como la eólica y solar, de las que forma parte la generación distribuida, se reducen significativamente en relación con la energía producida por fuentes convencionales.

A continuación, se puede ver la potencia nominal en 2022, donde se podrá ver lo anterior, lo que contribuirá a la perspectiva global de la capacidad de producción del país. y producción de energía [9].



Figura 1.2. Generación eléctrica de centrales con fuente de energía renovable [9].



Figura 1.3. Generación eléctrica de centrales con fuente de energía no renovable [9].

1.4.3 Tipos de generación de energía eléctrica

1.4.3.1 Energías no renovables

El origen de estas fuentes de energía no renovables es el resultado de la descomposición gradual de la materia orgánica acumulada bajo tierra en condiciones de alta presión y temperatura durante millones de años. Este fenómeno ha producido los actualmente reconocidos gases natural, petróleo, carbón, esquisto asfáltico, arenas bituminosas, etc. Estos recursos se clasifican como finitos en función de su abundancia en el ambiente y sus extensos ciclos de renovación [1], [10].

1.4.3.2 Energías renovables

Se refieren a aquellas fuentes de energía que se generan de forma continua e inagotable, ofreciendo beneficios tanto para la sociedad como para la naturaleza al reducir el aumento de la huella de carbono en el ecosistema, gracias a su constante renovación. Entre estas fuentes se incluyen la energía solar, eólica, hidroeléctrica, mareomotriz y la derivada de la biomasa, entre otras. Estas modalidades de generación presentan un significativo potencial para abordar, tanto a corto como a largo plazo, el desafío del calentamiento global. Su naturaleza sostenible las posiciona como herramientas fundamentales en la mitigación de los impactos ambientales asociados con la generación de energía. A pesar de ello, su contribución actual al consumo energético es limitada [10] [11].

En los últimos años, se ha demostrado un impulso significativo hacia la investigación y desarrollo de métodos más eficientes para aprovechar la energía renovable, con el objetivo

de disminuir los costos asociados con las tecnologías de generación de energía. Al mismo tiempo, se están promoviendo políticas públicas orientadas a facilitar servicios energéticos sostenibles a la población. Entre las formas más destacadas de generar energía sustentable y renovable, se encuentran las siguientes alternativas:

1.4.3.3 Energía Solar Térmica

Este tipo de energía consiste en convertir la radiación solar en calor y poder utilizarla para obtener agua caliente para uso doméstico. Asimismo, es factible aplicar esta fuente de energía a través de un alternador para generar energía mecánica mediante un ciclo termodinámico.

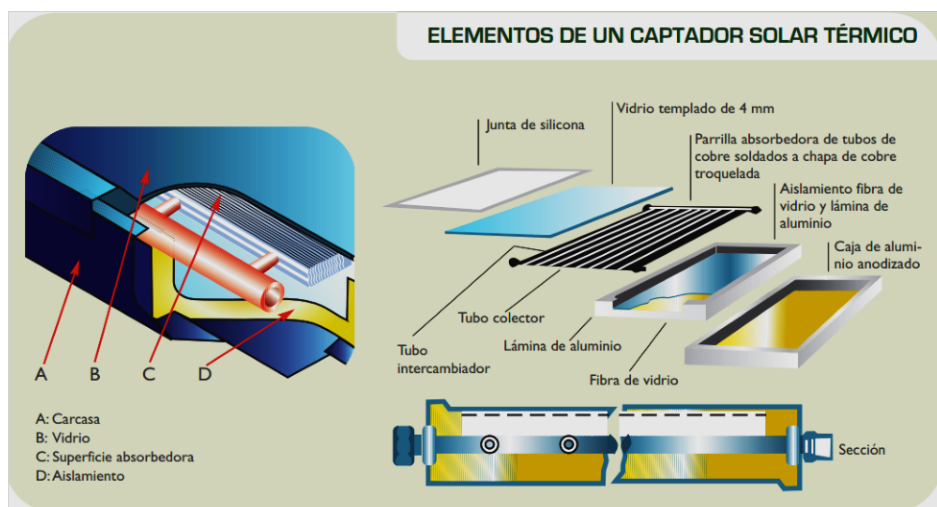


Figura 1.4. Elementos de un captador térmico [10].

La energía solar, con sus ricas características, tiene un potencial significativo para mitigar el cambio climático en el corto plazo (hasta 2025) y en el largo plazo (hasta 2050). El desarrollo eficiente de esta fuente de energía está intrínsecamente ligado a la reducción del costo de su generación, lo que puede promoverse a través del apoyo a políticas públicas y la innovación continua [10] [12].

1.4.3.4 Energía Solar Fotovoltaica

La tecnología se fundamenta en el uso de semiconductores para capturar la luz solar para inducir el flujo de electrones dentro de células fotovoltaicas, que se interconectan en configuraciones serie, paralelo o serie-paralelo con el objetivo de producir energía eléctrica. Estas configuraciones se pueden clasificar en dos categorías: sistemas autónomos (que funcionan de forma autónoma sin estar conectados a la red) y sistemas acoplados a la red. Este último puede estar compuesto por diversos componentes como paneles fotovoltaicos, baterías, reguladores de carga, inversores, etc [10].

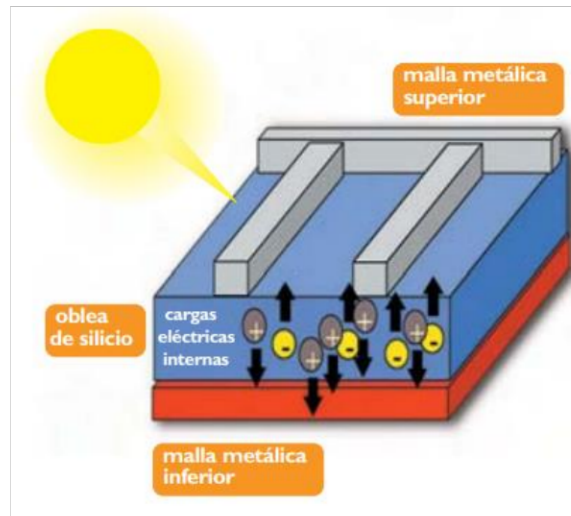


Figura 1.5. Célula solar fotovoltaica [13].

Las obleas de silicio, que están en el corazón del proceso, reciben un tratamiento especial para liberar cargas eléctricas y promover su movimiento hacia la superficie cuando las incide la luz del sol [13].

1.4.3.5 Energía Geotérmica

La energía geotérmica se puede conceptualizar como energía que se acumula bajo tierra en forma de calor. Se define como energía térmica almacenada en el interior de la Tierra y, dado que está presente en gran parte del subsuelo terrestre, constituye una fuente de energía con un potencial considerable. Una de las ventajas destacadas de esta forma de energía es su carácter renovable y limpio, así como su resistencia a las duras condiciones climáticas [14].

1.4.3.6 Hidroelectricidad

La energía hidroeléctrica, también llamada como energía hidráulica, representa una fuente de energía natural renovable diseñada para aprovechar la energía potencial y cinética presente en las fuentes hídricas. Las centrales hidroeléctricas se valen de la disparidad de nivel entre dos puntos y el flujo de agua para convertir la energía potencial a través de la implementación de una turbina hidráulica y generadores para producir energía eléctrica [10] [15].

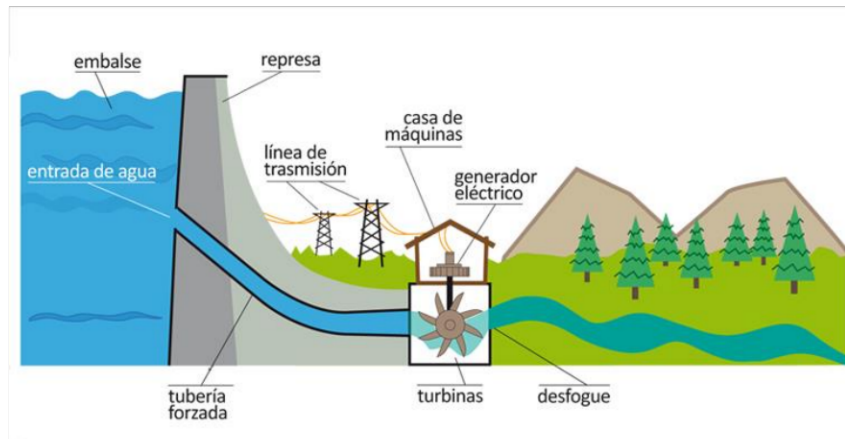


Figura 1.6. Ilustración de generación de energía hidroeléctrica [10].

1.4.3.7 Energía Mareomotriz

Los océanos albergan un inmenso potencial energético que puede ser aprovechado como una fuente de generación eléctrica. Con el fin de capitalizar esta fuente, se han desarrollado diversas alternativas tecnológicas, entre las cuales se destacan los avances que utilizan la energía de las corrientes, especialmente la energía cinética de las corrientes oceánicas, mediante la implementación de estructuras submarinas análogas a turbinas eólicas. Otra opción relevante es la energía mareomotriz, que se fundamenta en las variaciones de temperatura entre las aguas superficiales y profundas, requiriendo un gradiente térmico mínimo que tenga una variación de 20°C.

La energía undimotriz que es parte de la energía mareomotriz, o energía derivada del movimiento de las olas, y representa otra alternativa, utilizando la fuerza generada por el desplazamiento del agua debido a la fricción con las corrientes de aire (olas). El poder osmótico o energía azul, es otra fuente de energía renovable que se deriva de la mareomotriz se obtiene a partir del proceso de ósmosis, aprovechando la diferencia de concentración de sal entre el agua de mar y el agua dulce, este fenómeno provoca una diferencia de presión que es posible aprovechar por medio de una turbina. Finalmente, la energía de las mareas se centra en aprovechar los cambios en los niveles del agua del océano producidos por la atracción gravitacional del Sol y la Luna [16].

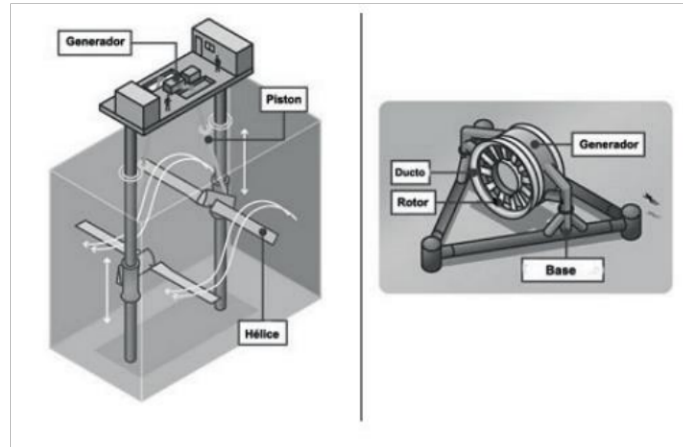


Figura 1.7. Mecanismo utilizado en la energía mareomotriz [16].

1.4.4 Biomasa

La biomasa se define como la porción biodegradable de productos, desechos y restos de origen orgánico generados por actividades que utilicen materias con alto índice de carbono, que incluyen sustancias de origen vegetal y animal. Además, abarca la parte biológica biodegradable de desechos comunales e industriales, así como aquellos provenientes de la silvicultura y actividades conexas, incluyendo la pesca y la acuicultura [17].

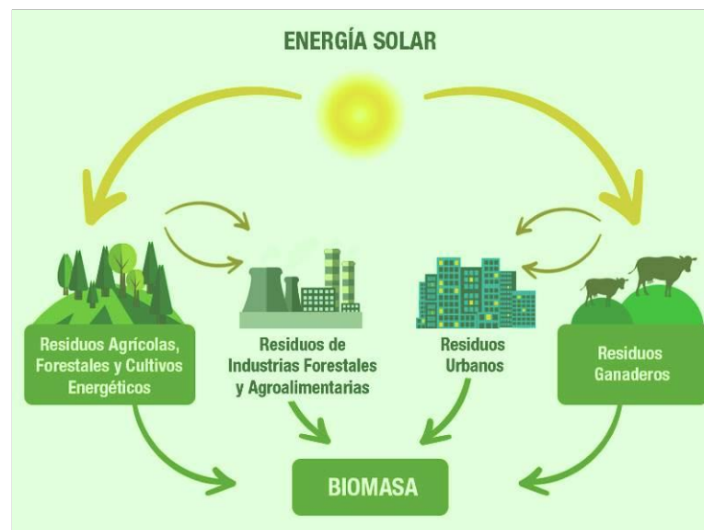


Figura 1.8. Clasificación de la biomasa [18].

Existen distintos tipos de biomasa, que se clasifican según su origen, composición y estado. A continuación, describiré los principales tipos de biomasa:

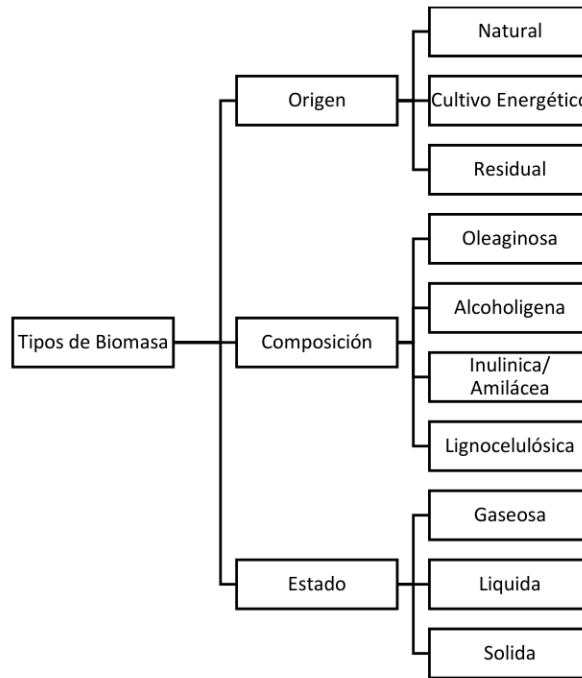


Figura 1.9. Clasificación de la biomasa [17].

1.4.4.1 Por origen

Cultivos energéticos: Son siembras particularmente reservadas a la fabricación de biomasa. Algunos ejemplos son la caña de azúcar, remolacha azucarera, maíz y los distintos tipos de cereales. Estos cultivos se utilizan principalmente para la generación de biocombustibles como el biodiesel y el bioetanol [17].

Biomasa residual: Esta biomasa proviene de residuos agrícolas, forestales, alimentarios o industriales. Incluye restos de cultivos, poda de árboles, residuos de la manufactura alimentaria y de la madera, entre otros. La biomasa residual se utiliza en la generación de energía eléctrica y térmica, así como en la obtención de biogás y biocombustibles. Entre estos también se incluyen los residuos sólidos urbanos (RSU) y los lodos de depuradora. Los RSU consisten en los desechos generados por la actividad doméstica, comercial e industrial de áreas urbanas. Estos residuos pueden ser tratados mediante procesos de fermentación anaerobia para producir biogás [17].

Natural o biomasa forestal: incluye restos de madera, ramas, hojas y otros desechos derivados de la industria. Estos residuos se manipulan para la producción de calor y electricidad en sistemas de calefacción y plantas de energía [19].

1.4.4.2 Por Composición

La biomasa oleaginosa se define como la biomasa generada a partir de cultivos oleaginosos, tales como la colza, girasol y soja. Estos cultivos se cultivan con el propósito de obtener aceites vegetales que, a su vez, se utilizan en la producción de biocombustibles, como el biodiésel [17].

En cuanto a la biomasa alcohólica, hace referencia a la biomasa derivada de cultivos que contienen azúcares fermentables, como la caña de azúcar y la remolacha azucarera. Dichos azúcares fermentables pueden transformarse en etanol, un biocombustible ampliamente utilizado [17].

La biomasa inulinica / amilácea, por su parte, proviene de cultivos ricos en inulina o almidón, como la yuca, la patata y el maíz, pueden convertirse en azúcares fermentables, los cuales son empleados en la producción de biocombustibles, como el etanol [17].

La biomasa lignocelulósica se refiere a la materia seca de origen vegetal, la cual constituye la materia prima más cuantiosa en el planeta para la creación de biocombustibles, principalmente bioetanol. Está compuesta por polímeros de carbohidratos, como la celulosa y la hemicelulosa, junto con un polímero aromático denominado lignina [17].

1.4.4.3 Por Estado

La biomasa sólida se refiere a la materia orgánica en estado sólido, como la madera, el aserrín, los residuos sólidos urbanos, los cultivos energéticos y la leña. La biomasa sólida se utiliza comúnmente para producir calor y electricidad en sistemas de calefacción y generación de energía [17].

La biomasa líquida se refiere a la materia orgánica en estado líquido, como los purines y las aguas residuales, se utiliza comúnmente para producir biocombustibles, como el biodiésel y el bioetanol [17].

La biomasa gaseosa describe a la materia orgánica en estado gaseoso, como el metano o el biogás, que se obtiene de la fermentación, descomposición o metanogénesis de residuos de animales, residuos agroalimentarios, vertederos y escombreras, entre otros. El biogás se refina para separar los contaminantes y aumentar su contenido de metano, lo que produce biometano. El biometano se puede emplear para generar energía eléctrica y calor, lo que lo convierte en un combustible de energía versátil [17].

Es crucial resaltar que la biomasa puede ser aprovechada de diversas maneras, dependiendo de su composición y características. Puede ser directamente incinerada para

generar calor, empleada en sistemas de cogeneración para la producción simultánea de electricidad y calor, sometida a procesos de fermentación anaerobia para la producción de biogás, o convertida en biocombustibles líquidos como el bioetanol y el biodiesel [19].

Además de su potencial como fuente de energía renovable y sostenible, la biomasa también conlleva beneficios ambientales, como la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los hidrocarburos y la contribución a la gestión de los residuos orgánicos [10].

1.4.5 Procesos de transformación de energía

Diversos tipos de microorganismos desempeñan un papel crucial en el proceso de descomposición de las moléculas de biomasa húmeda en compuestos más simples con un alto contenido energético, a través de dos técnicas principales:

Termoquímico: Este método muestra una eficacia significativa en biomasa seca (con una humedad inferior a 50%). Su rendimiento está determinado por el poder calorífico, la presencia de carbono fijo, los sólidos volátiles, el contenido de cenizas y la presencia de metales alcalinos. Este método implica exponer la biomasa a altas temperaturas y diferentes condiciones de oxidación, lo que provoca reacciones químicas irreversibles [2].

Biológico: Este procedimiento es más eficaz en biomasa con alta humedad (superior al 50%) y se basa en el contenido de humedad y los niveles de celulosa. Consiste en utilizar microorganismos para degradar moléculas complejas en compuestos más simples con una mayor densidad energética [2].

1.4.5.1 Método Termoquímico

1.4.5.1.1 Combustión

Este método requiere que la materia orgánica se someta a elevadas temperaturas en presencia de oxígeno, lo que resulta en la generación de calor, vapor de agua, cenizas y anhídrido carbónico. Factores como la proporción de oxígeno en el gas de entrada (de un 20% a un 40% por encima de lo recomendado), la temperatura de combustión (entre 600 y 1.300 °C) y las características específicas de la biomasa (niveles de humedad, bajo contenido de azufre, cloro, flúor y carbono) son variables que afectan directamente su funcionamiento [2].

Los hornos, los aparatos de recuperación de calor (como calderas) y los sistemas de rescate de energía (como turbogeneradores y redes de conducción de vapor) son algunos de los sistemas en los que se consume la biomasa. La energía producida puede ser

utilizada tanto para producir calor para uso doméstico o industrial como para producir energía eléctrica [2].

1.4.5.1.2 Gasificación

La gasificación es la combustión de anhídrido carbónico, hidrógeno, metano y monóxido de carbono en circunstancias de escasez de oxígeno. Para evitar la formación de cenizas, este proceso se lleva a cabo en temperaturas que van desde un mínimo de 700 °C hasta una temperatura máxima de 1.500 °C. La relación de nitrógeno del agente oxidante determina dos tipos de gases: gas pobre, producido por gasificación con aire, y gas de síntesis, producido por gasificación con oxígeno [2].

Los productos gaseosos generados dependen de factores como el tipo de biomasa, el agente oxidante empleado, la presión, la temperatura y el tipo de reactor. Según la interacción entre la biomasa (fase fija) y el agente oxidante (fase móvil), los reactores se dividen en:

Gasificador de lecho fijo/móvil: En este diseño, la biomasa se desplaza lentamente mientras interactúa con el agente oxidante, lo que conduce a una descomposición gradual. Los reactores pueden tener configuraciones de flujo ascendente, descendente o cruzado según la orientación del flujo de biomasa. Aunque logran procesar partículas de tamaños entre 1 y 100 mm, tienen problemas como una eficiencia baja en la transferencia de calor y una distribución heterogénea de temperaturas, lo que puede causar la formación de conglomerados de combustible [2].

Gasificador de lecho fluidizado: Estos dispositivos proporcionan una composición efectiva de fases fijas y móviles con una distribución uniforme de temperaturas. El lecho puede estar hecho de material inerte, como arena de sílice, o puede tener características minerales. A su vez, se dividen en dos grupos:

Burbujeante: En este caso, la biomasa entra en contacto con el lecho calentado y se seca rápidamente y se descompone. Es relevante señalar que el agente oxidante se introduce en dos pasos, desde la parte inferior y superior del reactor, lo que aumenta la transformación de la biomasa parcialmente gasificada [2].

De lecho circulante: Estos gasificadores incorporan un lecho, un sistema para recircular los sólidos generados y un ciclón para prevenir la formación de conglomerados de partículas. Este diseño mejora las condiciones de interacción entre la fase fija y móvil, logrando una distribución uniforme de la temperatura y una velocidad superior de transformación en comparación con la gasificación de flujo burbujeante [2].

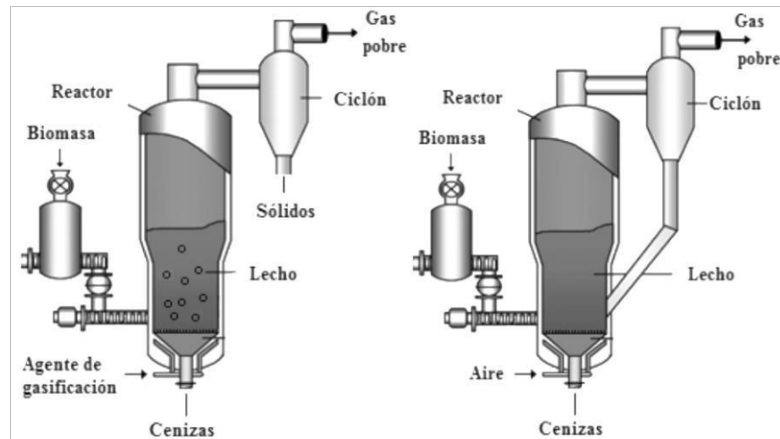


Figura 1.10. Modelo de lecho fluidizado, burbujeante, circulante [2].

La gasificación se presenta como una tecnología muy prometedora para la transformación térmica de la biomasa, ya que presenta beneficios notables en términos de rendimiento de transformación energética en comparación con métodos convencionales como la pirolisis y combustión. Al mismo tiempo, la gasificación permite la recuperación de entre un porcentaje del 60 y el 90 de la energía utilizada, produciendo un gas de baja calidad que se puede utilizar con éxito en la generación de energía eléctrica mediante motores de combustión interna [2].

1.4.5.1.3 Pirolisis

La pirolisis, que implica la degradación de la biomasa en altas temperaturas (comenzando a unos 275°C y terminando a 450°C) sin oxígeno, produce una variedad de productos. Estos productos incluyen gases que están hechos de hidrógeno y óxidos de carbono, líquidos que contienen compuestos hidrocarbonados complejos, y desechos sólidos carbonosos como cenizas, carbones y alquitranes. Los volátiles y gases producidos durante este proceso también pueden reaccionar con el carbón, generando sustancias volátiles adicionales, varios tipos de gases y carbón con diferentes composiciones. El propósito primordial de la pirolisis es maximizar la obtención de combustibles de alto valor a partir de la biomasa utilizando medios catalíticos y térmicos. Este proceso se modifica para aumentar la producción de carbón, biocombustibles (combustibles pirolíticos), gas o metanol con una eficiencia del 95,5% en comparación con la alimentación original [2].

1.4.5.2 Método Biológico

1.4.5.2.1 Fermentación Alcohólica

Este es un procedimiento para convertir la biomasa en etanol, cuya viabilidad está condicionada por el tipo de biomasa y requiere un análisis previo antes de su

implementación. Es esencial someter la biomasa a procesos destinados a convertirla en compuestos fermentables si tiene altos niveles de almidón o celulosa. Este proceso se divide en las siguientes fases:

- El procesamiento de biomasa: se refiere a la reducción de la biomasa a fragmentos pequeños mediante procesos como compresión, pulverización o trituración.
- Hidrólisis: transformación de la glucosa en azúcares simples por medio del uso de enzimas y reactivos químicos.
- Fermentación alcohólica: ocurre cuando los microorganismos transforman la glucosa de la biomasa en etanol.
- Purificación y separación del etanol: implica llevar a cabo una destilación azeotrópica utilizando sustancias como benceno, éter o hexano. Este proceso permite conseguir etanol con una pureza aproximada del 99,5% [2].

1.4.5.2.2 Digestión Anaeróbica

Se refiere a un proceso de fermentación que se realiza en condiciones de anaerobiosis (sin presencia de O_2) para producir biogás, compuesto principalmente por metano (CH_4) y anhídrido carbónico (CO_2), junto con lodos con altos niveles de nitrógeno, fósforo y otros minerales. Este método se utiliza principalmente en el uso de biomasa proveniente de desechos ganaderos y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales debido a su acidez, contenido de sólidos y riqueza en nutrientes.

El biogás formado durante este proceso de digestión es utilizado como combustible en motores de combustión interna conectados a generadores de electricidad, para la combustión en calderas de vapor convencionales y para sistemas de calefacción en general [2].

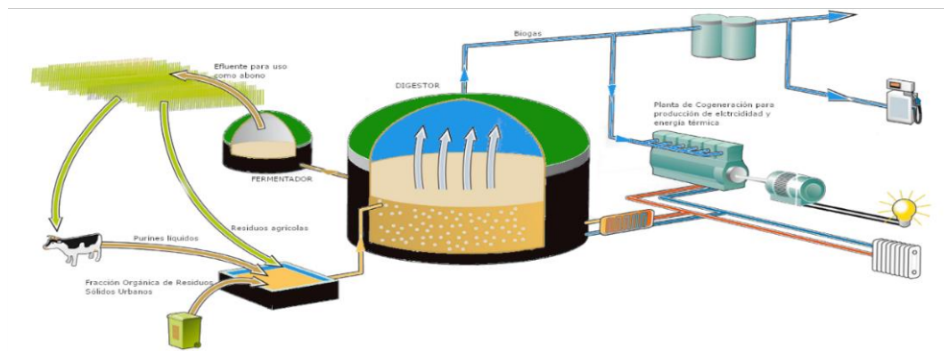


Figura 1.11. Ilustración de generación a partir de biogás obtenido por digestión anaeróbica [20].

2 METODOLOGÍA

El propósito de este estudio se enfoca en la indagación referente a la producción de biogás a partir de residuos de verduras. Para ello, se utilizará la metodología Desk Research, la cual consiste en recopilar información de fuentes secundarias para analizar y sintetizar los datos obtenidos en base a información ya verificada y publicada.

El trabajo se dividirá en tres etapas: Recopilación de información acerca del proceso de obtención de biometano, modelación matemática de la estimación de biogás, resultados y estudio sobre la viabilidad económica de este tipo de sistemas y, además, se incluye una comparación con retroalimentación sobre la implementación de este tipo de sistemas implementados en el exterior.

En la primera fase, se define el proceso de obtención de biogás a partir de desechos de verduras, analizando las principales características de residuos vegetales para su posible uso como sustrato para la digestión anaeróbica, también se explica los procesos que ocurren en el reactor o biodigestor, en base a la información recopilada.

En la segunda etapa, se describe el modelo matemático para posteriormente realizar una simulación en MATLAB que estima la cantidad de biometano que se puede conseguir mediante la utilización de desperdicios de vegetales como sustrato o nutriente limitante, en este apartado también se estudia el poder energético de este gas y se detalla las principales características.

Finalmente, en la tercera etapa, se definen los parámetros económicos del proyecto. Se analizarán los costos asociados con la producción de biogás a partir de los residuos de verduras y se determinará la viabilidad económica del proyecto. Se identificarán las fuentes de financiamiento disponibles.

2.1 Producción de biometano a partir de desechos vegetales

2.1.1 Propiedades de la materia orgánica

El término "materia orgánica" se refiere a la fracción de materia que contiene carbono y se compone de desechos de plantas, animales y otros organismos. Ya sea mediante procesos naturales como la descomposición o mediante tecnologías específicas como la biodigestión, esta materia orgánica puede descomponerse y utilizarse como sustrato para la producción de biomasa [21].

Algunas de las propiedades de la materia orgánica que son importantes para la producción de biomasa incluyen:

- Contenido de carbono: la materia orgánica es rica en carbono, lo que la convierte en una fuente valiosa para la producción de biomasa. El contenido de carbono puede variar según el tipo de materia orgánica y su grado de descomposición.
- Relación carbono: nitrógeno (C:N): es un indicador significativo de la calidad de la materia orgánica utilizada como sustrato para la producción de biomasa. Una proporción adecuada de carbono y nitrógeno proporciona un equilibrio entre estos elementos, promoviendo así el crecimiento microbiano y la producción de biomasa [22].
- Composición química: la materia orgánica puede tener una variedad de composiciones químicas, que incluyen carbohidratos, proteínas, lípidos, ácidos húmicos, lignina y otros compuestos. La composición química afecta la biodegradabilidad y disponibilidad de nutrientes para los microorganismos involucrados en la producción de biomasa [22].
- Grado de descomposición: Es una propiedad que afecta su capacidad para ser utilizada como sustrato para producir biomasa, los residuos de verduras al contar con un gran contenido de humedad presentan una elevada biodegradabilidad o descomposición [21].
- Contenido de nutrientes: La materia orgánica puede ser una fuente de nutrientes fundamentales para el desarrollo de las plantas y microorganismos. El contenido de nutrientes, como nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes, puede variar entre diferentes tipos de materia orgánica y afectar su capacidad para promover la producción de biomasa [21].

2.1.1.1 Composición Celular

Otro factor más complejo se tiene que considerar a partir de la célula vegetal, que es la unidad estructural de todo organismo, está compuesta por una pared celular que es una capa resistente pero generalmente flexible, en algunas ocasiones puede ser rígida, tiene el objetivo de suministrar soporte estructural a las plantas. También, lo protege contra las tensiones térmicas y mecánicas. Se compone principalmente de hemicelulosa, celulosa, lignina y componentes extraíbles [23].

Hemicelulosa: Es un compuesto polimérico complejo formado por diversos grupos de polisacáridos heterogéneos [23].

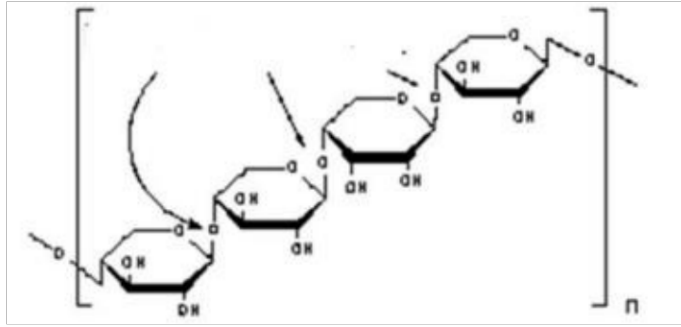


Figura 2.1. Composición de la Hemicelulosa [23].

Celulosa: Es un biopolímero constituido por una cadena extensa de carbohidratos, compuesta únicamente por moléculas de glucosa (β -glucosa) unidas mediante enlaces de hidrógeno [23].

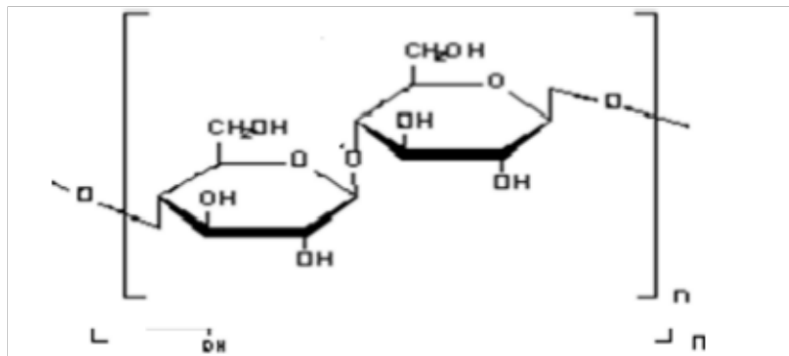


Figura 2.2. Composición de la Celulosa [23].

Lignina: Es un polímero característico de las plantas vasculares, con una estructura tridimensional, amorfa y complicada [23].

Estas estructuras son cruciales para la producción de biogás porque estos componentes representan una de las principales fuentes de carbono utilizadas por los microorganismos para producir metano. Al observar la estructura de estos compuestos, se puede notar claramente que la lignina tiene una composición compleja en comparación con la celulosa y la hemicelulosa, que son mucho más simples y fáciles de descomponer, favoreciendo así la producción de biogás [23].

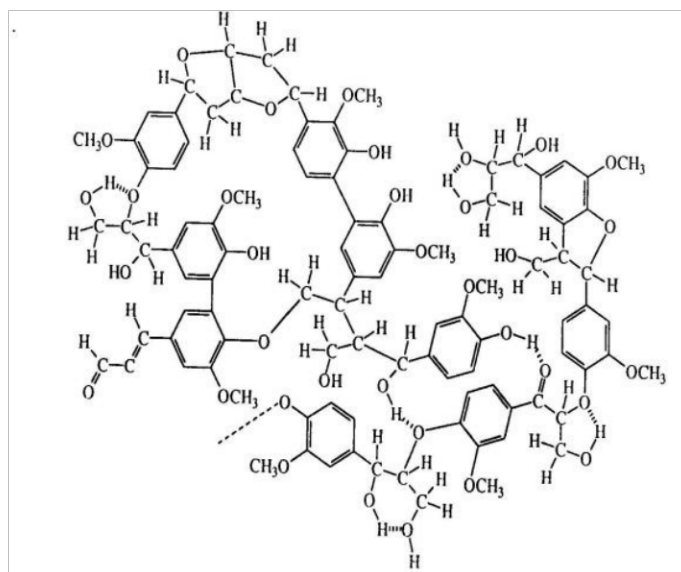


Figura 2.3. Estructura de la molécula de Lignina [23].

La biomasa originaria de desechos vegetales se compone primariamente de hemicelulosa, celulosa y lignina con menores cantidades de extractos. Las concentraciones relativas de hemicelulosa, celulosa y lignina varían de una especie a otra y generalmente se distribuyen entre 15-30%, 40-60% y 10-30% respectivamente [23].

2.1.1.2 Sólidos Volátiles y Sólidos Totales

La concentración de sólidos volátiles (SV) es una medida de la cantidad de materia orgánica presente en un sustrato con potencial de conversión en biogás. Se determina midiendo la cantidad de materia orgánica que se pierde cuando se somete una muestra a altas temperaturas (550°C). Los sólidos volátiles comprenden los componentes orgánicos que se evaporan a elevadas temperaturas, mientras que los sólidos fijos son los componentes inorgánicos que permanecen en la muestra después de la evaporación [24].

Los sólidos totales (ST) son la adición de los sólidos suspendidos y los sólidos disueltos en una muestra de agua o en este caso, en los desechos vegetales [25].

Según [21] los residuos de vegetales se caracterizan por su elevado contenido de humedad (>80%) y su contenido en sólidos volátiles es equivalente o superior al 95% de los sólidos totales por lo que presentan una gran biodegradabilidad. La cantidad de sólidos totales se obtiene a partir de la masa total de los residuos siendo una aproximación entre un rango del 8 al 18% de los mismos [21].

Estas propiedades son solo algunas de las características relevantes para los organismos implicados en la producción de biomasa. Es esencial recordar que estas propiedades

pueden variar en función del tipo de materia orgánica, su origen y los diversos procesos de conversión de biomasa que pueden demandar propiedades específicas de la materia orgánica.

Tabla 2.1. Características de residuos vegetales [26].

Indicador	Unidad	Residuos de zanahoria con cáscara	Residuos de coliflor y brócoli	Residuos de maíz	Arveja	Habichuelas	Residuos ensilados*
Sólidos totales (ST)	g/kg	85.30 ± 1.54	58.19 ± 2.60	163.70 ± 3.22	203.75 ± 3.08	98.07 ± 1.91	170.87 ± 1.27
Sólidos volátiles (SV)	g/kg	82.53 ± 1.47	52.80 ± 3.08	155.16 ± 3.93	179.59 ± 1.80	77.35 ± 2.28	160.74 ± 2.13
COD	gO ₂ /kg	89.98 ± 3.51	68.23 ± 3.16	269.3 ± 12.7	280.4 ± 18.6	105.4 ± 16.3	235.0 ± 13.6
Nitrógeno	gN/kg	2.01 ± 0.11	5.04 ± 0.32	4.05 ± 0.06	8.77 ± 0.90	3.63 ± 0.10	4.65 ± 0.21
Fosforo	gP/kg	0.66 ± 0.16	1.07 ± 0.11	1.14 ± 0.13	2.64 ± 0.03	0.75 ± 0.04	1.30 ± 0.18
Potasio	gK/kg	1.42 ± 0.04	3.50 ± 0.28	2.83 ± 0.08	3.50 ± 0.08	2.91 ± 0.05	2.90 ± 0.07
Cobre	mgCu/kg	1.70 ± 0.04	2.11 ± 0.28	0.79 ± 0.08	2.92 ± 0.08	2.33 ± 0.05	1.33 ± 0.07
Hierro	mgFe/kg	42.20 ± 4.16	16.6 ± 1.16	28.10 ± 1.30	23.32 ± 2.29	42.42 ± 3.36	29.49 ± 3.32
Zinc	mgZn/kg	5.86 ± 0.88	11.54 ± 0.13	2.38 ± 0.12	43.41 ± 6.08	10.99 ± 1.23	8.85 ± 0.45
Aluminio	mgAl/kg	7.20 ± 0.06	7.72 ± 0.30	5.65 ± 0.16	7.04 ± 0.07	20.18 ± 0.99	8.06 ± 0.29
Cobalto	mgCo/kg	0.09 ± 0.01	0.03 ± 0.0	0.09 ± 0.01	0.15 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.11 ± 0.01
Molibdeno	mgMo/kg	0.04 ± 0.01	0.02 ± 0.0	0.14 ± 0.02	0.44 ± 0.03	0.25 ± 0.03	0.20 ± 0.01
Selenio	µgSe/kg	4.0 ± 0.15	18.0 ± 0.60	8.0 ± 0.3	283.0 ± 12.0	155.0 ± 10.5	69.0 ± 2.5

± Desviación estándar

*Residuos ensilados (RE): residuos de maíz 70%, guisantes 15%, Habichuelas verdes 15%

2.1.2 Descomposición de la materia a biomasa

La descomposición de materia orgánica es llevada a cabo por una amplia variedad de microorganismos, como bacterias y hongos, que se nutren de los compuestos orgánicos

presentes en los residuos. Estos microorganismos descomponedores secretan enzimas que degradan los compuestos orgánicos complejos en formas más simples y útiles [27].

Durante el proceso, los compuestos orgánicos se descomponen en diferentes fases. En las etapas iniciales, los carbohidratos, lípidos y proteínas son descompuestos en compuestos más simples, como azúcares, ácidos grasos y aminoácidos. Estos compuestos son utilizados por los microorganismos para su crecimiento y reproducción, lo que conduce a un aumento en la biomasa microbiana [27].

A medida que la descomposición continúa, los microorganismos también degradan compuestos más resistentes y complejos, como la lignina, que se encuentra en la pared celular de las plantas. La degradación de la lignina es un proceso más lento y requiere microorganismos especializados, como los hongos ligninolíticos [27].

La descomposición de la materia orgánica puede estar influenciada por diversos factores, como la temperatura, la humedad, la disponibilidad de oxígeno y la composición química de los residuos. Por ejemplo, la descomposición tiende a ser más veloz en condiciones cálidas y húmedas, donde los microorganismos son más activos [27].

La biomasa producida durante este proceso es una fuente de nutrientes y energía para otros organismos. Puede ser utilizada por plantas para su crecimiento y desarrollo, y también puede ser consumida por animales que se alimentan de materia orgánica en descomposición [27].

En el contexto de la producción de biomasa, la descomposición controlada de residuos orgánicos puede ser utilizada en tecnologías como el compostaje y la biodigestión anaeróbica. Estos procesos permiten la descomposición controlada de los residuos para producir biomasa y subproductos como fertilizantes orgánicos o biogás.

2.1.3 Recolección, almacenamiento y pretratamiento de la biomasa

La recolección de biomasa implica la recopilación y obtención de materiales orgánicos, como residuos agrícolas, forestales, industriales o municipales, que serán utilizados como fuente de biomasa. Existen diferentes métodos y técnicas de recolección, que varían según el tipo de biomasa y las condiciones locales. Algunos métodos comunes incluyen la cosecha manual, la utilización de maquinaria agrícola especializada, la tala selectiva o la recolección de residuos en plantas de tratamiento.

Es importante tener en cuenta que la recolección de biomasa debe ser realizada de manera sostenible y considerando la capacidad de regeneración de los recursos naturales. Se

deben aplicar prácticas de gestión adecuadas para garantizar la conservación de los ecosistemas y minimizar el impacto ambiental [28], [29].

Una vez recolectada, la biomasa se almacena para su posterior procesamiento y utilización. El almacenamiento de biomasa es crucial para mantener su calidad y evitar la degradación o pérdida de energía y nutrientes. Algunos aspectos clave a considerar en el almacenamiento de biomasa son:

- Protección contra la humedad: La humedad puede promover el incremento de bacterias y la degradación de la biomasa. Es importante almacenar la biomasa en lugares secos y utilizar técnicas de cubierta o impermeabilización para protegerla de la lluvia y la humedad [28].
- Compactación: La biomasa se puede compactar para disminuir su volumen y facilitar su almacenamiento y transporte. Sin embargo, es importante tener en cuenta que una compactación excesiva puede reducir la porosidad y dificultar el flujo de aire y la descomposición [29].
- Monitoreo de la calidad: Es fundamental monitorear regularmente la calidad de la biomasa almacenada para detectar signos de degradación, como la aparición de hongos o malos olores. Se deben implementar controles de calidad y llevar registros de seguimiento para asegurar la idoneidad de la biomasa almacenada [28], [29].

Además, es importante considerar la logística y planificación adecuada para el transporte y distribución de la biomasa almacenada, especialmente si se trata de grandes volúmenes o se requiere un suministro continuo.

El objetivo del pretratamiento es favorecer el acceso microbiano a sustratos que puedan degradar, reducir el tamaño del material, aumentar su solubilidad, degradabilidad y eliminar posibles compuestos inhibidores. Los pretratamientos más comunes son [28].

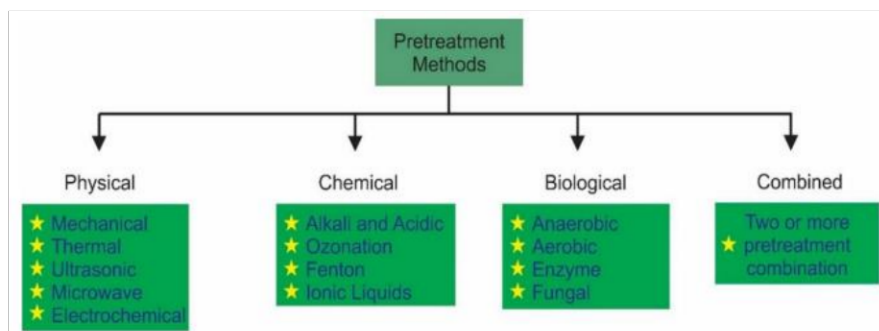


Figura 2.4. Pretratamientos de la Biomasa [28].

Para los residuos vegetales los pretratamientos más efectivos son:

Los pretratamientos físicos se fundamentan en la descomposición del material a través de procesos mecánicos hasta obtener partículas de tamaño óptimo que promuevan la interacción entre el sustrato y el microorganismo. La tecnología empleada en estos pretratamientos incluye la utilización de dispositivos mecánicos, como molinos, trituradores o la aplicación de altas temperaturas que propicien la hidrólisis del material [28].

Pretratamientos químicos se sustentan en la reacción de compuestos químicos sobre el sustrato con el objetivo de deshacer estructuras complejas y de difícil biodegradabilidad [28].

2.1.4 Tecnologías del biodigestor

2.1.4.1 Funcionamiento

Un biodigestor es un dispositivo que facilita la descomposición anaeróbica de materia orgánica como desechos vegetales, estiércol de animales, restos de alimentos no consumidos y otros desechos orgánicos. La función principal del biodigestor en este estudio es servir como un recipiente hermético donde se almacenan y se descomponen los residuos vegetales mediante el proceso de digestión anaeróbica. Posteriormente, este proceso genera biogás y abonos naturales [30].

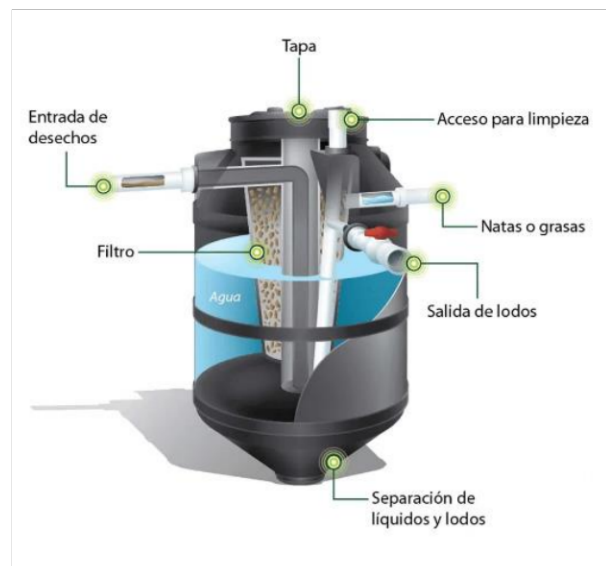


Figura 2.5. Esquema y partes del biodigestor [31].

El proceso de operación de un biodigestor se fundamenta en la fermentación anaeróbica de la materia orgánica. Las bacterias y microorganismos dentro del biodigestor

descomponen los residuos orgánicos, generando metano y anhídrido carbónico como parte del proceso [31].

El proceso de funcionamiento de un biodigestor se puede resumir en los siguientes pasos:

Alimentación del biodigestor: Inicialmente, se introduce materia orgánica biodegradable, para este caso desechos de verduras. Es esencial que esta materia se triture y descomponga previamente para facilitar la degradación de compuestos orgánicos y mejorar la eficacia del proceso [30].

Digestión anaeróbica: este proceso se produce en ausencia de oxígeno o mejor conocido como estado anaeróbico, esto es logrado mediante el sello hermético del biodigestor que evita la entrada de aire. Estas condiciones benefician el desarrollo de bacterias y microorganismos que degradan los residuos orgánicos. Durante la digestión anaeróbica, los microorganismos descomponen la materia orgánica en etapas, liberando biogases [30].

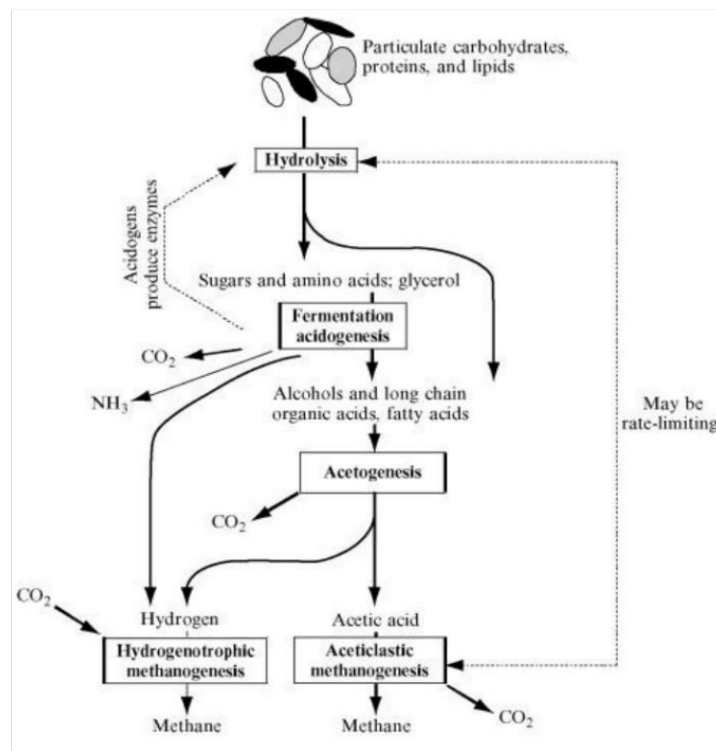


Figura 2.6. Proceso de la digestión anaeróbica [28].

Hidrólisis: Es el proceso de descomposición y solubilización de macromoléculas en sus componentes monoméricos. Como resultado, los carbohidratos, las proteínas y los lípidos se convierten en monosacáridos, ácidos nucleicos, ácidos grasos y glicerol. Para romper las largas cadenas de biomoléculas, los microorganismos anaerobios y facultativos utilizan ciertas enzimas que se excretan al medio extracelular [28].

La acidogénesis: Se trata de la segunda fase de la digestión anaeróbica, en la que los monosacáridos y aminoácidos generados durante la hidrólisis se convierten en ácidos orgánicos con bajo número de átomos de carbono, alcoholes, hidrógeno, anhídrido carbónico y amoníaco. Los microorganismos responsables de esta etapa son anaerobios y facultativos. La acidogénesis depende de la concentración de hidrógeno en el medio, ya que si es muy alta puede inhibir la formación de algunos productos como el acetato o el butirato [28].

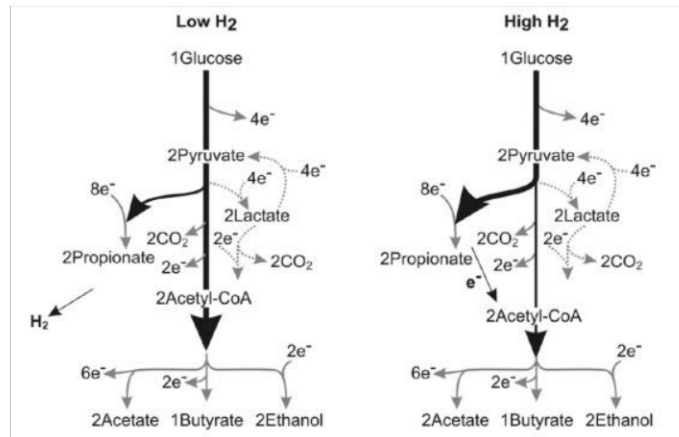


Figura 2.7. Acidogénesis a partir de glucosa con bajo y alto contenido de hidrogeno [28].

Tabla 2.2. Se muestran las posibles reacciones en la Acidogénesis [28].

Productos	Reacción
Acetato	$C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$
Butirato	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3(CH_2)2COOH + 2CO_2 + 2H_2O$
Lactato	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CHOHCOOH$
Etanol	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$

La tercera etapa crucial de la digestión anaerobia es la acetogénesis. Durante esta etapa, se transforman ácidos orgánicos como el propiónico y el butírico, así como el etanol que se había producido anteriormente en la acidogénesis, en acetato. Los microorganismos acetógenos generan electrones durante el proceso de oxidación que solo utilizan para producir hidrógeno. Es importante señalar que los acetógenos son anaerobios estrictos porque el aceptor final de estos electrones es siempre un protón, nunca un compuesto orgánico como un ácido o un alcohol.

A pesar de que las reacciones químicas involucradas en la acetogénesis tienen lugar para mantener la presión parcial de hidrógeno lo más baja posible, presentan una energía libre de Gibbs positiva, lo que indica que no son termodinámicamente beneficiosas. En este punto, el desarrollo normal del proceso depende de la interacción simbiótica entre metanógenos y acetógenos. Los metanógenos necesitan mucho hidrógeno, por lo que aprovechan el hidrógeno producido por los acetógenos para producir metano [28].

La metanogénesis es la etapa final de la digestión anaerobia, que consiste en la alineación de biometano por parte de arqueas que son rigurosamente anaerobias. Estas arqueas logran producir metano a partir de tres tipos de rutas diferentes: acetoclástica, hidrogenotrófica y metilotrófica. La metanogénesis acetoclástica es la más común y consiste en la descomposición de acetato en metano y anhídrido carbónico. La metanogénesis hidrogenotrófica implica la reducción de anhídrido carbónico con hidrógeno para formar metano y agua. La metanogénesis metilotrófica produce metano a través de compuestos orgánicos metilados de un átomo de carbono, como el metanol, las metilaminas o el sulfuro de dimetilo. La etapa limitante del proceso de producción de biogás es la metanogénesis, que depende de las condiciones ambientales y de la presencia de microorganismos adecuados [28].

Tabla 2.3. Reacciones en la metanogénesis [28].

	Reacción
Metanogénesis acetoclástica	$CH_3COO^- + H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$
Metanogénesis hidrogenotrófica	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$
Metanogénesis metilotrófica	$4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + 2H_2O + CO_2$

Estos gases se acumulan en el biodigestor, lo que da como resultado la formación de biogás. Al ser más liviano que el aire, el biogás tiende a acumularse más arriba en el biodigestor. El biogás producido se puede almacenar en un depósito o sistema adecuado. El biodigestor no solo produce biogás, sino que también produce digestato, un subproducto líquido rico en nutrientes que puede utilizarse como abono natural para la agricultura [28].

2.1.4.2 Tipos de biodigestores

De acuerdo con su complejidad y uso, los biodigestores varían ampliamente. Los más sencillos se clasifican como digestores de cargas por lotes o discontinuos, mientras que

los más complejos incluyen dispositivos para alimentarlos, calentarlos y agitarlos. Resulta conveniente clasificarlos en los siguientes tipos según su forma de operación en relación con su carga o alimentación:

- Continuos: Cuando se mantiene un suministro continuo de alimentación al digestor, el volumen de efluente que se libera es equivalente al material de carga o afluente que entra al biodigestor, lo que resulta en una generación constante de biogás a lo largo del tiempo. Se utilizan principalmente para tratar aguas servidas. Pertenecen a plantas de gran tamaño, de estilo industrial, en las que se utilizan equipos comerciales para alimentarlos, brindarles agitación, calefacción, y para supervisarlos. Debido a que se produce una elevada cantidad de biogás, generalmente se utiliza en usos industriales [32].
- Semicontinuos: Cuando se introduce la carga inicial al digestor, contiene una gran cantidad de materias primas. A continuación, se agregan volúmenes de cargas adicionales de materias primas (afluentes), que se calculan utilizando el tiempo de retención hidráulica (TRH) y el volumen total del biodigestor. El efluente y el afluente se descargan regularmente. Este proceso se utiliza en las zonas rurales para sistemas pequeños para uso doméstico. El digestor chino e indiano son los diseños más populares [32].
- Discontinuos o régimen estacionario: La biomasa es introducida en los digestores de manera integral, en un único ciclo de carga. Tras un periodo determinado de fermentación, durante el cual la cantidad de materias primas decrece y la producción de biogás se reduce, los biodigestores son completamente vaciados y vuelven a ser cargados, iniciando un nuevo ciclo de fermentación [32].

2.1.4.2.1 Modelo Chino

Usualmente los biodigestores de esta clase son depósitos cilíndricos que se construyen totalmente enterrados, tienen techos y pisos en forma de domo.

Al iniciar el proceso, la cubierta superior removible del biodigestor se llena con desechos agrícolas compostados combinados con lodos activos de otro biodigestor. La parte media del digestor recibe los desechos de la letrina y los animales domésticos cada día después de cargarlos así.

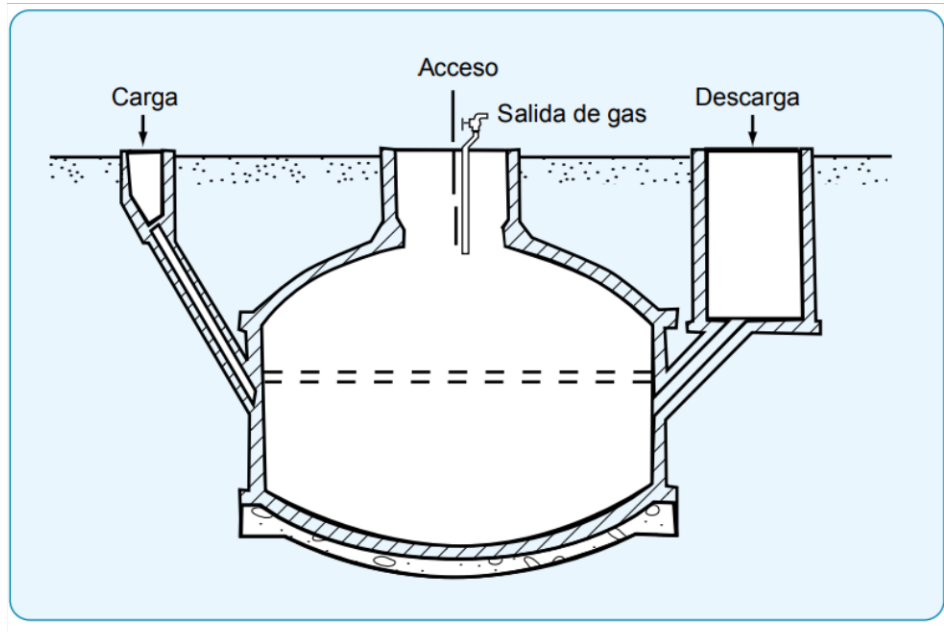


Figura 2.8. Biodigestor Chino [32].

El biogás se acumula dentro del sistema porque no hay gasómetro en este tipo de digestores. A medida que crece el volumen de biogás acumulado en el domo del biodigestor, crece la presión en el mismo, lo que obliga al líquido a subir por los tubos de ingreso y salida. Se forman alrededor de 0.15 a 0.2 m³ de biogás por día. La eficiencia de los equipos consumidores disminuye debido a la variación de presión, que aumenta al generar biogás y se reduce al consumirlo [32].

2.1.4.2.2 Modelo Indio

Generalmente, estos tipos de digestores se caracterizan por ser de formato vertical y estar colocados bajo tierra. Se llenan mediante un proceso de carga por gravedad una vez al día, utilizando un volumen de mezcla que varía en función del lapso de fermentación o retención. Si se mantienen las condiciones operativas adecuadas, estos biodigestores generan una cantidad diaria de biogás más o menos constante. El sistema incluye un gasómetro integrado, donde una campana flota en la parte superior del depósito de almacenamiento de gas. Este diseño garantiza una presión mínima del biogás sobre la superficie de la mezcla. Además, la campana mantiene una presión constante, lo que permite un funcionamiento eficiente de los equipos alimentados por el gas. Este tipo de biodigestor muestra una eficiencia de obtención de biogás aceptable, generándose entre 0.5 y 1.0 m³ de biogás por día [32].

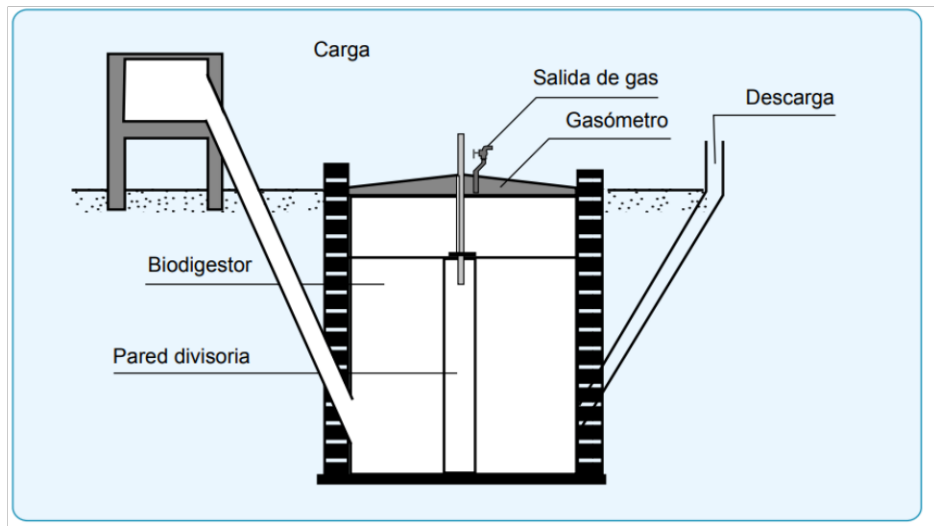


Figura 2.9. Biodigestor Indio [32].

2.1.4.2.3 Biodigestores Horizontales

Estos digestores suelen ser construidos bajo tierra, siendo de poca profundidad y de forma alargada, similar a un canal, con proporciones de longitud a anchura que oscilan entre 5:1 y 8:1, y presentando una sección transversal circular, cuadrada o en forma de "V". Funcionan bajo un régimen semi continuo, donde la carga ingresa por un extremo del biodigestor y los lodos salen por el extremo opuesto. La cubierta puede ser flexible o rígida, elaborada con un material que garantice la estanqueidad al gas y sea resistente a las condiciones climáticas. Este tipo de digestores se recomienda para aplicaciones que requieren trabajar con volúmenes superiores a 15 m³, para este tipo de volúmenes la excavación de un pozo vertical puede presentar dificultades significativas [32].

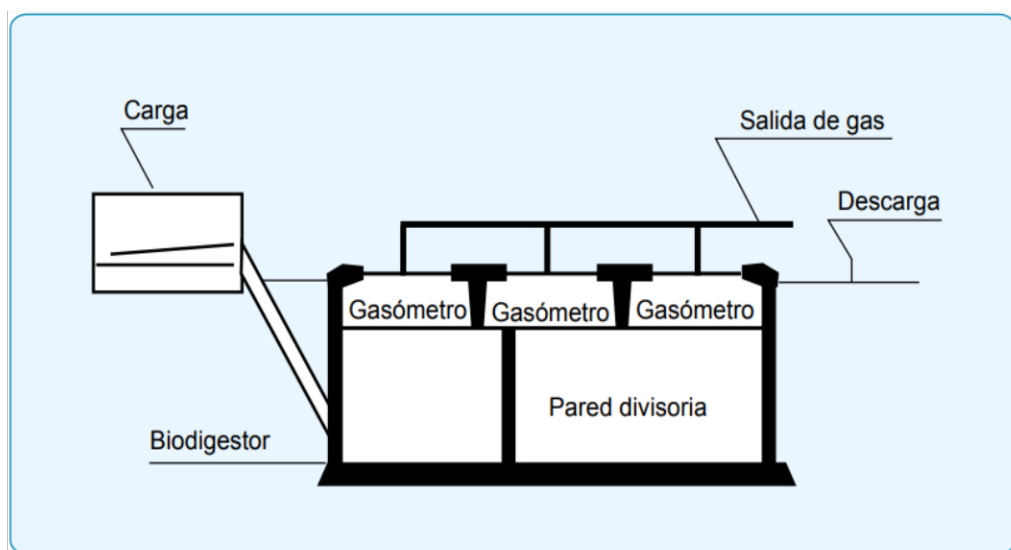


Figura 2.10. Biodigestor horizontal [32].

2.1.4.2.4 Digestor Batch (discontinuo o régimen estacionario)

Esta variante se compone de una serie de tanques o depósitos herméticos, conocidos como biodigestores, con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante destinado al almacenamiento del biogás.

El propósito de tener múltiples digestores es garantizar que al menos uno esté en constante proceso de carga o descarga, mientras que los demás se emplean en la producción de biogás. La carga o alimentación de materia prima sólida o seca en el digestor se realiza de manera discontinua, por lotes, mientras que los desechos estabilizados se introducen después de la producción de biogás [32].

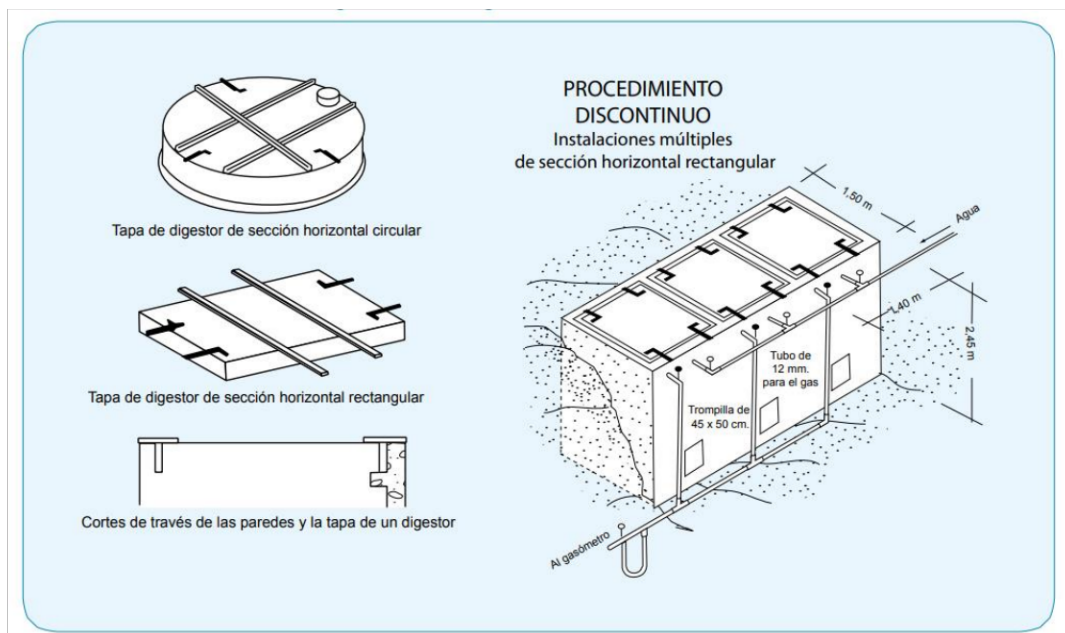


Figura 2.11. Biodigestor batch.

2.1.4.3 Introducción del material

Para ingresar los desechos al biodigestor, es crucial que la materia orgánica sea bien molida y descompuesta previamente para facilitar la degradación y aumentar la eficiencia del proceso [33].

En cuanto a la mezcla necesaria, es importante que se mantenga una proporción adecuada de los diferentes tipos de desechos orgánicos. La proporción ideal de los desechos orgánicos varía según el tipo de biodigestor y el tipo de desechos que se estén utilizando. En general, se recomienda una mezcla de desechos orgánicos que contenga una

proporción adecuada de carbono y nitrógeno. La proporción ideal de carbono a nitrógeno (C/N) para la mayoría de los biodigestores es de 25-30:1 [34].

2.1.4.4 Control del proceso

El control del proceso de un biodigestor es fundamental para garantizar su correcto funcionamiento. Los parámetros de medición típicos se pueden dividir en tres categorías: los que caracterizan el proceso, los que indican si un proceso puede ser inestable o está entrando en inhibición y los que pueden afectar la producción de biogás [35].

Parámetros que se deben monitorear para asegurar un progreso ideal del proceso de biodigestión:

- pH: Para un progreso óptimo del proceso de biodigestión, el pH ideal debe mantenerse en un nivel neutro, alrededor de 7,5. Se permite una variación de 6,8 a 7,6 para evitar la inhibición del proceso [36].
- Alcalinidad: Es esencial para garantizar la capacidad de amortiguación y prevenir la acidificación [36].
- Potencial redox: Los valores recomendados deben estar en el intervalo de -350 mV a -550 mV [36].
- Temperatura: el rango óptimo para la mayoría de los biodigestores es de 25-40°C.
- Agitación: es necesaria para mantener una mezcla homogénea de los desechos orgánicos y evitar la formación de capas flotantes o sedimentación [35].

Es importante tener en cuenta que cada conjunto de bacterias que participan en las diversas fases del proceso reacciona de manera distinta ante los factores que podrían impactar la generación de biogás.

Parámetro	Tiene	Debe	Puede
Masa seca	x		
Masa húmeda	x		
Masa volátil	x		
Caudal de alimentación	x		
Control de nivel en digestor			x
Temperatura de sustrato	x		
Potencial redox	x		
Temperatura de sustrato	x		
pH	x		
Ácidos grasos volátiles	x		
Amonios NH ₄	x		
Relación FOS/TAC	x		
Amoniaco		x	
Inyección de aire - reducción H ₂ S	x		
Concentración de metano en el biogás	x		
Concentración de O ₂ en el biogás	x		
Concentración de H ₂ S en el biogás	x		
H ₂ S en el efluente del biodigestor			x
Nitrógeno en el efluente del biodigestor			x
DQO - DBO ₅ en el afluente biodigestor			x
DQO - DBO ₅ en el efluente biodigestor			x
Concentración de CO ₂ en el biogás	x		
Temperatura del biogás	x		
Producción de biogás	x		
Electricidad producida	x		
Horas de operación generadores		x	
Horas de operación antorcha	x		
Temperatura de agitadores			x
Consumo de electricidad del biodigestor	x		
Horas de recirculación de bombas		x	
Volumen de extracción de lodos	x		
Características de los lodos (N,P,K)			x
Volumen de producción de lodo seco		x	

Figura 2.12. Parámetros De Control De Operación De Biodigestores

2.2 Estimación de biogás

Para obtener una estimación aproximada del biogás producido, es esencial considerar los procesos que tienen lugar en el biodigestor, así como la descomposición de los desechos vegetales. En este sentido, se deben tener en cuenta factores clave, tales como la cantidad de sólidos volátiles presentes en los residuos, la tecnología empleada, la temperatura, y el crecimiento bacteriano junto con la generación de biomasa dentro del biodigestor.

2.2.1 A partir de concentración de sólidos volátiles (VS)

La concentración de sólidos volátiles es una medida importante en la producción de biogás, ya que la cantidad de biogás producido está directamente relacionada con la cantidad de materia orgánica existente en el sustrato.

Según [21] a partir de los desechos vegetales se puede generar alrededor de 200 y 420 litros o su equivalente 0.2m³ a 0.42 m³ de biogás por kg de SV esto en base a desechos vegetales.

Por lo tanto, se realiza una estimación en base a 1000 kg de residuos de brócoli tomando en cuenta los valores descritos en la tabla de las características de los residuos vegetales.

$$VS_T = VS * m_{residuos} \quad (2.1)$$

$$\text{Producción de biometano} = VS_T * (0.2 - 0.42)[m^3] \quad (2.2)$$

$$VS_T = 1000 \text{ kg} \times 52.8 \frac{\text{grSV}}{1\text{kg}} = 52800\text{grSV} = 52.8 \text{ kgSV}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción de biometano} &= 52.8 \text{ kgSV} \times \frac{(200 - 420)\text{litros } CH_4}{\text{kgSV}} \\ &= (10,560 - 22,716) \text{ litros } CH_4 \end{aligned}$$

$$\text{Producción de Biometano} = (10.56 - 22.716)m^3 CH_4$$

Se estima una generación de biogás alrededor de 10560 y 22176 litros de biometano para calcular el intervalo de tiempo o es necesario utilizar la evaluación de cinética de crecimiento que se estudia a continuación.

2.2.2 A partir de la cinética de crecimiento de células

El desarrollo celular es el producto de una serie de interacciones entre reacciones bioquímicas y fenómenos de transporte que involucran múltiples etapas y sistemas con varios componentes. Durante el proceso de crecimiento, la mezcla diversa de células jóvenes y maduras experimenta una transformación constante mientras se ajusta a un entorno cuyas condiciones físicas y químicas cambian de manera continua.

Para el caso específico de crecimiento de bacterias en residuos orgánicos se utiliza el modelo de la ecuación de Monod.

La ecuación de Monod representa un modelo matemático que describe cómo los microorganismos crecen en un entorno acuoso en función de la concentración de un nutriente limitante. El modelo se describe por la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\mu_{max}S}{K_s+S} \quad (2.3)$$

donde:

μ : representa la tasa específica de crecimiento de los microorganismos.

μ_{max} : máxima tasa de crecimiento específica que pueden lograr los microorganismos.

S: concentración del nutriente que limita el incremento de microorganismos.

K_s : “constante de velocidad media”, que corresponde al valor de S cuando la relación μ/μ_{max} es 0.5.

μ_{max} y K_s son coeficientes empíricos en la ecuación de Monod. Estos coeficientes varían entre diferentes especies y dependen de las condiciones ambientales [37].

En el modelo de Monod se puede describir las tasas de cambio tanto de la biomasa con respecto al tiempo, del sustrato con respecto al tiempo y la de producto con respecto al tiempo. Se muestran a continuación:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_m(s,x)}{K_s+S} \quad (2.4)$$

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{1}{Y_{x/s}} * \frac{dx}{dt} \quad (2.5)$$

$$\frac{dP}{dt} = Y_{p/x} * u_m \quad (2.6)$$

Donde:

$Y_{x/s}$: Es el coeficiente de rendimiento que representa la cantidad de producto (en g de células) obtenido por cada g de sustrato consumido (g células). (g sustrato)⁻¹.

$Y_{p/x}$: Es el coeficiente de rendimiento que indica la cantidad de producto generada en función del crecimiento celular.

X: Es la concentración de biomasa, (g células secas*Litro⁻¹)

La tasa de producción del producto representa la generación de biometano (CH₄) en relación con el tiempo y la concentración del sustrato (S) [38].

TRH: es el tiempo de retención hidráulica representa el periodo de tiempo durante el cual los residuos permanecen en una unidad de tratamiento, su estimación es cuando el reactivo limitante se agote.

Para realizar la aplicación se debe tener en cuenta los siguientes parámetros para una simulación de producción de biogás a partir de desechos de verduras en un biodigestor:

La tasa de crecimiento de los microorganismos se puede estimar a partir de la concentración de sólidos volátiles (VS) presentes en los residuos, la temperatura y otros factores. La tasa de crecimiento de los microorganismos puede oscilar entre 0.1 y 0.5 (1/día).

La constante de sustrato medio (K_s) se refiere a la concentración de sustrato necesaria para que los microorganismos crezcan a la mitad de su tasa máxima de crecimiento. Según [38], la constante para la digestión anaerobia de residuos de desechos orgánicos como vegetales puede oscilar entre 0.5 y 2.0 g/L.

El rendimiento del producto basado en el crecimiento celular (Y_{px}) se describe a la cantidad de producto (biogás) producido por unidad de biomasa celular producida. Según [38], esta variable del crecimiento celular para la digestión anaerobia de residuos de desechos vegetales puede oscilar entre 0.3 y 0.5 L CH₄/g células.

El rendimiento de biomasa basado en el consumo de sustrato (Y_{xs}) se refiere a la cantidad de biomasa producida por unidad de sustrato consumido. Según [38], este parámetro dirigido para la digestión anaerobia de residuos de vegetales puede oscilar entre 0.05 y 0.15 g células/g sustrato.

La concentración de sólidos totales (ST) de residuos vegetales oscila entre 10 y 20 %. Por lo que se multiplica la cantidad de residuos por estos factores obteniendo una concentración de sustrato (S_0) en (g/L) [39], [40].

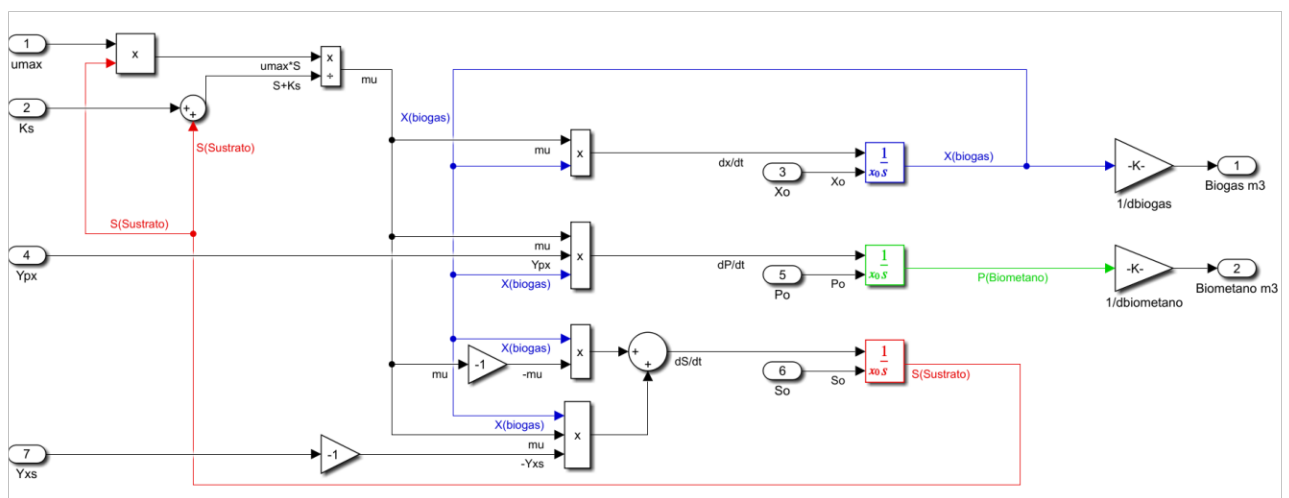


Figura 2.13. Modelo matemático representado en diagrama de bloques [Elaboración Propia].

2.2.3 Calidad y Refinamiento de biogás

El biogás, que se origina en el biodigestor, es un combustible compuesto principalmente por metano y anhídrido carbónico (CO₂), aunque también contiene varias impurezas. La composición exacta del biogás varía dependiendo del material que se descompone y de cómo se lleva a cabo el proceso. Si el contenido de metano en el biogás supera el 45%, se vuelve inflamable [41].

Tabla 2.4. Características del biogás [32].

Masa molar	16,043 kg kmol ⁻¹
Composición	55-70 % metano (CH ₄)
	30-45% dióxido de carbono (CO ₂)
	Trazas de otros gases
Densidad normal	1,2 kg m ⁻³
Equivalente de combustible	0,6-0,65 L petróleo/ m ³ biogás
Contenido energético	6,0 - 6,5 kWh m ⁻³
Presión Crítica	74 - 88 atm
Temperatura de ignición	650 -750 °C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Límite de explosión	6 - 12 % de biogás en el aire
Temperatura crítica	-82,5 ° C
Olor	Huevo podrido (el olor desulfurado del biogás es inoloro)

El biogás generado en el biodigestor es un gas con grandes cantidades de impurezas en su mayoría CO₂, debido a este problema se ha desarrollado un proceso llamado upgrading el cual convierte el biogás a biometano eliminando la mayoría de las impurezas de este gas renovable [42].

Para tratar el biogás y convertirlo en biometano, se requiere un proceso de purificación. El proceso de purificación del biogás es un proceso complejo que implica la eliminación de los contaminantes presentes en la mezcla, principalmente el CO₂ y el H₂S. Este proceso es necesario para aumentar el contenido de metano y mejorar su calidad como combustible. Además, la purificación también puede implicar la eliminación de impurezas adicionales, como el vapor de agua y los compuestos orgánicos volátiles, que pueden tener un impacto negativo en su utilización como combustible [43].

El biogás se limpia y se seca para eliminar el dióxido de carbono y otros contaminantes. Para el tratamiento del biogás, se pueden utilizar herramientas como filtros y secadores. Los filtros se utilizan para eliminar el dióxido de carbono y otros contaminantes del biogás. Existen diferentes tipos de filtros que se pueden utilizar, como los filtros de carbón activado, los filtros de zeolita y los filtros de membrana.

Los filtros de carbón activado son los más comunes y se utilizan para eliminar el dióxido de carbono y otros gases ácidos del biogás[43].

Los filtros de zeolita se utilizan para eliminar el sulfuro de hidrógeno(H_2S) y otros gases ácidos del biogás. Los filtros de membrana se utilizan para separar el metano del dióxido de carbono y otros gases.

El biogás purificado se convierte en biometano mediante un proceso de compresión y enfriamiento. El biometano se puede utilizar como combustible para vehículos o para generar electricidad y calor.

Pasos de upgrading:

- Pretratamiento: El biogás se somete a un proceso de pretratamiento para eliminar las impurezas sólidas y líquidas [44].
- Desulfuración: El biogás se somete a un proceso de desulfuración para eliminar el H_2S .
- Eliminación de CO_2 : El biogás se somete a un proceso de eliminación de CO_2 para aumentar el contenido de metano [43], [44].
- Compresión: El biogás purificado se comprime para aumentar su densidad y facilitar su almacenamiento y transporte [44].
- En cuanto a las herramientas y sistemas utilizados en cada uno de estos pasos, hay varias opciones disponibles. Por ejemplo, para el pretratamiento, se pueden utilizar filtros de partículas y separadores de líquidos [44]. Para la desulfuración, se pueden utilizar sistemas de absorción química o biológica. Para la eliminación de CO_2 , se pueden utilizar sistemas de absorción física o química. Para la compresión, se pueden utilizar compresores de pistón, compresores de tornillo o compresores de membrana [44].

Para tener una comparativa más clara se realizó una comparación con gases utilizados para la producción de energía eléctrica y obtención de calor.

Tabla 2.5. Comparativa de principales Gases Energéticos [32].

Valores	Hidrogeno	Biogás	Gas Metano	Gas Natural	Gas Propano
Densidad (kg/m ³)	0.09	1.08	0.72	0.7	2.01
Valor Calorífico (kWh/ m ³)	3	7.0	10.3	10	26
Temperatura de encendido	585	687	650	650	470
Densidad con respecto al aire	0.07	0.81	0.55	0.54	1.51
Límite de explosión (% de gas en el aire)	4-80	16-12	5-15	5-15	2-10
Requerimiento teórico de aire (m ³ /m ³)	2.4	6.6	9.5	9.5	23.9
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0.43	0.31	0.47	0.39	0.42

2.2.4 Almacenamiento de Biogás y Biometano

El almacenamiento de biogás y biometano se puede realizar en cilindros o en tanques de almacenamiento. Los cilindros son más adecuados para el almacenamiento de pequeñas cantidades de gas, mientras que los tanques son más adecuados para el almacenamiento de grandes cantidades de gas [45].



Figura 2.14. Cilindro de gas y tanque de almacenamiento.

La compresión del biogás es necesaria para su almacenamiento y transporte. Los métodos más habituales para almacenar gas a baja presión incluyen las cámaras de biodigestión o gasómetros, globos de vinilo, polietileno de alta densidad (PEAD) y mantas recubiertas de caucho [45].

El suministro y uso de biogás ocurren a varios niveles de presión. Por lo tanto, las salidas de la planta deben considerar estos niveles de presión para permitir su uso directo, el llenado de cilindros o incluso la inyección en redes de gas [45].

En el gráfico 2.15. se muestra un sistema que fue configurado con abastecimiento de biogás y biometano con tres salidas con presión variable de 4 a 90 bar.

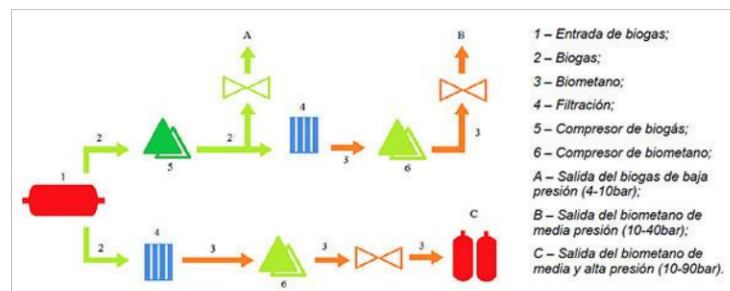


Figura 2.15. Salidas de abastecimiento de biogás y biometano [45].

En Ecuador y gran parte de Latinoamérica usa un estándar de cilindros de gas equivalentes a 15kg y presiones alrededor de los 80 a 125 PSI [46].

Por lo que sabiendo la densidad del biogás y biometano es posible encontrar el volumen que se comprimen en los cilindros mediante la ecuación de los gases ideales que nos da un aproximado muy cercano y relativo al volumen.

$$PV = nRT \quad (2.7)$$

$$V = \frac{nRT}{P}$$

Siendo:

P: es la presión (en Pascales)

V: es el volumen (en metros cúbicos)

n: es la cantidad de sustancia (en moles)

R: constante de Avogadro o constante universal de los gases ideales (8.314 J* $\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Dado que se conoce la masa del biometano se puede obtener la cantidad de sustancia (m/M).

m: es la masa del gas (en kilogramos),

M: es la masa molar del gas (en kilogramos/mol).

$$V = \frac{\frac{15\text{kg}}{16.04\text{kg}} * \left(\frac{8.314\text{J}}{\text{mol} * \text{K}^\circ}\right) * (25 + 273)\text{K}^\circ}{125\text{PSI} * \frac{6894.76\text{ pascal}}{1\text{PSI}}} = 2.6883389 \text{ m}^3$$

Obteniendo un volumen de 2.6883389 m³ por tanque de gas.

2.2.5 Diagrama de flujo obtención de biometano

Una vez detallado todos los pasos de la obtención del biogás y biometano se detallan mediante el siguiente diagrama de flujo:

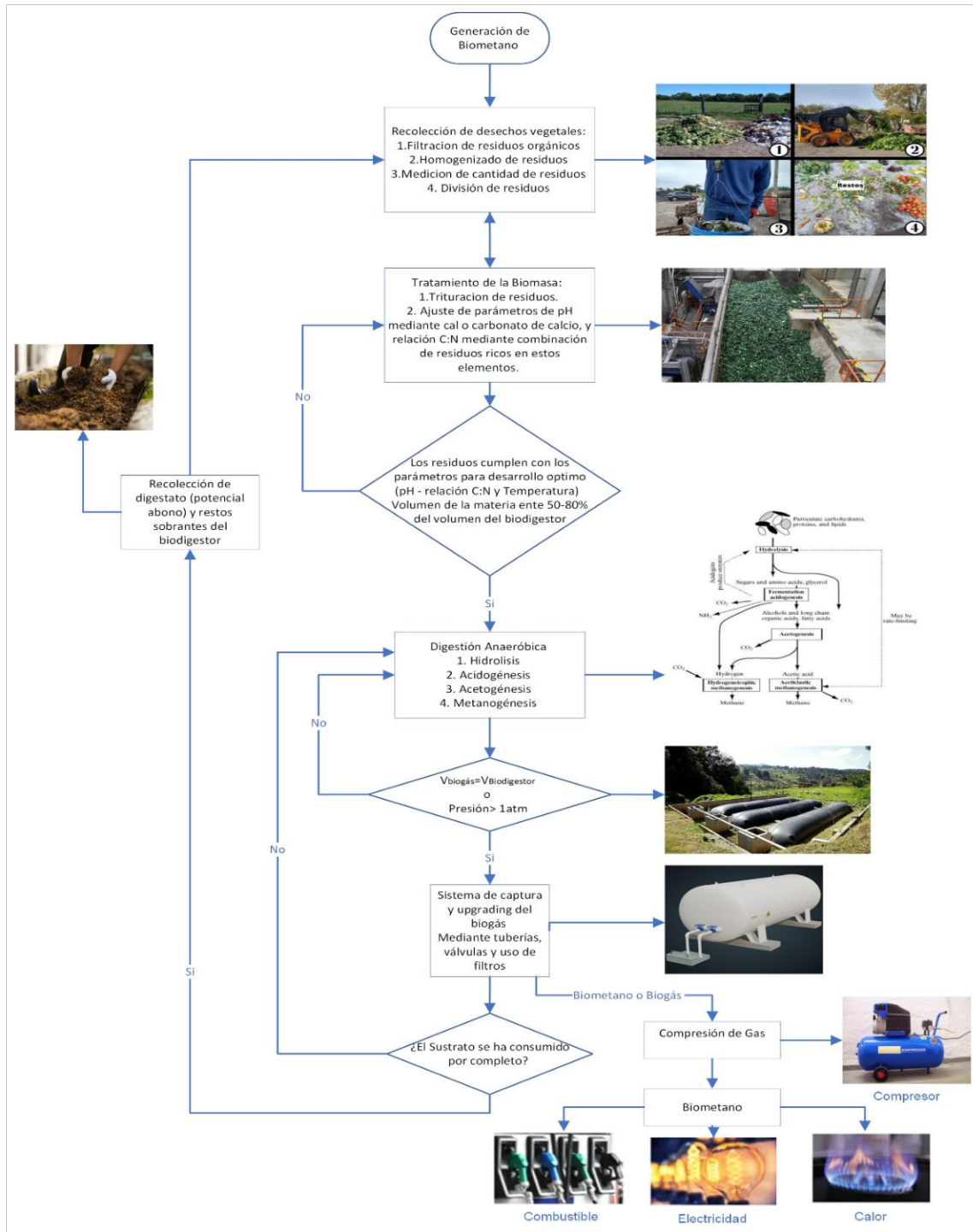


Figura 2.16. Diagrama de flujo de obtención de biometano [Elaboración propia].

Para una mejor visualización se anexa al final del documento el diagrama realizado.

2.3 Análisis económico y ambiental

Para el análisis económico es necesario tomar en cuenta algunas variables tanto para observar su viabilidad económica, como para analizar su rentabilidad como uso de una fuente de autoabastecimiento eléctrico a partir del biometano.

2.3.1 Evaluación de costos y viabilidad económica.

2.3.1.1 Análisis Financiero

En esta sección se aborda la viabilidad económica del proyecto, que se centra en la producción de biometano a partir de desechos vegetales. Para ello, será necesario analizar la inversión inicial y proyectarla a largo plazo. En este contexto, se deben examinar los siguientes indicadores, los cuales resultarán fundamentales para determinar la rentabilidad del proyecto.

2.3.1.1.1 Costos Variables (CV)

Los costos variables experimentan modificaciones en respuesta a cambios en la cantidad de producción y alcanzan el valor de cero cuando esta es nula. Por ejemplo, los costos asociados a la mano de obra directa y los costos de materia prima son generalmente clasificados como variables [47].

Para este costo se podría ejemplificar cual es el costo de transporte de cada cilindro de biometano.

Costo variable total = cantidad de producto resultante (Q) × precio por unidad producida (v)

$$CV = Q * v \quad (2.8)$$

2.3.1.1.2 Costos Fijos (CF)

Se puede catalogar estos costos son los que permanecen constantes ante variaciones en la cantidad de producción durante un periodo específico en este ámbito se podría catalogar lo que es mantenimientos y los que son gastos de operación [47].

2.3.1.1.3 Depreciación (D)

La depreciación lineal ilustra la disminución del valor de un activo a lo largo del tiempo. Es un cálculo contable básico que asume una tasa constante de depreciación [47].

$$\text{Gasto de depreciación} = (\text{Costo} - \text{Valor de salvamento}) / \text{Vida útil} \quad (2.9)$$

2.3.1.1.4 UAll

Utilidades antes de intereses pagados e impuestos. UAll se conoce por lo general como “utilidad de operación” en el estado de resultados. Representan las ganancias antes de considerar elementos extraordinarios y operaciones canceladas o excepcionales [47].

2.3.1.1.5 UAI

Significa la utilidad gravable antes de impuesto. Utilidades o pérdidas las diferencias que surgen entre ingresos gravados que no se encuentren libres menos los costos y gastos que se pueden deducir [47].

2.3.1.1.6 Flujo de Efectivo

Se puede definir como el efectivo que ingresa y sale de las operaciones de un proyecto en un determinado tiempo, usualmente se desprecia la depreciación para este cálculo debido a que este es un cómputo de la depreciación del sistema no significa que deje de funcionar [47].

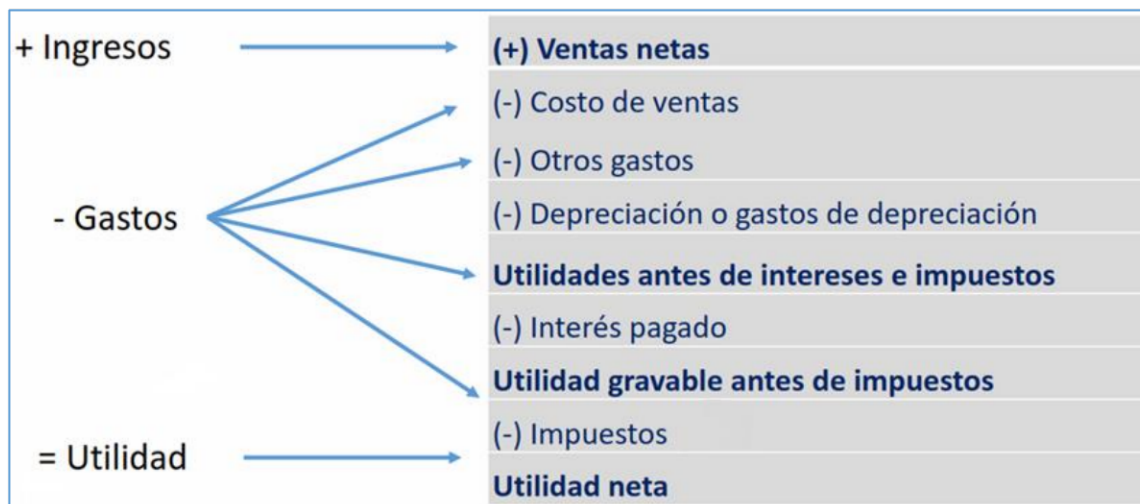


Figura 2.17. Ilustración de ingresos gastos y utilidad [47].

2.3.1.1.7 Valor Actual o Valor Presente (Va o Vp)

Es un concepto del valor de la cantidad de dinero que se tiene actualmente, este cálculo es de vital importancia debido a que el dinero cambia constantemente de valor en el tiempo. Es muy útil utilizar este parámetro para estimar las ganancias que se tendrán en el futuro (Vf) [47].

$$Vp = \frac{Vf}{(1+i)^n} \quad (2.10)$$

VF = Valor Futuro

VP = Valor Presente

i = Tasa de Interés

n = Períodos de Capitalización

2.3.1.1.8 Valor Actual Neto o Valor Presente neto (VAN o VPN)

Es la representación de la suma de Flujos de Fondos presentes (FFo) con Flujos de Fondos Futuros (FFn). Estos flujos futuros deberán ser transformados al valor actual para manejar valores homogéneos [47].

$$VPN = -FF_0 + \frac{FF_1}{(1+i)^1} + \frac{FF_2}{(1+i)^2} + \frac{FF_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FF_n}{(1+i)^n}$$

$$VPN = \sum_{n=0}^n \frac{FF_n}{(1+i)^n} \quad (2.11)$$

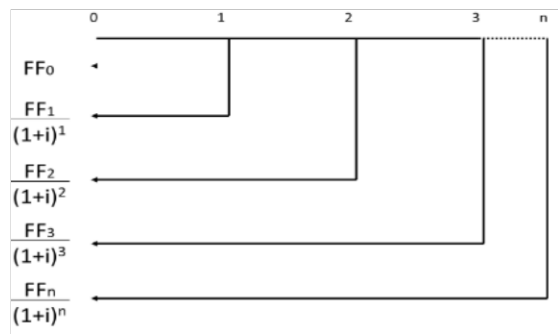


Figura 2.18. Representación del VPN [47].

Este es uno de los principales criterios para determinar si el proyecto es viable ya que con las siguientes premisas se puede determinar si existe ganancia, recuperación de la inversión o pérdidas [47].

$VPN = 0 \rightarrow$ Recuperación de la inversión

$VPN > 0 \rightarrow$ Se recupera la inversión y hay ganancia

$VPN < 0 \rightarrow$ Existen pérdidas en el proyecto

2.3.1.1.9 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es la tasa de descuento que hace posible que el VPN de una inversión sea cero, cuando se usa como tasa de descuento.

$$VPN = \sum_{n=0}^n \frac{FF_n}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (2.12)$$

El criterio para establecer que es un proyecto es rentable a partir del TIR son semejantes a las condiciones del VPN, también se puede determinar una tasa mínima admisible de beneficio para lo cual el TIR deberá ser mayor a este parámetro para que exista viabilidad, en la industria usualmente el rendimiento ronda el 10% [47].

2.3.1.1.10 Índice de Rentabilidad o relación Beneficio – costo (B/C)

El índice de rentabilidad IR o relación Beneficio – costo (B/C) es la división entre todos los ingresos del proyecto y los egresos del proyecto. Todos ellos en valor presente [47].

$$\frac{B}{C} = 0 \rightarrow \text{Inversión indiferente}$$

$$\frac{B}{C} > 0 \rightarrow \text{Inversión rentable}$$

$$\frac{B}{C} < 0 \rightarrow \text{Inversión con perdidas}$$

2.3.1.1.11 Periodo de Recuperación o Payback

Es el tiempo que se requiere para que una inversión genere flujos de efectivo suficientes para recuperar el valor de la inversión o costo iniciales (I_0). Una inversión es aceptable si su periodo de recuperación calculado es menor que su vida útil [47].

$$\sum_{t=1}^m (FF_t) = I_0 \quad (2.13)$$

2.3.1.1.12 Flujo de Efectivo Operativo (FEO)

Para determinar el flujo de efectivo operativo, es necesario restar los costos de los ingresos. Es importante destacar que la depreciación y los intereses no deben ser considerados, dado que no representan flujos de salida de efectivo, sino más bien gastos financieros [47].

$$FEO = \sum \text{Ingresos} - \sum \text{egresos}$$

$$FEO = \text{Ingresos} - \text{Costos variables} - \text{costos fijos} - \text{interese} - \text{impuestos}$$

$$FEO = -(CF + In) + T * D + (P - CV_u) * (1 - T) * Q$$

Despejando la cantidad de unidades vendidas(Q) se tiene:

$$Q = \frac{CF + In + \frac{FEO - T * D}{1 - T}}{P - CV_u} \quad (2.14)$$

Donde:

P: Precio de venta por unidad

CV_u: Costo variable por unidad

In: Interés

T= Tasa de impuestos

2.3.1.1.13 Análisis de punto de Equilibrio

La evaluación del punto de equilibrio es una herramienta ampliamente utilizada para analizar la relación entre el volumen de ventas y la rentabilidad [47].

En el estudio financiero de un proyecto existen tres puntos de equilibrio: Contable, Efectivo y Financiero.

- Punto de equilibrio efectivo: El nivel de ventas en el cual se obtiene un flujo de efectivo operativo nulo.

$$FEO \rightarrow 0$$

Obteniendo el punto de equilibrio efectivo (Q_e)

$$Q_e = \frac{CF + In - \frac{T * D}{1 - T}}{P - CV_u} \quad (2.15)$$

- Punto de equilibrio contable: Este punto se presenta cuando el FEO es igual a la depreciación.

$$FEO = D$$

$$Q = \frac{CF + In + \frac{D - T * D}{1 - T}}{P - CV_u} = \frac{CF + In + \frac{D(1 - T)}{1 - T}}{P - CV_u}$$

Resultando el punto de equilibrio contable (Q_c)

$$Q_c = \frac{CF + In + D}{P - CV_u} \quad (2.16)$$

- Punto de equilibrio financiero: ocurre cuando el nivel de ventas da como resultado un VPN igual a cero.

Al graficar el flujo de efectivo operativo versus la cantidad de unidades vendidas se muestra que es una recta cuya ecuación se muestra como:

$$Y = a + bx \quad (2.17)$$

Siendo

$$a = -(CF + In) * (1 - T) + T * D \quad (2.18)$$

$$b = (P - CV_u) * (1 - T) \quad (2.19)$$

$$x = Q; \quad Y = FEO$$

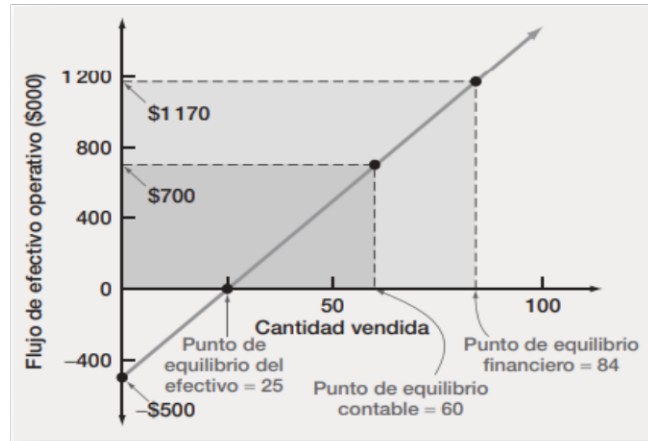


Figura 2.19. Grafica de recta del flujo efectivo operativo [47].

2.3.1.1.14 Monte Carlo

El método de Montecarlo se empleó para estimar los potenciales resultados de la venta de biometano mediante muestreo aleatorio repetitivo, utilizando una distribución de probabilidad. Se analizaron los principales indicadores como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Índice de Rentabilidad (R B/C) para un número n de ensayos.

En este caso, se aplicará la variación tanto a las ventas unitarias anuales como al precio unitario por cilindro de biometano.

La distribución de las ventas unitarias anuales puede estimarse calculando inicialmente la producción estimada mínima y máxima de cilindros de gas anuales mediante un script que describe el modelo matemático de Monod. Al obtener estos valores mínimos y máximos, es posible trabajar con una distribución triangular para representar las posibles ventas anuales.

Para modelar la distribución del precio unitario, se utilizó una gráfica del precio de otro combustible ya estandarizado, que presenta características similares. Se analizó la gráfica del precio del gas natural a lo largo del tiempo para obtener una distribución normal [48].

La viabilidad del proyecto se presenta en la sección de resultados con varios ejemplos demostrativos.

2.3.1.2 Inversión inicial

La inversión en sistemas de obtención de biometano es una parte importante del desarrollo y la implementación de tecnologías de energía renovable sostenibles. Para que estos sistemas generen biogás utilizando la digestión anaeróbica de materia orgánica, se requiere una infraestructura y equipos específicos que se describen en la siguiente tabla.

Tabla 2.6. Costos de la inversión inicial.

Costos fijos	Unidades	Costes	Total
Biodigestor (10000L)[49]	1	578	578
Gasómetro	1	13	13
Detector de gas [50]	1	235	235
Flujómetro[51]	1	129,72	129,72
Manómetros[52]	4	25	100
Filtro desulfurador para planta familiar[53]	1	5	5
Filtro deshidratador [54]	1	16,5	16,5
Implementos de distribución de biogás (tubos PVC 110) [55]	2	7	14
Compresor (9 Bar) [56]	1	932	932
Juego de mangueras de gas alta presión[57]	1	10	10
Tanques para biogás [58]	30	17,8	534
Adaptación de terreno	1	500	500
Mano de obra	1	150	150
		Subtotal	\$3.217,22
		IVA 12%	\$386,07
		Total	\$3.603,29

El proyecto requerirá un monto inicial de 3603.29 dólares. Esta estimación será fundamental para evaluar la viabilidad del sistema, la cual se detallará en la sección de resultados.

2.3.2 Impacto ambiental y emisiones asociadas.

La producción de biometano de desechos vegetales puede mejorar el medio ambiente. Esto se debe a una disminución en la cantidad de desechos que se depositan en los vertederos, lo que reduce la liberación de metano a la atmósfera. El metano, es un gas de

efecto invernadero muy dañino, es una de las razones principales del cambio climático. Además, la generación de biometano a partir de desechos vegetales puede reducir la dependencia de combustibles fósiles, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con su producción y uso [59].

No obstante, la generación de biometano a partir de desechos orgánicos también puede tener consecuencias ambientales desfavorables. El proceso de producción de biogás puede requerir grandes cantidades de agua y energía, lo que podría incrementar la huella de carbono. Además, durante la producción y el transporte, se pueden generar emisiones de gases de efecto invernadero, como el anhídrido carbónico (CO₂) y el óxido nitroso (N₂O). Estas emisiones pueden ser significativas y deben ser consideradas al apreciar el impacto ambiental de la producción de biometano a partir de residuos orgánicos [60].

Una vez analizados estos dos puntos, se determina que la implementación de esta alternativa renovable contribuye significativamente al manejo de los desechos y previene la liberación de gases como el metano y el dióxido de carbono a la atmósfera, lo cual podría afectar la capa de ozono. Además, al capturar estos gases, se les da un propósito útil y sostenible.

2.3.3 Comparación con otras fuentes de energía renovable.

Los sistemas de generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables son diversos y tienen diferentes ventajas e inconvenientes. En esta sección se analiza las principales características de estos y que ventaja tiene la producción de energía a partir de biometano.

Tabla 2.7. Comparativa de fuentes de energía renovable [61].

Tipo de sistema	Eficiencia	Costo	Disponibilidad	Impacto ambiental
Energía solar térmica	0.15 - 0.3	Bajo	Depende condiciones climáticas y presencia de luz solar	No emite gases de efecto invernadero
Energía solar fotovoltaica	0.15 - 0.2	Bajo	Depende condiciones climáticas y presencia de luz solar	No emite gases de efecto invernadero
Energía geotérmica	0.1 - 0.3	Moderado	Solo es viable en áreas con actividad geotérmica significativa	No emite gases de efecto invernadero

Tipo de sistema	Eficiencia	Costo	Disponibilidad	Impacto ambiental
Energía hidroeléctrica	0.85 - 0.9	Costoso	Elevados caudales de agua	No emite gases de efecto invernadero, pero la construcción de presas y centrales hidroeléctricas puede tener un impacto ambiental significativo
Energía mareomotriz	0.8 - 0.9	Costoso	Solo es viable en áreas con mareas significativas	No emite gases de efecto invernadero sin embargo tiene un impacto alrededor de su aplicación en especial de la vida acuática
Energía eólica	0.3 - 0.4	Costoso	Necesita corrientes de aire	No emite gases de efecto invernadero, afecta a la vida de aves de la zona
Generación a partir de biometano	0.3 - 0.4	Moderado	Depende de la cantidad de residuos orgánicos disponibles	No emite gases de efecto invernadero

Mediante la comparación se observa que la generación a partir de biometano tiene características atractivas para su implementación. Se observa que este sistema es aplicable para granjas y haciendas que puedan producir la cantidad de residuos vegetales constantes para la generación de biometano.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En este componente, se muestran los resultados derivados tanto de la estimación del biogás a obtener mediante la metodología revisada, como de la proyección y viabilidad del proyecto.

3.1.1 Estimación del Biometano

➤ Brócoli

Para la estimación de brócoli se tiene un estimado de (10.56-22.716) m³ CH₄. Esta estimación se muestra en la sección de metodología estimación del biogás. Se utiliza la ecuación (2.2) para encontrar los rangos de producción de biometano a partir de los otros elementos.

Los parámetros descritos en la parte de metodología se aplicaron en el script y se obtuvo el valor de sustrato inicial mediante la tabla de características de los residuos vegetales y

multiplicarlo por los 1000 kg. Se aplicarán los mismos procesos para las estimaciones de los demás desechos de vegetales.

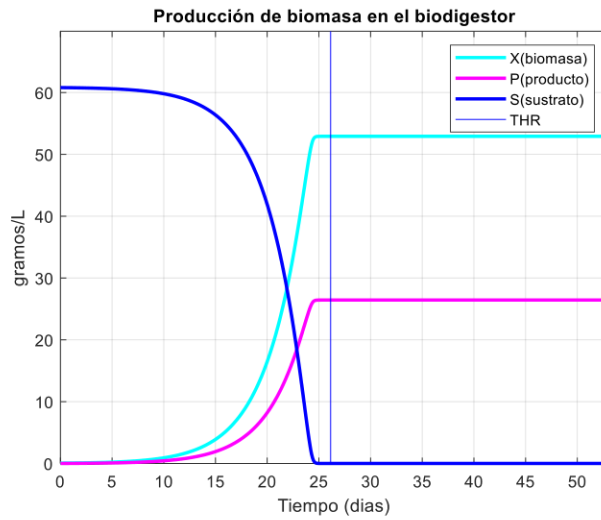


Figura 3.1. Producción de Biomasa en concentraciones R. brócoli.

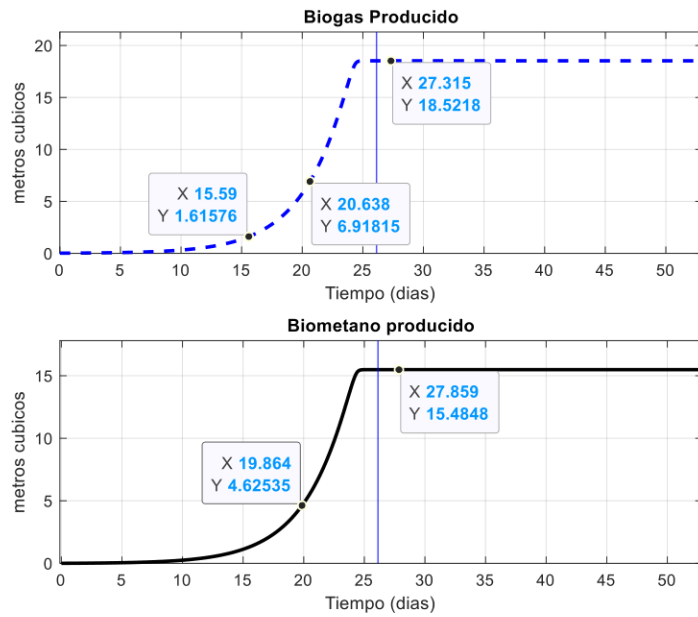


Figura 3.2. Estimación de biogás y biometano por producir R. brócoli.

➤ Zanahorias

$$VS = 1000 \text{ kg} \times 82.53 \frac{\text{grSV}}{1\text{kg}} = 82530 \text{ grSV} = 82.53 \text{ kgSV}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción de biometano} &= 82.53 \text{ kgSV} \times \frac{(0.2 - 0.42) \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{\text{kgSV}} \\ &= (16.506 - 34.66) \text{ m}^3 \end{aligned}$$

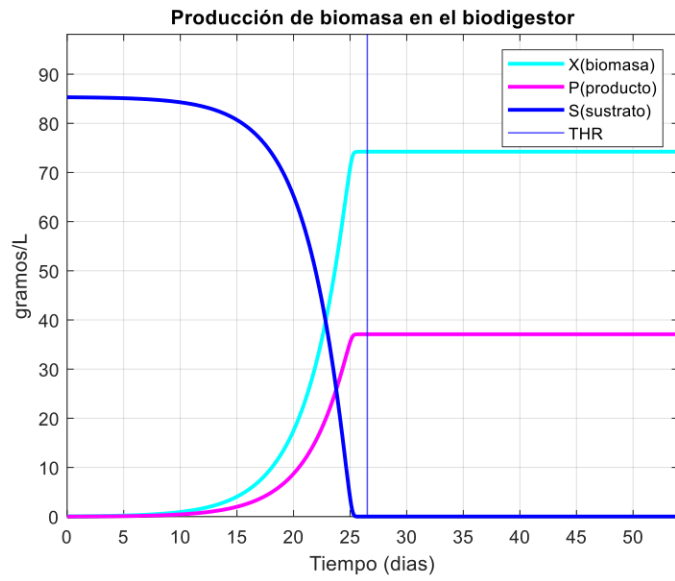


Figura 3.3. Producción de Biomasa en concentraciones R. zanahoria.

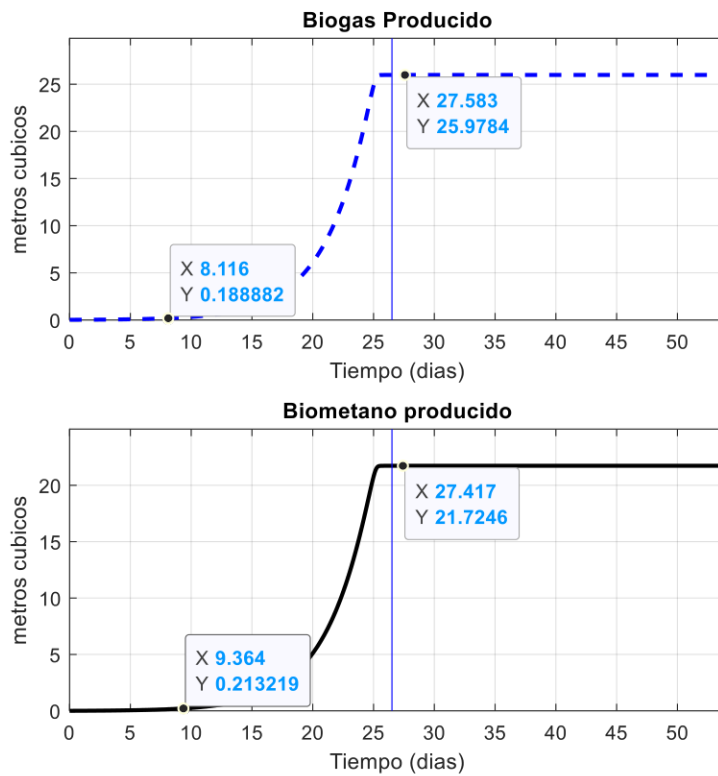


Figura 3.4. Estimación de biogás y biometano por producir R. zanahoria.

➤ Maíz

$$VS = 1000 \text{ kg} \times 155.16 \frac{\text{grSV}}{1\text{kg}} = 155.16 \text{ kgSV}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción de biometano} &= 155.16 \text{ kgSV} \times \frac{(0.2 - 0.42)m^3 \text{ CH}_4}{\text{kgSV}} \\ &= (31.032 - 65.1672)m^3 \end{aligned}$$

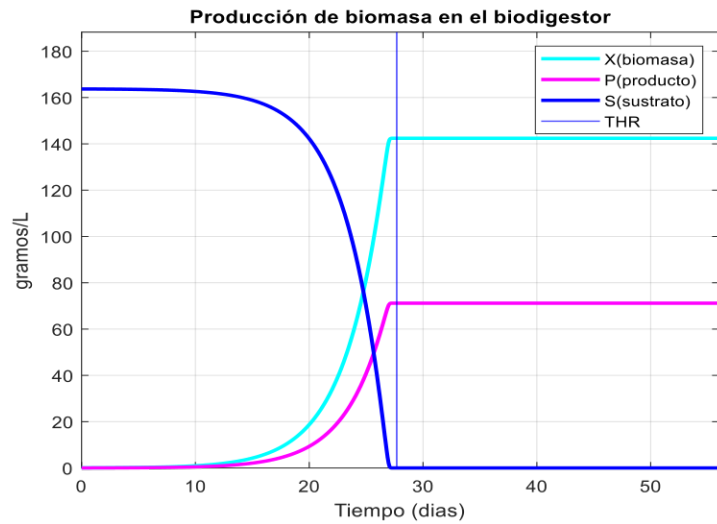


Figura 3.5. Producción de Biomasa en concentraciones R. maíz.

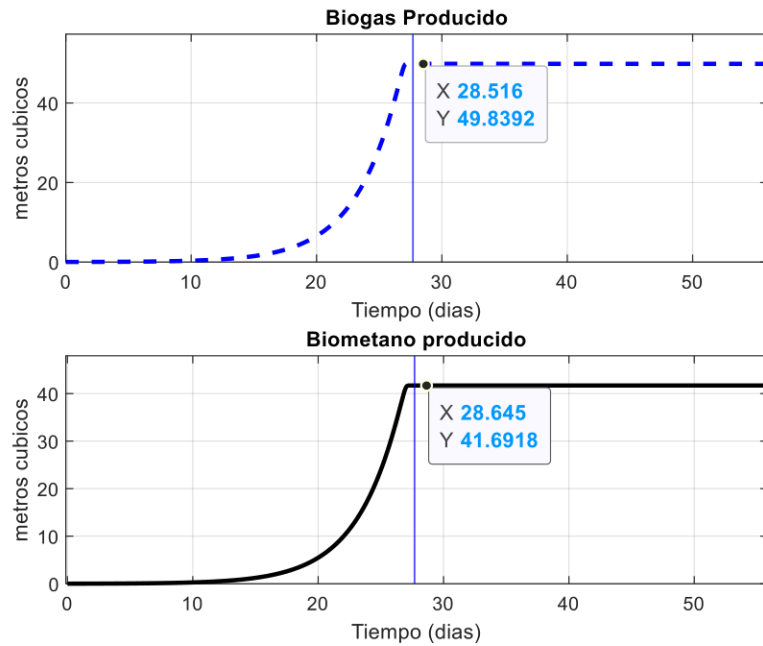


Figura 3.6. Estimación de biogás y biometano por producir R. maíz.

➤ Arveja

$$VS = 1000 \text{ kg} \times 179.59 \frac{\text{grSV}}{1\text{kg}} = 179.59 \text{ kgSV}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción de biometano} &= 179.59 \text{ kgSV} \times \frac{(0.2 - 0.42)m^3 \text{ CH}_4}{\text{kgSV}} \\ &= (35.918 - 75.4278)m^3 \end{aligned}$$

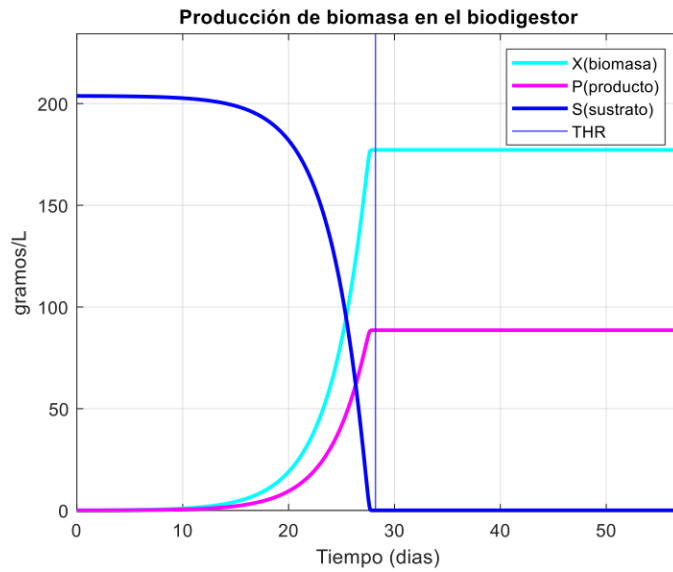


Figura 3.7. Producción de Biomasa en concentraciones R. arveja.

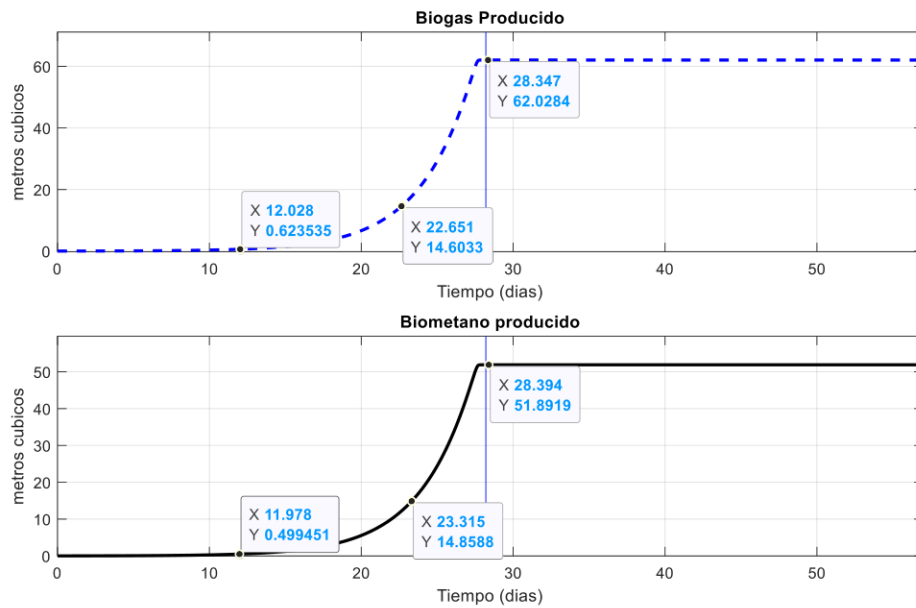


Figura 3.8. Estimación de biogás y biometano por producir R. arveja.

➤ Habichuelas

$$VS = 1000 \text{ kg} \times 77.35 \frac{\text{grSV}}{1\text{kg}} = 77.35 \text{ kgSV}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción de biometano} &= 77.35 \text{ kgSV} \times \frac{(0.2 - 0.42) \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{\text{kgSV}} \\ &= (15.47 - 32.487) \text{ m}^3 \end{aligned}$$

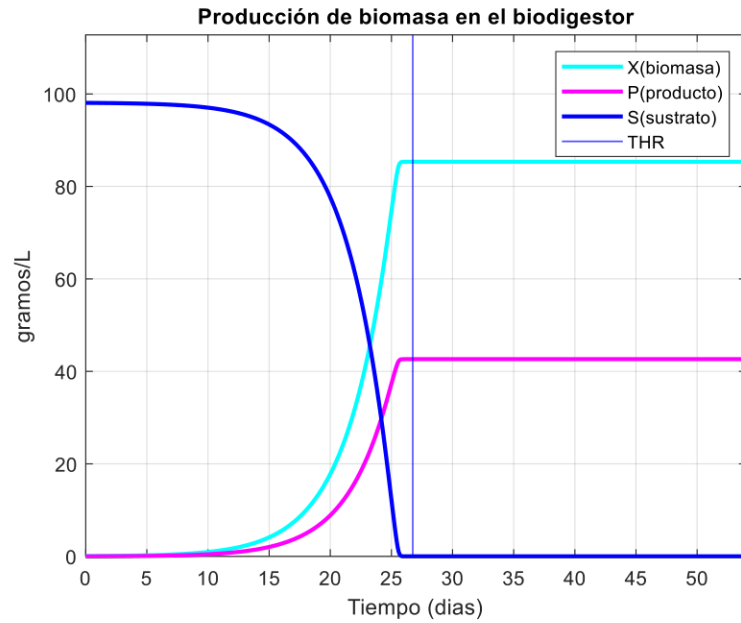


Figura 3.9. Producción de Biomasa en concentraciones R. habichuelas.

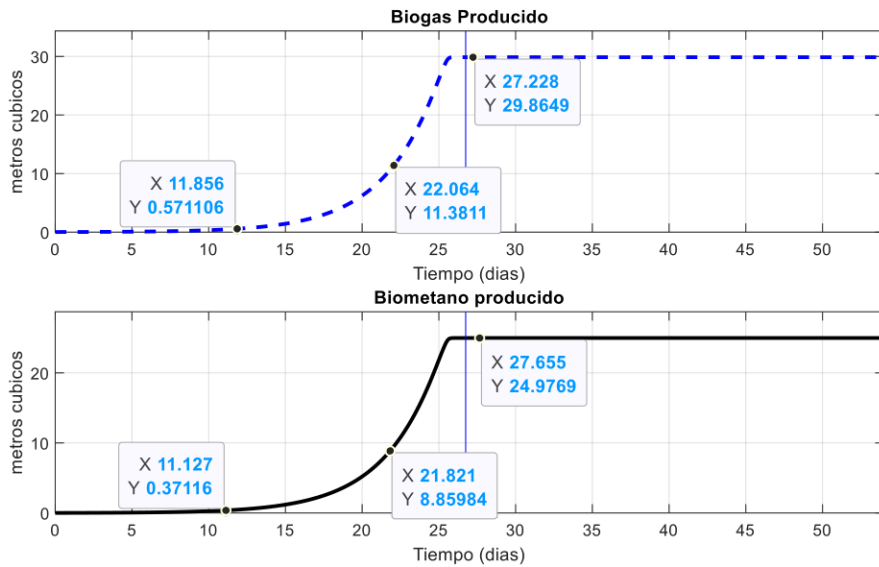


Figura 3.10. Estimación de biogás y biometano por producir R. habichuelas.

➤ Residuos ensilados

$$VS = 1000 \text{ kg} \times 160.74 \frac{\text{grSV}}{1\text{kg}} = 160.74 \text{ kgSV}$$

$$\begin{aligned} \text{Producción de biometano} &= 160.74 \text{ kgSV} \times \frac{(0.2 - 0.42) \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{\text{kgSV}} \\ &= (32.1480 - 67.5108) \text{ m}^3 \end{aligned}$$

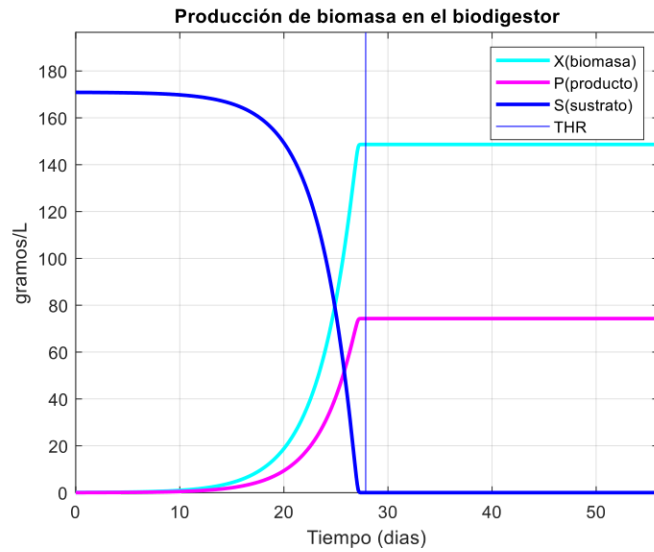


Figura 3.11. Producción de Biomasa en concentraciones R. ensilados.

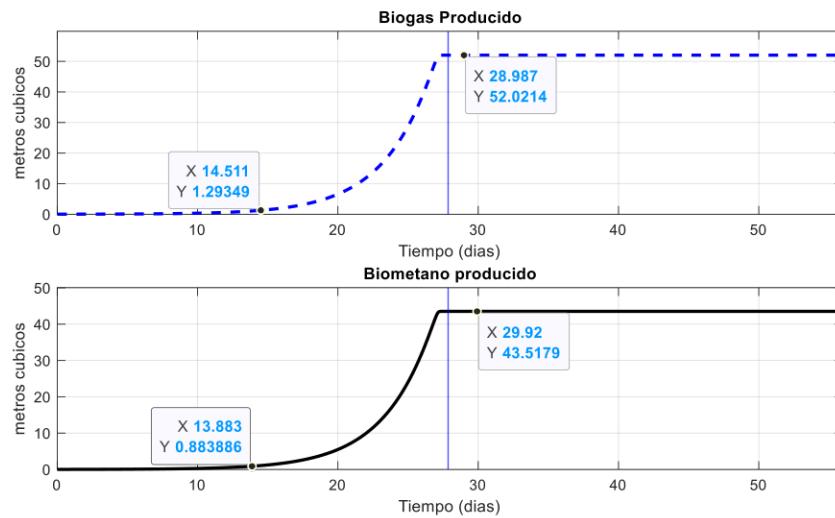


Figura 3.12. Estimación de biogás y biometano por producir R. ensilados.

Se presenta una tabla que resume los resultados obtenidos a partir de 1000 kg de desechos de los siguientes desperdicios:

Tabla 3.1. Resultados obtenidos.

Residuos	Biogás [m ³]	Biometano [m ³]	Potencial Energético [kWh]	TRH [Días]
Brócoli	18,522	15,485	159,494	26,13
Zanahoria	25,978	21,725	223,763	26,52
Maíz	49,839	41,692	429,426	27,69
Arveja	62,028	51,892	534,487	28,21
Habichuelas	29,865	24,977	257,262	26,75
R. Ensilados	52,021	43,518	448,235	27,86

*Residuos Ensilados es una combinación entre maíz (70%), arvejas (15%) y habichuelas (15%)

Mediante la tabla de resultados obtenidos se pueden concluir varias cosas como la eficiencia de residuos de la arveja para generar biogás, también se observa que los tiempos de retención hidráulica son muy parecidos esto es en base a que se realizó la prueba para una tonelada de residuos de cada tipo.

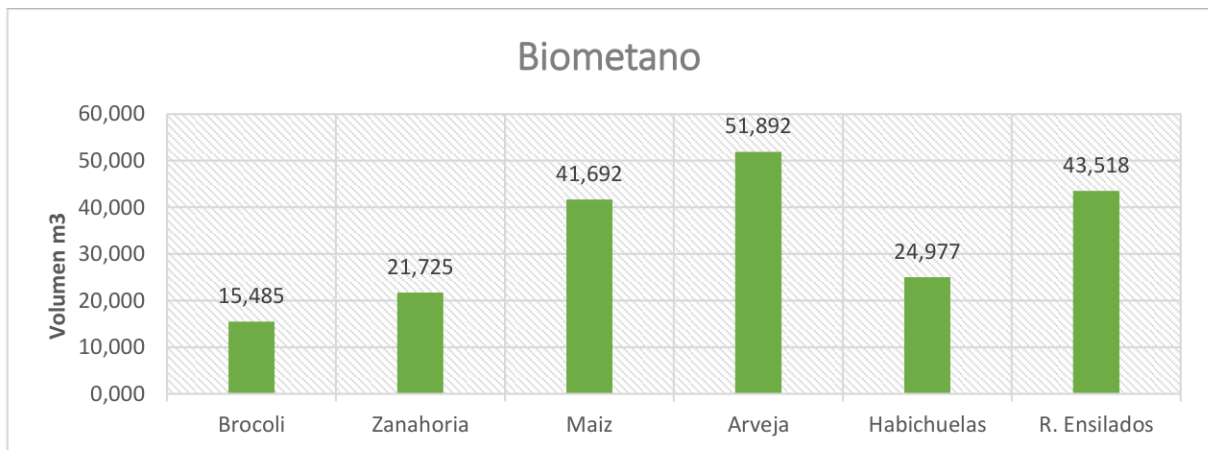


Figura 3.13. Comparación de producción de biometano.

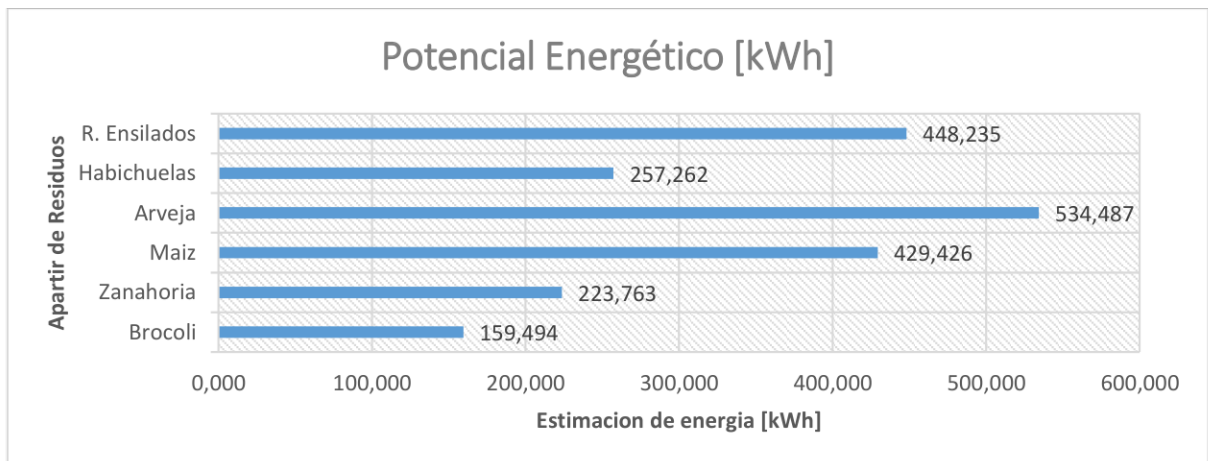


Figura 3.14. Comparación de potencial energético.

De forma más visual se observa como la arveja y los residuos ensilados son los vegetales más eficientes para la producción de biometano.

3.1.2 Viabilidad del Proyecto

La proyección financiera del proyecto se llevó a cabo mediante el uso del software de cálculo Excel y un complemento de este para ejecutar la simulación de Montecarlo. En este proceso, se determinaron los costos fijos y variables, así como una proyección que abarca el tiempo de vida del principal componente del sistema, en este caso, el biodigestor.

➤ Caso 1

Para la viabilidad del proyecto se analiza el peor caso posible donde el biodigestor tiene un tiempo de vida de 10 años, la producción de biometano es la mínima en los 10 años, se toma en cuenta un rendimiento del 12%, una financiación de 4000 dólares con 17% de interés y se toma una base de producción de biometano a partir de 1000kg de residuos ensilados que es una combinación de varios residuos vegetales.

$$V_{min} = 32.148 \text{ m}^3$$

$$V_{cilindro} = 2.688 \text{ m}^3$$

$$cilindros \text{ mensuales} = 12$$

Tabla 3.2. Datos

DATOS ANUALES	
Rendimiento	12%
Impuestos	12%
Vida útil (años)	10
Inversión	\$-3.603
Ventas unitarias anuales	144
Precio Unitario	\$10,00
Costo unitario variable	\$0,50
Costos fijos por año	\$20,00
Interés anual	\$468

Tabla 3.3. Análisis de flujo operativo

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión	\$-3.603										
Ingresos por Ventas (+)		\$1.440,00	\$1.440,00	\$1.440,00	\$1.440,00	\$1.440,00	\$1.440,00	\$1.440,00	\$1.440,00	\$1.440,00	\$1.440,00
Costos variables (-)		\$-72,00	\$-72,00	\$-72,00	\$-72,00	\$-72,00	\$-72,00	\$-72,00	\$-72,00	\$-72,00	\$-72,00

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costos fijos (-)		\$-20,00	\$-20,00	\$-20,00	\$-20,00	\$-20,00	\$-20,00	\$-20,00	\$-20,00	\$-20,00	\$-20,00
Depreciación (-)		\$-360	\$-360	\$-360	\$-360	\$-360	\$-360	\$-360	\$-360	\$-360	\$-360
UAII		\$987,67	\$987,67	\$987,67	\$987,67	\$987,67	\$987,67	\$987,67	\$987,67	\$987,67	\$987,67
Intereses (-)		\$-468	\$-468	\$-468	\$-468	\$-468	\$-468	\$-468	\$-468	\$-468	\$-468
UAI		\$519,67	\$519,67	\$519,67	\$519,67	\$519,67	\$519,67	\$519,67	\$519,67	\$519,67	\$519,67
Impuestos (-)		\$-62,36	\$-62,36	\$-62,36	\$-62,36	\$-62,36	\$-62,36	\$-62,36	\$-62,36	\$-62,36	\$-62,36
Utilidad neta		\$457,31	\$457,31	\$457,31	\$457,31	\$457,31	\$457,31	\$457,31	\$457,31	\$457,31	\$457,31

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FLUJO OPERATIVO	\$-3.603	\$817,64	\$817,64	\$817,64	\$817,64	\$817,64	\$817,64	\$817,64	\$817,64	\$817,64	\$817,64
Valor presente	\$-3.603,29	\$730,04	\$651,82	\$581,98	\$519,62	\$463,95	\$414,24	\$369,86	\$330,23	\$294,85	\$263,26

Tabla 3.4. Indicadores de inversión.

VPN o VAN	\$1.016,56
TIR	19%
RBC	1,282119893
Payback	año 5

Tabla 3.5. Puntos de flujo de efectivo operativo.

Resultados		
	Q	FEO
	0	-\$386,20
Q efectivo	46	\$0,00
Q contable	89	\$357,84
Q financiero	122	\$637,72

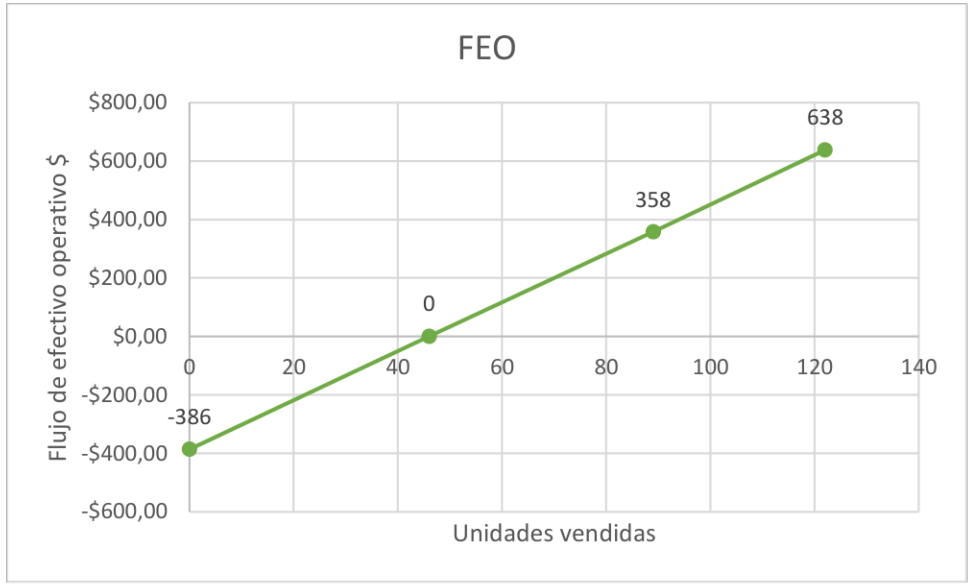


Figura 3.15. Flujo de efectivo operativo

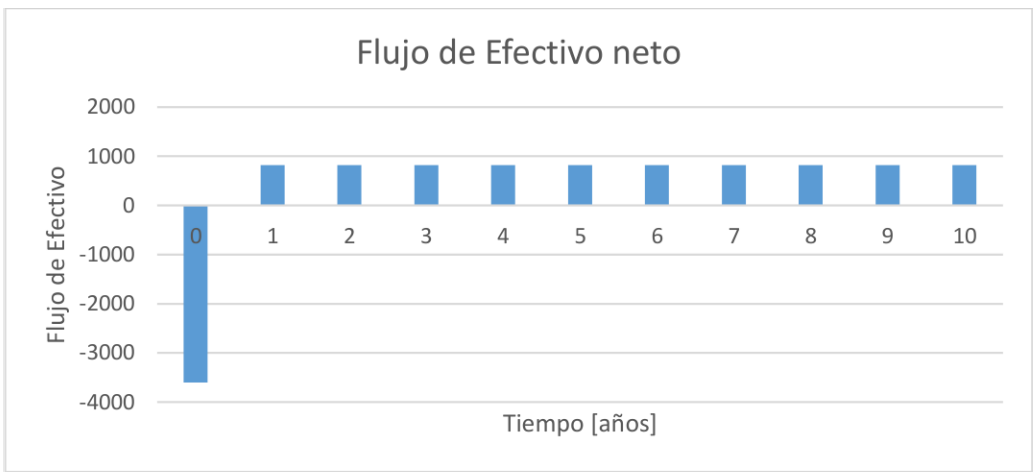


Figura 3.16. Flujo de efectivo neto

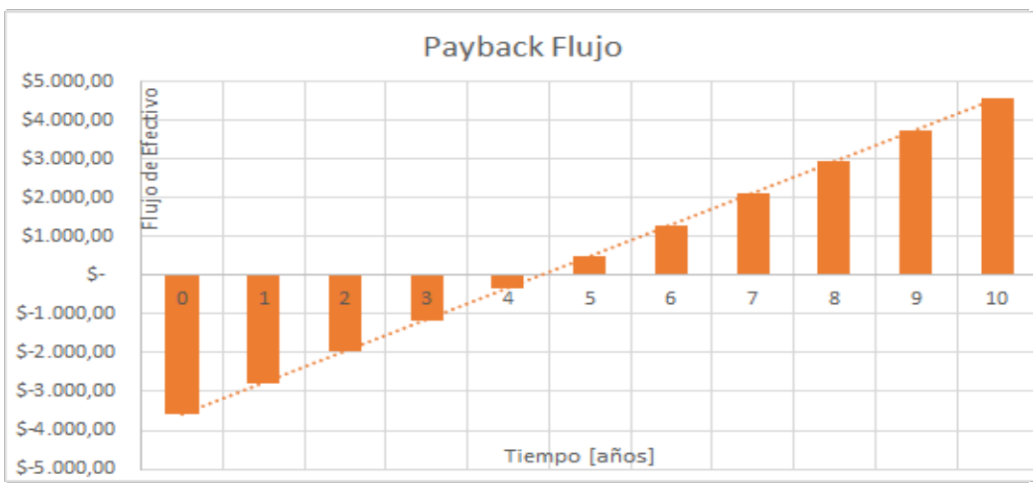


Figura 3.17. Payback

Mediante los indicadores principales de inversión se confirma que el proyecto tiene una viabilidad correcta, a pesar de definir condiciones desfavorables el sistema tuvo un buen índice de rendimiento llegando hasta una tasa interna de retorno (TIR) del 19%, también se tiene un valor neto mayor a cero así mismo su relación B/C lo que hace que el proyecto sea sostenible.

Por medio de los puntos de flujo de efectivo operativo hallados mediante la función objetivo de Excel se pudo determinar que la venta mensual mínima de cilindros de biometano debe ser de 11 tanques de gas de 15kg mensualmente para que exista ganancia.

Mediante los parámetros mencionados en la metodología es posible realizar una simulación de Monte Carlo que permita corroborar la viabilidad del sistema con un porcentaje de certeza.

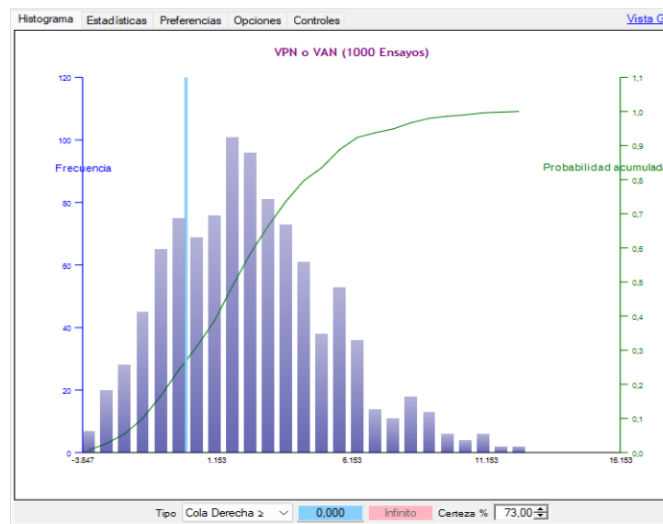


Figura 3.18. Histograma VPN.

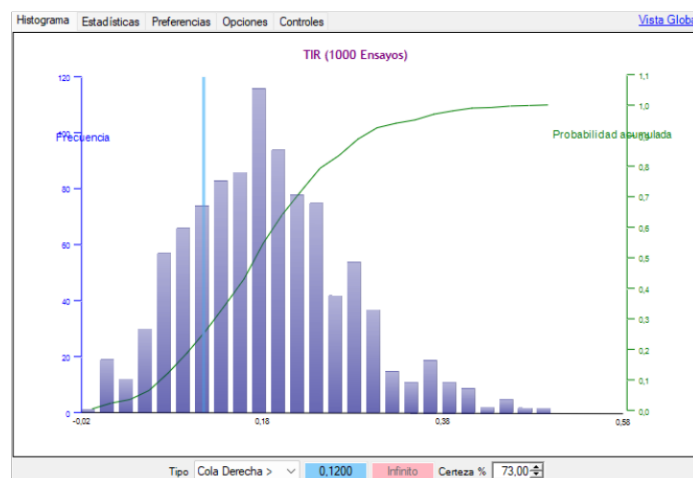


Figura 3.19. Histograma TIR.

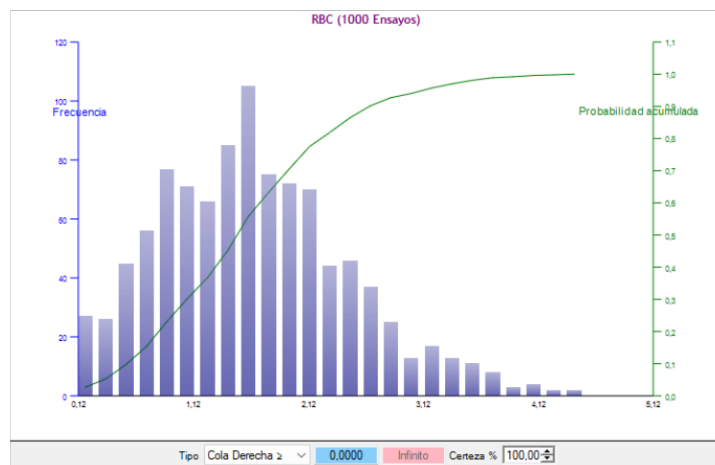


Figura 3.20. Histograma B/C.

Analizando los resultados de la simulación de Montecarlo se puede afirmar que el proyecto es viable, se puede distinguir que de cada 1000 proyectos 730 tendrán un rendimiento igual o superior al 12%, al igual que un VPN mayor o igual que cero.

➤ Caso 2

Para este caso se analiza para una vida del biodigestor de 20 años, una producción de biometano regular y constante. Para este caso no existe financiamiento, se desea tener una tasa de rendimiento del 15% y el estudio se realiza desde de la obtención de metano a partir de desechos de arveja.

$$V_{biometano} = 51,892 \text{ m}^3$$

$$V_{cilindro} = 2.688 \text{ m}^3$$

$$cilindros \text{ mensuales} = 19$$

Tabla 3.6. Datos

DATOS ANUALES	
Rendimiento	15%
Impuestos	12%
Vida útil (años)	20
Inversión	\$-3.603
Ventas unitarias anuales	228
Precio Unitario	\$5,50
Costo unitario variable	\$0,50
Costos fijos por año	\$100,00
Interés anual	\$0

Tabla 3.7. Indicadores de inversión

CRITERIOS DE INVERSION	
VPN	\$2.260,58
TIR	26%
R B/C	1,627365826
Payback	4 año

Mediante los criterios de inversión se observa que tiene una gran rentabilidad esto debido a la vida útil del biodigestor que le permite ganar mayores utilidades en el tiempo, debido a que el TIR tiende al 26% es posible realizar un ajuste en el precio del cilindro de biometano mediante una función objetivo, esto con el fin de abaratar el costo este caso representa cuando existe sobreproducción de biometano.

Con la corrección de precio se obtiene los siguientes datos

Tabla 3.8. Corrección de precio unitario

DATOS ANUALES	
Rendimiento	15%
Impuestos	12%
Vida útil (años)	20
Inversión	\$-3.603
Ventas unitarias anuales	228
Precio Unitario	\$4,02
Costo unitario variable	\$0,50
Costos fijos por año	\$100,00
Interés anual	\$0

Tabla 3.9. Criterio de inversión

CRITERIOS DE INVERSION	
VPN	\$472,87
TIR	17%
R B/C	1,131231599
Payback	6 año

Tabla 3.10. Puntos de flujo de efectivo operativo.

Resultados		
	Q	FEO
	0	-66,38
Qefectivo	21	0,00
Qcontable	80	180,00
Qfinanciero	207	575,67

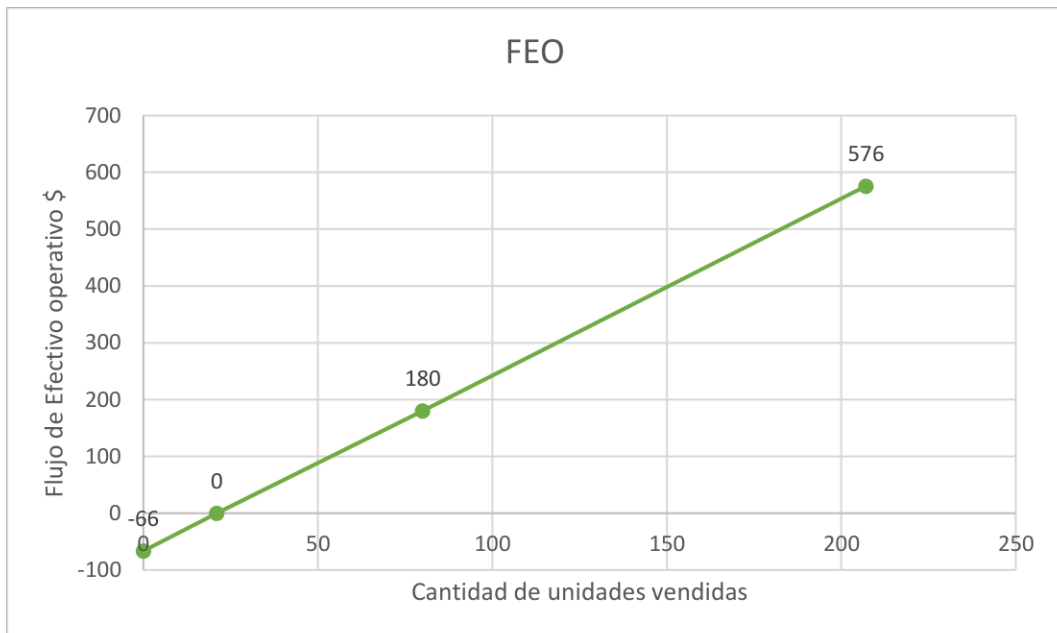


Figura 3.21. Flujo de efectivo operativo

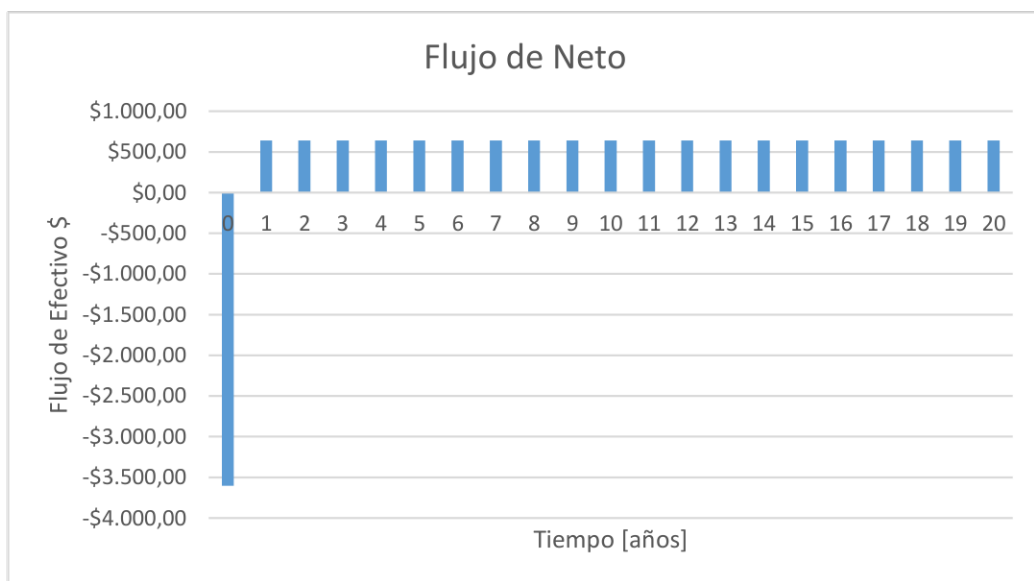


Figura 3.22. Flujo de efectivo neto.

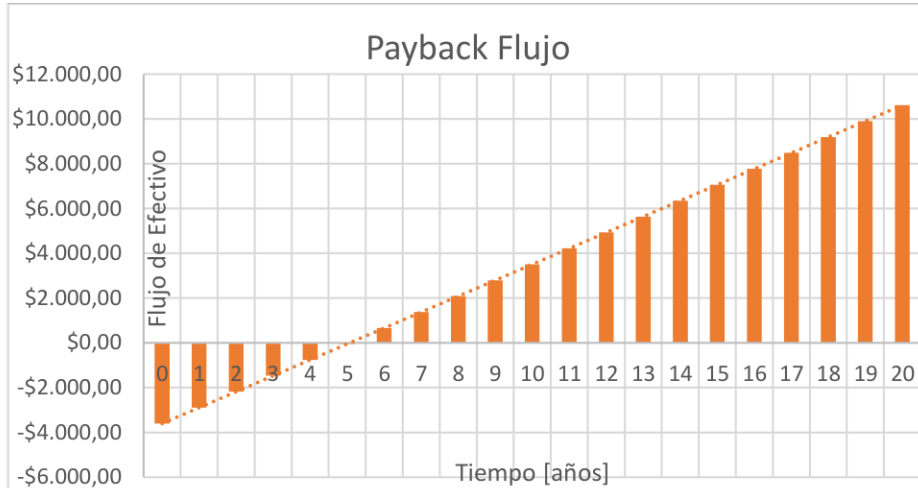


Figura 3.23. Payback.

Se anexa la tabla de flujos en la sección de anexos.

Mediante los resultados conseguidos se observa que al corregir el precio inicial aún se tiene ganancias esto se observa porque los criterios de inversión están en rangos aceptables para considerar la viabilidad del proyecto.

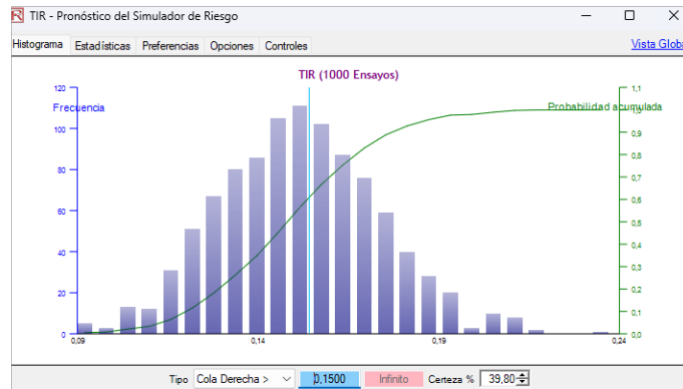


Figura 3.24. Histograma TIR.

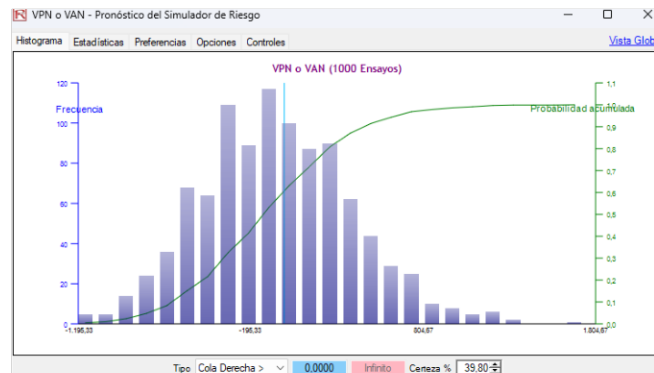


Figura 3.25. Histograma VPN.

Al momento de simular Montecarlo para este caso se observa que tuvo una caída importante en la certeza para el caso del TIR y VPN, esto se debe al ajuste del precio de cilindro de gas biometano lo que provoco dicha varianza.

➤ Caso 3

Se tiene un digestor con una vida útil de 15 años y el flujo de efectivo es variable cada año y la producción de biometano también tiende a ser aleatoria en función de una variable de distribución triangular, tomando en cuenta los valores de producción máxima y mínima de biometano.

Tabla 3.11. Datos

DATOS ANUALES	
Rendimiento	10%
Impuestos	12%
Vida útil (años)	15
Inversión	\$-3.603
Ventas unitarias anuales	Aleatorias
Precio Unitario	\$7,50
Costo unitario variable	\$0,50
Costos fijos por año	\$50,00
Interés anual	\$350

Tabla 3.12. Criterios de inversión

CRITERIOS DE INVERSION	
VPN	\$1.318,08
TIR	17%
R B/C	1,365798216
Payback	5 año

Tabla 3.13. Flujo de efectivo

Año	Flujo de efectivo	Valor presente	Payback Flujo
0	-3603,2864	\$-3.603,29	-\$3.603,29
1	\$978,01	\$889,10	-\$2.625,28
2	\$885,80	\$732,07	-\$1.739,48
3	\$282,62	\$212,34	-\$1.456,86
4	\$769,84	\$525,81	-\$687,02
5	\$840,63	\$521,97	\$153,62
6	\$533,33	\$301,05	\$686,94

Año	Flujo de efectivo	Valor presente	Payback Flujo
7	\$530,16	\$272,05	\$1.217,10
8	\$423,94	\$197,77	\$1.641,04
9	\$934,01	\$396,11	\$2.575,04
10	\$375,41	\$144,74	\$2.950,45
11	\$528,90	\$185,38	\$3.479,36
12	\$808,63	\$257,65	\$4.287,99
13	\$436,99	\$126,58	\$4.724,97
14	\$244,22	\$64,31	\$4.969,20
15	\$394,49	\$94,44	\$5.363,69

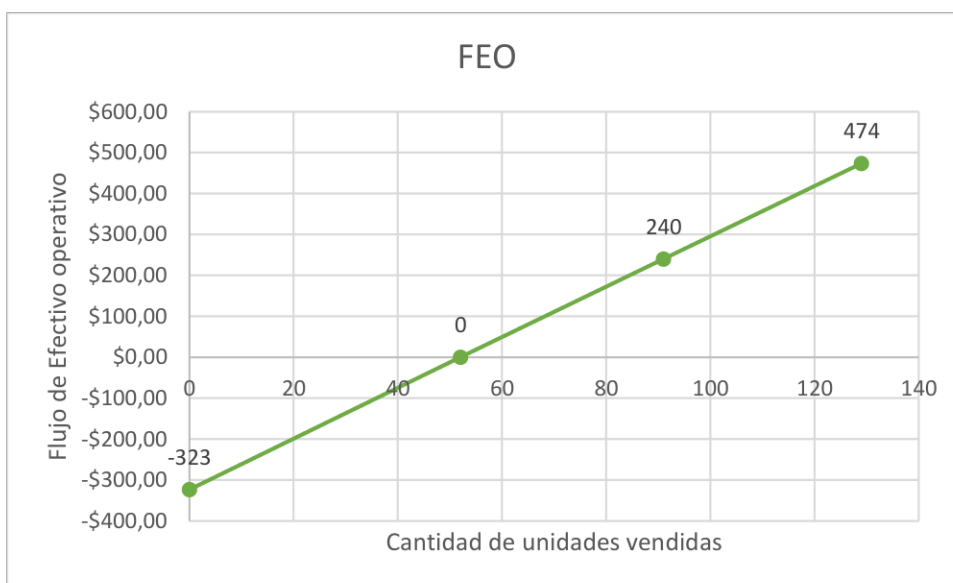


Figura 3.26. Flujo de efectivo operativo.

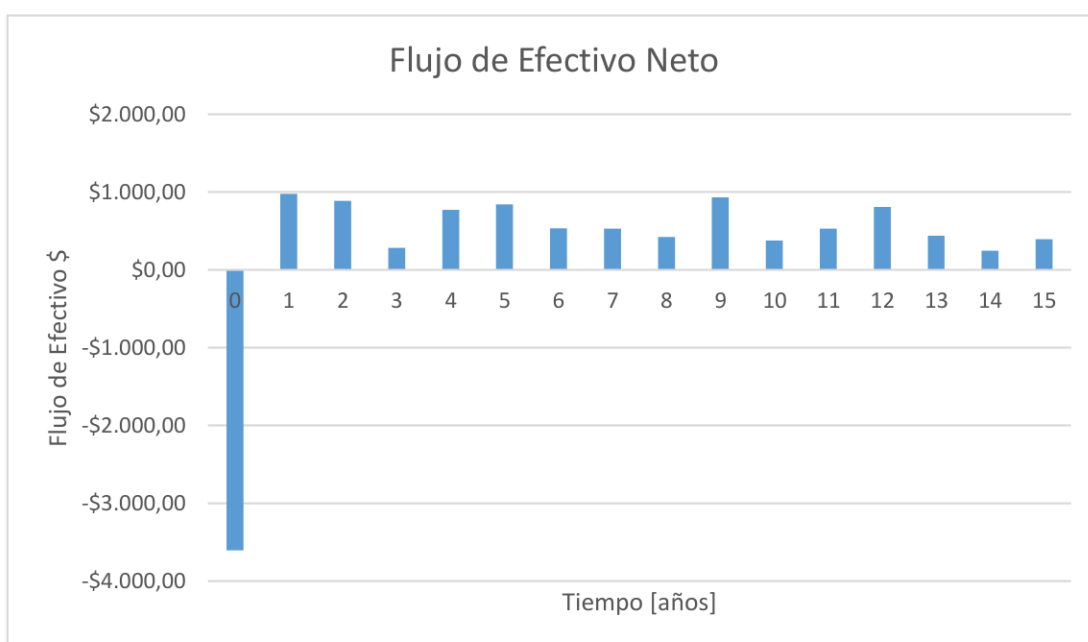


Figura 3.27. Flujo de efectivo neto.

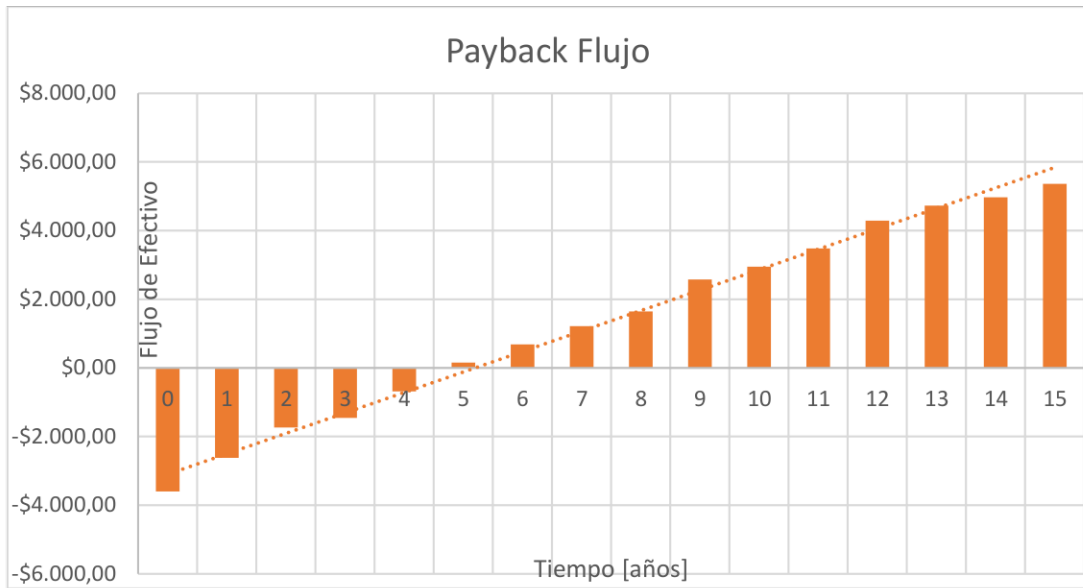


Figura 3.28. Payback.

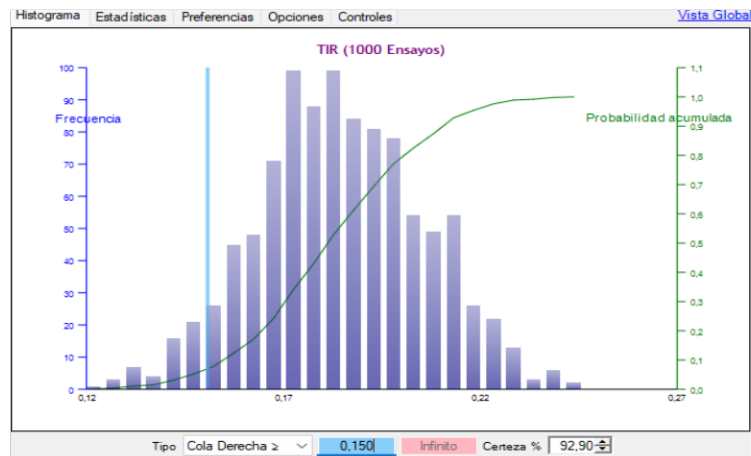


Figura 3.29. Histograma TIR.

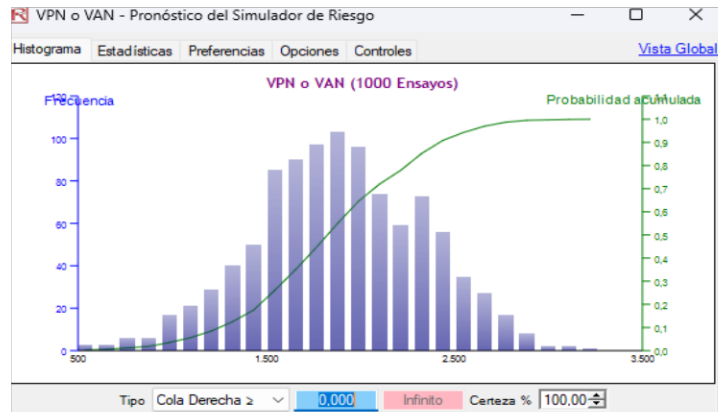


Figura 3.30. Histograma VPN.

Al analizar este caso, se evidencia que sería el más común, dado que la producción de biometano depende de diversas variables. Por lo tanto, una estimación fija no sería apropiada, ya que un mismo producto podría generar más o menos combustible en diferentes ensayos, lo que afectaría la cantidad de cilindros de gas producidos y, por ende, las ventas. Por medio del flujo anual operativo se pudo calcular que el número necesario para que este proyecto llegue al punto de equilibrio efectivo es de una venta mínima de 17 cilindros por mes. Para esta simulación, se utilizaron valores aleatorios de ventas mediante el algoritmo de Montecarlo. Los resultados obtenidos indican que el sistema es viable y cumple con los criterios necesarios para ser considerado una inversión sólida.

3.2 Conclusiones

- Por medio de la investigación realizada se puede concluir que para considerar un buen sustrato a los residuos de vegetales es necesario que estos tengan una correcta composición química, composición de carbono, buena relación C:N y además considerar las estructuras y composiciones de las moléculas de estos desechos donde una concentración mayor de hemicelulosa y celulosa en comparación a la lignina será beneficiosa ya que esta última estructura al ser tan compleja será más resistente que puede dificultar la descomposición de los desechos vegetales.
- En líneas generales, la viabilidad económica del sistema es adecuada, dado que genera beneficios, y según los resultados de las pruebas realizadas, los índices de inversión cumplen con los requisitos para ser considerados favorables, como el TIR mayor al 17% en todos los eventos propuestos indicando que el proyecto generará un rendimiento superior al mínimo aceptable. Sin embargo, el éxito de este tipo de inversiones dependerá principalmente de las unidades vendidas y del precio al que se comercialicen.
- Se concluye que la implementación de este tipo de sistemas tiene un gran beneficio ya que cumple con la meta de autoabastecer un domicilio, realizar una gestión eficiente de residuos y permite generar ingresos económicos mediante la producción de biogás, cabe aclarar que para que esto sea factible es necesario contar con los residuos vegetales indispensables para realizar el proceso de obtención de biogás, por lo que este tipo de implementación se debe llevar a cabo en granjas que tengan un potencial de obtención de residuos vegetales.

- Por medio de las investigaciones y de las pruebas realizadas se concluye que es posible combinar tipos de desechos vegetales para optimizar la calidad del sustrato, sin embargo, se debe tomar en cuenta que también existen factores como el pH y la relación C:N que se alteran por lo que se deben combinar desechos que se complementen de una forma homogénea tomando en cuenta su composición orgánica.
- Se debe desarrollar una guía o manual para abordar la obtención de biogás con fines de generación de energía. Dada la complejidad inherente de este tema, resulta esencial regularizar su práctica, tanto para pequeños como medianos productores. Se sugiere que la agencia de regulación y control de energía o a su vez el ministerio de energía los regule e informe sobre cómo realizar la instalación e estos tipo de sistemas. El objetivo de la propuesta es estimular la adopción de fuentes alternativas de energía y promover el conocimiento de su producción, permitiendo la difusión de este conocimiento en parroquias y localidades de zonas alejadas de la matriz energética tradicional.

3.3 Recomendaciones

- Es recomendable realizar estudios en laboratorios en base de 1kg de desechos del residuo en específico que produzca la granja o una mezcla de estos residuos para hallar constantes de la tasa de crecimiento microbianas más exactas y saber con más precisión que calidad de biogás produce, así como el biometano que se puede obtener de este y el poder calorífico del mismo.
- Se recomienda hacer un estudio de mercadeo en el sector donde se desee implementar este tipo de alternativa renovable para definir el posible alcance de las unidades de cilindros de gas de biometano que se puedan comerciar para saber con exactitud las posibles ganancias de la aplicación de este sistema.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Multiconsult and J. Gonzalez, “Nicaragua Informe Final Mecanismos Financieros - Organización Latinoamericana de Energía,” *Energías Renovables*, pp. 6–9, 2011, Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Energ%C3%ADas_renovables.html?hl=es&id=bl6L8E_9t1kC
- [2] R. Andrés and S. Poma, “Propuesta de generación eléctrica a partir de biomasa en la provincia de Loja - Ecuador.,” Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2019. Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n6965_SalazarPoma
- [3] “Energía - Desarrollo Sostenible.” Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [4] “El acceso universal a la energía sostenible seguirá siendo inalcanzable, a menos que se aborden las desigualdades.” Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2021/06/07/report-universal-access-to-sustainable-energy-will-remain-elusive-without-addressing-inequalities>
- [5] “Energía eléctrica, tecnología y vida cotidiana. La importancia de una adecuada formación - finanzas.com.” Accessed: Jun. 25, 2023. [Online]. Available: https://www.finanzas.com/empresas/energia-electrica-tecnologia-y-vida-cotidiana-la-importancia-de-una-adecuada-formacion_13692197_102.html
- [6] “¿Qué es la transición energética? | Enel Green Power.” Accessed: Jul. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/transicion-energetica>
- [7] M. S. Soria Colina, “Coordinación de protecciones en sistemas de distribución considerando el ingreso de generación distribuida,” Dec. 2015, Accessed: Jun. 25, 2023. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/13601>
- [8] “Generación distribuida: qué es y cómo funciona| Eligenio.” Accessed: Nov. 30, 2023. [Online]. Available: <https://eligenio.com/es/blog/generacion-distribuida-que-es/>
- [9] “Estadísticas del sector eléctrico ecuatoriano buscar – Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables.” Accessed: Nov. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/estadisticas-del-sector-electrico-ecuadoriano-buscar/>
- [10] R. Andrés and S. Poma, “Propuesta de generación eléctrica a partir de biomasa en la provincia de Loja - Ecuador.,” 2019, Accessed: Jun. 25, 2023. [Online]. Available: https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n6965_SalazarPoma
- [11] M. H. Badii, A. Guillen, and J. L. Abreu, “Energías Renovables y Conservación de Energía (Renewable Energies and Energy Conservation),” *Daena: International Journal of Good Conscience*, vol. 11, no. 1, pp. 141–155, 2016.

- [12] P. Rufes Martínez, “Energía solar térmica: técnicas para su aprovechamiento”, Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Energia_Solar_T%C3%A9rmica.html?hl=es&id=fllc3xuVIUYC
- [13] P. Puig, M. Jofra, and D. Electricidad, “Energía Solar Fotovoltaica ENERGÍA SOLAR PARA LA GENERACIÓN.”
- [14] M. A. S. ORTEGA, “PLAN DE GESTIÓN PARA EL PROYECTO PERFORACIÓN DE UN POZO DIRECCIONAL GEOTÉRMICO PARA LA REPOSICIÓN DE VAPOR DE UN CAMPO GEOTÉRMICO,” UNIVERSIDAD PARA LA COOPERACIÓN INTERNACIONAL, 2020.
- [15] J. F. Sanz Osorio, *Energía hidroeléctrica: Serie Energías renovables*, vol. 139. Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2016.
- [16] J. Rodrigo Quintero González and L. Estefanía Quintero González, “Energía mareomotriz: potencial energético y medio ambiente Tidal energy: potential energy and environment,” vol. 18, no. 2, pp. 121–134, Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <http://visual.ly/power-from-tides>
- [17] A. Herguedas, C. Taranco, E. Garcia, and P. Paniagua, “BIOMASA, BIOCMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD,” 2012, Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Ana-De-Lucas/publication/260383181_Biomasa_biocombustibles_y_sostenibilidad/links/54201c510cf241a65a1b01e5/Biomasa-biocombustibles-y-sostenibilidad.pdf
- [18] “Todo sobre la Energia de Biomasa - Energiasae.com.” Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://energiasae.com/biomasa/>
- [19] F. S. Nogués, D. García-Galindo, A. Rezeau, and E. Renovables, “Energía de la biomasa, vol II,” *IPrensas Universitarias de Zaragoza*, vol. 2, 2010, Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Energ%C3%ADa_de_la_Biomasa_volumen_I.html?hl=es&id=P58rcPu5O90C
- [20] “Utilización de residuos para la producción del biogás.” Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <https://medioambienteyprocesosindustriales.com/utilizacion-de-residuos-para-la-produccion-del-biogas/>
- [21] “Producción de biogás a partir de residuos vegetales. I. Características, etapas y limitaciones.” Accessed: Feb. 03, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/236590804_Produccion_de_biogas_a_partir_de_residuos_vegetales_I_Caracteristicas_etapas_y_limitaciones
- [22] S. C. Marín, “Diseño teórico de una planta de producción de biogás a partir de residuos de naranja en la ciudad de Bogotá.” 2022, Accessed: Dec. 20, 2023. [Online]. Available: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8842>
- [23] M. BARAY and V. Collins, “PIROLISIS A BAJA TEMPERATURA DE LA POMASA DE MANZANA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCMBUSTIBLES,” CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, CHIHUAHUA, 2016.

- [24] J. N. Martín, A. Esteves, S. Manrique, M. Av Ruiz Leal, and P. C. General San Martín Mendoza -Argentina, "INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE SÓLIDOS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE GUANO CAPRINO".
- [25] "Determinación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV) en digestión." Accessed: Feb. 04, 2024. [Online]. Available: <https://1library.co/article/determinaci%C3%B3n-s%C3%B3lidos-totales-st-s%C3%B3lidos-vol%C3%A1tiles-sv-digesti%C3%B3n.9ynj9xjz>
- [26] S. Borowski, W. Cieciora-Włoch, P. Boniecki, and A. Bednarek, "Impact of Mineral Fertilizers on Anaerobic Digestion of Vegetable Waste," *Bioenergy Res*, vol. 16, no. 4, pp. 2155–2167, Dec. 2023, doi: 10.1007/S12155-023-10588-5/TABLES/7.
- [27] "Microorganismos degradadores de materia orgánica y sus efectos sobre la calidad del suelo - Mundoagro." Accessed: Feb. 04, 2024. [Online]. Available: <https://mundoagro.cl/microorganismos-degradadores-de-materia-organica-y-sus-efectos-sobre-la-calidad-del-suelo/>
- [28] A. : Torrecilla, D. Rey, A. Tutores, P. Elvira, and S. Isabel, "Potencial de distintos residuos orgánicos para la producción de biogás vía digestión y codigestión anaerobia".
- [29] T. De Jesús and J. Lobo, "Producción y valorización energética de biogás, a partir de residuos alimenticios y biomasa vegetal," 2017.
- [30] "Biodigestor: qué es y cómo funciona - Resumen." Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.ecologiaverde.com/biodigestor-que-es-y-como-funciona-4513.html>
- [31] "¿Qué es un biodigestor y cómo funciona? - Grupo Ihoé." Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://grupoihoé.com/que-es-un-biodigestor-y-como-funciona/>
- [32] M. Varnero, "Manual de biogás," 2011.
- [33] "Biodigestor: qué es y cómo funciona - Resumen." Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.ecologiaverde.com/biodigestor-que-es-y-como-funciona-4513.html>
- [34] "Qué es un biodigestor y cómo funciona el biogás - Fundación Aquae." Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/biodigestor/>
- [35] "CONTROL DE PROCESO EN BIODIGESTORES - Biogas - biodigestores - plantas de biogás." Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.biogas.uno/biodigestores/control-de-proceso/>
- [36] "Control de proceso en biodigestores - Biodigestores - plantas de biogas - generadores - energia." Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.aqualimpia.com/control-biodigestores/>
- [37] A. D. Torres, "EVALUACION DE LOS PARAMETROS CINETICOS DE LA ECUACION DEMONOD".
- [38] B. Elías and V. Niño, "DISEÑO CONCEPTUAL DE UN BIORREACTOR TIPO BATCH PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS Y BIOFERTILIZANTES A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS (URBANOS Y AGRICOLAS)," 2019.

- [39] G. P. Jeppu, J. Janardhan, S. Kaup, A. Janardhanan, S. Mohammed, and S. Acharya, "Effect of feed slurry dilution and total solids on specific biogas production by anaerobic digestion in batch and semi-batch reactors," *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 24, no. 1, pp. 97–110, Jan. 2022, doi: 10.1007/S10163-021-01298-1/TABLES/8.
- [40] M. Ali *et al.*, "Production of Biogas from Food Waste Using the Anaerobic Digestion Process with Biofilm-Based Pretreatment," *Processes* 2023, Vol. 11, Page 655, vol. 11, no. 3, p. 655, Feb. 2023, doi: 10.3390/PR11030655.
- [41] M. Varnero, "Manual de biogás," 2011.
- [42] "Biometano: qué es y cómo se obtiene | Repsol." Accessed: Jan. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/biometano/index.cshtml>
- [43] "Tecnología punta que transforma el biogás en biometano de forma rentable y energéticamente eficiente | UBI Project | Results in brief | H2020 | CORDIS | European Commission." Accessed: Jan. 17, 2024. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/article/id/422513-cutting-edge-technology-upgrades-biogas-to-biomethane-in-a-cost-and-energy-efficient-way/es>
- [44] Viaintermedia.com, "Cómo obtener biometano con métodos biológicos y bajo coste ambiental y económico", Accessed: Jan. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.renewableenergymagazine.com/biogas/como-obtener-biometano-con-metodos-biologicos-y-20171030>
- [45] J. Souza and L. Schaeffer, "SISTEMA DE COMPRESIÓN DE BIOGÁS Y BIOMETANO," *Información tecnológica*, vol. 24, no. 6, pp. 03–08, 2013, doi: 10.4067/S0718-07642013000600002.
- [46] "¿Cuánta presión tienen los cilindros de gas LP? | REGIO GAS." Accessed: Jan. 17, 2024. [Online]. Available: <https://regiogas.com.mx/blog/cuanta-presion-tienen-los-cilindros-de-gas-lp/>
- [47] W. Ross, *Fundamentos de finanzas corporativas*. 2019. Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.itsjapon.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/511/1/Fundamentos%20de%20Finanzas%20Corporativas.pdf>
- [48] "Gráfico del precio de futuros de Gas natural - Investing.com." Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://es.investing.com/commodities/natural-gas-streaming-chart>
- [49] "Planta Generadora De Biogas De Alta Eficiencia,10kva,Conjunto Generador De Basura - Buy Biogas Generator 10kva,Biogas Generator,Electric Generator Biogas Product on Alibaba.com." Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/Biogas-1600212129519.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.1f153fc9pkLVza
- [50] "Detector De Gas 4 En 1,Conducto De Biogás Portátil,Instrumentos De Medición Multi No,Analizador De Gas,Detector De Gas Múltiple Portátil - Buy Portable Multi Gas Detector For O2 Ch4 Co H2s 4 In 1 Gas Detector,China Factories Display Gas

- Battery Portable Monitor,Portable Multi 4 Gas Detector With Air Gas Sampling Pump Cd4 Product on Alibaba.com.” Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/4-1600913412537.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.62bb5e20LVhb0m&s=p
- [51] “Riego Ecuador.” Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.riegoecuador.com/index.php/productos/flujometro>
- [52] “Manómetro De Vacío De Glicerina De Acero Inoxidable Manómetro Frontal Sólido Manómetro - Buy Solid Front Pressure Gauge Manometer,Vacuum Manometer,Glycerine Manometer Product on Alibaba.com.” Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/All-1600984242864.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_price.33a57dc13B0dsS&s=p
- [53] “Filtro Desulfurizador De Biogás De Tamaño Familiar - Buy Biogas Desulfurizer,Household Biogas Desulfurizer,Small Size Biogas Desulfurizer Product on Alibaba.com.” Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Family-size-biogas-desulfurizer-filter-869272463.html>
- [54] “Rfa Equipo De Filtración Industrial Serie De Filtros De Retorno Tipo Mini Montados En Tanque - Buy Industrial Filtration Systems Home Filtration Equipment Used Filtration Devices Farm Filtration Solutions,Hotel Filtration Units Product on Alibaba.com.” Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/RFA-1600982490667.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.5f4959548qhjxU&s=p
- [55] “Agricultura De Alto Impacto 8 10 Pulgadas Pvc Riego De Agua Tubo De Drenaje Longitud Sch 80 Pvc U Precio De Tubería - Buy Thick Wall 350mm 600mm Diameter Plastic Pvc U Pipe 300mm 600mm 800mm 1200mm,16mm 25mm 28mm 32mm 80mm 55mm Small Diameter U Pvc Tube Pipe Brand Names Price Per Foot,Astm 65mm Pvc Plastic Pipe Diameter 75mm 110mm 140mm 2inch 5 Inch Price List Upvc Water Tube Pipe Product on Alibaba.com.” Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/Agriculture-1600663354588.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.2ec218468iwryK&s=p
- [56] “Eléctrica Nueva Calidad Superior Pistón 7.5kw Compresor De Aire Para Biogás - Buy Electric 7.5kw Air Compressor,Piston 7.5kw Air Compressor,Air Compressor For Biogas Product on Alibaba.com.” Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/New-60758212801.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.7710499bFc4Q21
- [57] “Manguera De Gas Natural De Alta Presión,Material De Nylon,Cng - Buy Natural Gas Hose,Braided Of Fiber,High Pressure Hose Product on Alibaba.com.” Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/CNG-60725436510.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.37ac2787XI5DrU

- [58] “15kg 35.5l Tanque De Gas De Glp - Buy Lpg Cylinder For Household,Lpg Gas Filling Plant,Gas Lpg Storage Tank Product on Alibaba.com.” Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/15KG-60045227948.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_price.3e5f62ffpGDnN5
- [59] “Biometano ¿el futuro de la energía limpia? | MAPFRE.” Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.mapfre.com/actualidad/sostenibilidad/biometano-futuro-energia-limpia/>
- [60] E. Sánchez Nocete, “Análisis del potencial de obtención de biometano en España y evaluación del impacto ambiental asociado a su proceso de producción,” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2021. Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0002-3896-621X>
- [61] A. Internacional de Energías Renovables, “Costos de generación de energía renovable en 2020: Resumen ejecutivo”.

5 ANEXOS

ANEXO I. Script de estimación de Biometano

ANEXO II. Diagrama de bloques modelo de Monod

ANEXO III. Diagrama de flujo obtención de biometano

ANEXO IV. Análisis de Proyección a 20 años antes de ajuste de precio

ANEXO V. Análisis de Proyección a 20 años después de ajuste de precio

ANEXO VI. Análisis de Proyección a 15 años

ANEXO I. Script de estimación de Biometano

```
%% Trabajo de Integración Curricular
% Escuela Politécnica Nacional
% Facultad Ingeniería Eléctrica y Electrónica
% Script que simula el comportamiento de un biodigestor
% Realizado por Juan Carlos Santana Ramírez

%% 1. Comandos de Limpieza
clear all
clc
close all

%% 2.Ingreso de Datos

% Parámetros de la cinética de la biodigestión
global umax Ks Ypx Yxs VolumenFinal d_biogas d_biometano
umax = 0.3; % Tasa máxima de crecimiento (1/día)
Ks = 2; % Constante de sustrato medio (g/L)
Ypx = 0.5; % Rendimiento del producto basado en el crecimiento celular
Yxs = 0.15; %Rendimiento de biomasa basado en el consumo de sustrato
Co=[0.05 0 89.3];%Condiciones iniciales Xo, Po, So
intervalo=(0:0.001:150);
tolerancia=1e-11;
n=0.42; % rendimiento L/kgSV
d_biogas = 1.2; % 1.2 densidad del biogas a 1 atm y 25° C
d_biometano = 0.717; % 0.717 densidad del biometano a 1 atm y 25° C
aux1 = 0; % variable auxiliar

%Parametros del Biodigestor
VolumenInicial = 10; % Volumen inicial del biodigestor (litros)
VolumenFinal = 2000; % Volumen final del biodigestor (litros)

%% 3.Resolucion de ecuacion diferencial
[t,Y]=ode45(@biodig,intervalo,Co);
biometano =Y(:,2)*n/d_biometano;
biogas =Y(:,1)*n/d_biogas;

%% 4. Impresion de Resultados
% Verificar si se alcanzó el volumen final del biodigestor
for i = 1:length(intervalo)
    if Y(i,3) <= 0
        fprintf('El sustrato se ha agotado.\n');
        break;
    end
end
% Devuelve el valor exacto de biogás, biometano y THR con una tolerancia
for i = 1:length(intervalo)
    var1 = abs(biogas(i)-aux1);
    if var1 <= tolerancia
        fprintf('Biogas producido [m3]: %f\n', biogas(i));
        fprintf('Biometano producido [m3]: %f\n', biometano(i));
        fprintf('Tiempo estimado de disgestion [dias]: %.2f\n', intervalo(i));
        break;
    end
    aux1 = biogas(i);
end
```

```

%% 5.Graficos
%Grafico 1: En funcion de sus concentraciones
figure (1)
plot (t,Y(:,1),'c',t,Y(:,2),'m',t,Y(:,3),'b','LineWidth',2)
xlabel('Tiempo (dias)');
ylabel('gramos/L');
title('Producción de biomasa en el biodigestor');
hold on
xline(intervalo(i), 'b', 'LineWidth', 0.8)
grid on
legend('X(biomasa)','P(producto)','S(sustrato)','THR')
axis([0, ceil(2*intervalo(i)), 0 , 1.15*Co(3)])

%Grafico 2: Volumenes de gas en litros
figure (2)
subplot(2,1,1)
plot(t,biogas*1000,'--g','LineWidth',2)
xlabel('Tiempo (dias)');
ylabel('Litros');
title('Biogas Producido');
hold on
xline(intervalo(i), 'b', 'LineWidth', 0.8)
grid on
axis([0, ceil(2*intervalo(i)), 0 , 1.15*biogas(i)*1000])

subplot(2,1,2)
plot(t,biometano*1000,'r','LineWidth',2)
xlabel('Tiempo (dias)');
ylabel('Litros');
title('Biometano producido');
hold on
xline(intervalo(i), 'b', 'LineWidth', 0.8)
grid on
axis([0, ceil(2*intervalo(i)), 0 , 1.15*biometano(i)*1000])

%Grafico 3: Volumenes de gas en m3
figure (3)
subplot(2,1,1)
plot(t,biogas,'--b','LineWidth',2)
xlabel('Tiempo (dias)');
ylabel('metros cubicos');
title('Biogas Producido');
grid on
hold on
xline(intervalo(i), 'b', 'LineWidth', 0.8)
axis([0, ceil(2*intervalo(i)), 0 , 1.15*biogas(i)])

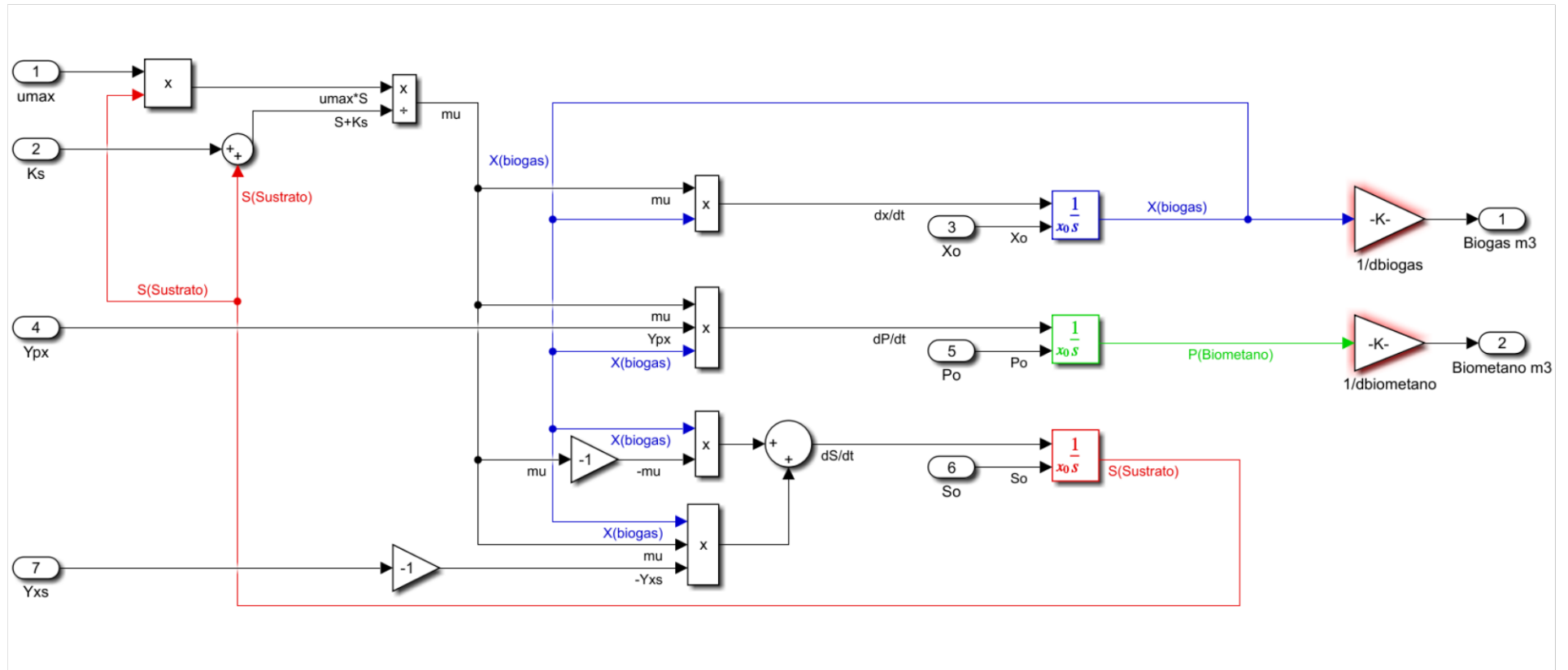
subplot(2,1,2)
plot(t,biometano,'k','LineWidth',2)
xlabel('Tiempo (dias)');
ylabel('metros cubicos');
title('Biometano producido');
grid on
hold on
xline(intervalo(i), 'b', 'LineWidth', 0.8)
axis([0, ceil(2*intervalo(i)), 0 , 1.15*biometano(i)])

%Grafico 4: Volumenes de gas en m3 en un solo grafico

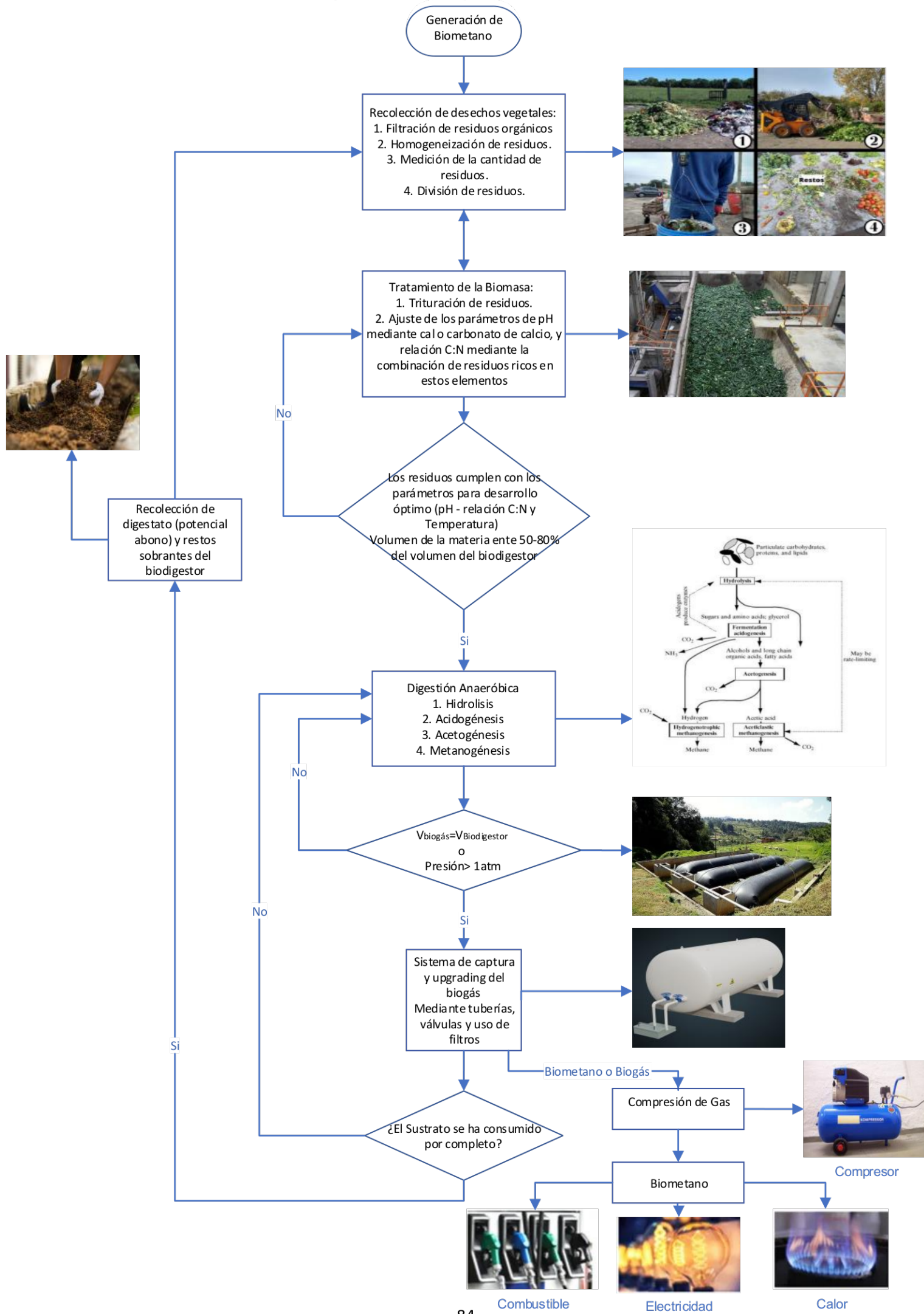
```

```
figure (4)
plot (t,biogas,t,biometano,'LineWidth',2)
xlabel('Tiempo (días)');
ylabel('metros cúbicos');
title('Producción Biometano y biogas');
grid on
hold on
xline(intervalo(i), 'b', 'LineWidth', 0.8)
legend('Biogas','Biometano','THR')
axis([0, ceil(2*intervalo(i)), 0 , 1.15*biogas(i)])
```

ANEXO II. Diagrama de bloques modelo de Monod



ANEXO III. Diagrama de flujo obtención de biometano



ANEXO IV. Análisis de Proyección a 20 años antes de ajuste de precio

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Inversión	\$-3,603																					
Ingresos por Ventas (+)		\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00	\$1.254,00
Costos variables (-)		\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00
Costos fijos (-)		\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00
Depreciación (-)		\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180
UAI		\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84
Intereses (-)		\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
UAI		\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84	\$859,84
Impuestos (-)		\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18	\$-103,18
Utilidad neta		\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66	\$756,66

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FLUJO OPERATIVO ANUAL	\$-3.603	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82	\$936,82
Valor presente	\$-3.603,29	\$814,63	\$708,37	\$615,97	\$535,63	\$465,76	\$405,01	\$352,19	\$306,25	\$266,30	\$231,57	\$201,36	\$175,10	\$152,26	\$132,40	\$115,13	\$100,11	\$87,05	\$75,70	\$65,83	\$57,24

ANEXO V. Análisis de Proyección a 20 años después de ajuste de precio

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Inversión	\$-3.603																					
Ingresos por Ventas (+)		\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56	\$916,56
Costos variables (-)		\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00	\$-114,00
Costos fijos (-)		\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00	\$-100,00
Depreciación (-)		\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180	\$-180
UAII		\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40
Intereses (-)		\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
UAI		\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40	\$522,40
Impuestos (-)		\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69	\$-62,69
Utilidad neta		\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71	\$459,71

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FLUJO OPERATIVO ANUAL	\$-3.603	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87	\$639,87
Valor presente	\$-3.603,29	\$556,41	\$483,84	\$420,73	\$365,85	\$318,13	\$276,63	\$240,55	\$209,18	\$181,89	\$158,17	\$137,54	\$119,60	\$104,00	\$90,43	\$78,64	\$68,38	\$59,46	\$51,70	\$44,96	\$39,10

ANEXO VI. Análisis de Proyección a 15 años

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ventas anuales		211	196	98	177	189	139	139	121	204	113	138	184	123	92	117
Inversión	\$-3.603															
Ingresos por Ventas (+)		\$1.584,23	\$1.471,97	\$737,57	\$1.330,78	\$1.416,97	\$1.042,82	\$1.038,96	\$909,63	\$1.530,66	\$850,55	\$1.037,43	\$1.378,01	\$925,52	\$690,82	\$873,78
Costos variables (-)		\$-105,62	\$-98,13	\$-49,17	\$-88,72	\$-94,46	\$-69,52	\$-69,26	\$-60,64	\$-102,04	\$-56,70	\$-69,16	\$-91,87	\$-61,70	\$-46,05	\$-58,25
Costos fijos (-)		\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00	\$-50,00
Depreciación (-)		\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240	\$-240
UAII		\$1.188,40	\$1.083,62	\$398,18	\$951,84	\$1.032,29	\$683,08	\$679,48	\$558,77	\$1.138,40	\$503,62	\$678,05	\$995,92	\$573,60	\$354,55	\$525,31
Intereses (-)		\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350	\$-350
UAI		\$838,40	\$733,62	\$48,18	\$601,84	\$682,29	\$333,08	\$329,48	\$208,77	\$788,40	\$153,62	\$328,05	\$645,92	\$223,60	\$4,55	\$175,31
Impuestos (-)		\$-100,61	\$-88,03	\$-5,78	\$-72,22	\$-81,87	\$-39,97	\$-39,54	\$-25,05	\$-94,61	\$-18,43	\$-39,37	\$-77,51	\$-26,83	\$-0,55	\$-21,04
Utilidad neta		\$737,79	\$645,58	\$42,40	\$529,62	\$600,41	\$293,11	\$289,94	\$183,72	\$693,79	\$135,19	\$288,68	\$568,41	\$196,77	\$4,00	\$154,28

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
FLUJO OPERATIVO ANUAL	\$-3.603	\$978,01	\$885,80	\$282,62	\$769,84	\$840,63	\$533,33	\$530,16	\$423,94	\$934,01	\$375,41	\$528,90	\$808,63	\$436,99	\$244,22	\$394,49
Valor presente	\$-3.603,29	\$889,10	\$732,07	\$212,34	\$525,81	\$521,97	\$301,05	\$272,05	\$197,77	\$396,11	\$144,74	\$185,38	\$257,65	\$126,58	\$64,31	\$94,44