



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Planta de Biogás: Construcción y producción a partir de
desechos de animales y cultivos por digestión anaeróbica

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: MazeH Dehaini, Hussein

Tutor/a: Ruiz Rosales, Santiago

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Planta de Biogás: Construcción y producción a partir de desechos de animales y cultivos
por digestión anaeróbica**

Autor

Hussein Mazeh Dehaini

Tutor

Santiago Ruiz Rosales

Junio 2022

Resumen :

Ante la crisis energética y el cambio climático el mundo necesita diversificar y buscar nuevas fuentes de energía verde, más eficientes y neutras en carbono que sustituyan a los combustibles fósiles tradicionales.

El biogás, formado por la digestión anaeróbica de materiales orgánicos, hace posible una alternativa de energía sostenible, fiable y renovable.

La producción de biogás a partir de los desechos de animales y de los desechos industriales del procesamiento de alimentos tiene un gran potencial, no sólo porque los propios desechos pueden ser tratados para minimizar el impacto ambiental, sino también porque el biocombustible (metano), es prometedor para el futuro.

Este trabajo se ha estructurado en seis capítulos relacionados con la producción de biogás a partir de residuos animales y residuos industriales de la industria alimentaria tal como se expone a continuación:

- 1- Descripción exhaustiva de una planta de biogás, centrada en su funcionamiento y su impacto en el medio ambiente.
- 2- Especificaciones físico-químicas y técnicas de los residuos y su potencial en la producción de energía.
- 3- Construcción de una minicentral de biogás (**15 kW**) basada en la biomasa obtenida a partir del procesado de los desechos de animales y los cultivos (remolacha y tallos de maíz).
- 4- Listado de maquinaria y útiles utilizados, así como datos técnicos y financieros relativos a los costes, la rentabilidad, la productividad y la eficiencia.
- 5- Postratamiento del biogás producido.
- 6- Mantenimiento necesario para una óptima funcionalidad de la planta.

Este proyecto es un estudio exhaustivo y completo sobre el diseño de una planta de biogás en lo que respecta a su construcción, producción y mantenimiento.

Abstract:

Facing energy crisis and climate change, the world is in need of a green, efficient, carbon-neutral energy source to replace fossil fuels. Biogas, formed by anaerobic digestion of organic materials, makes sustainable, reliable, renewable energy possible.

There is potential for biogas production from both animals' wastes and food processing industrial wastes, not only because the wastes themselves can be treated to minimize the environmental impact, but it's also known as biofuel, methane, holds promise for the future.

On this background, six topics regarding biogas production from animals' wastes and food processing industrial wastes were identified:

- 1- A thorough description about a Biogas Plant regarding how it works and its impacts on the environment.
- 2- Chemical and technical specifications of wastes and their potential in the production of energy.
- 3- Construction of mini-Biogas plant (**15 KW**) that is mainly based on Biomass such as animals' wastes and crops (sugar beets and corn stems).
- 4- List of machines used and technical and financial data regarding costs, profitability, productivity, and efficiency.
- 5- Post-treatment of the biogas produced.
- 6- Maintenance required for an optimum functionality of the plant.

This project acts as a thorough and a full study about a Biogas plant concerning its construction, production, and maintenance.

Resum :

Davant la crisi energètica i el canvi climàtic, el món necessita una Font d'energia verda, eficient i neutra en carboni que substitueixi els combustibles fòssils. El biogàs, format per la digestió anaeròbica de materials orgànics, fa possible una energia sostenible, fiable i renovable.

La producció de biogàs a partir de les deixalles dels animals i de les deixalles industrials del processament d'aliments té un gran potencial, no només perquè les mateixes deixalles poden ser tractades per minimitzar l'impacte ambiental, sinó també perquè el biocombustible, el metà, és prometedor per al futur.

En aquest treball, s'han identificat sis temes relacionats amb la producció de biogàs a partir de residus animals i residus industrials de la indústria alimentària:

- 1- Una descripció exhaustiva d'una planta de biogàs sobre el funcionament i l'impacte que tenen en el medi ambient.
- 2- Especificacions químiques i tècniques dels residus i el potencial en la producció d'energia.
- 3- Construcció d'una minicentral de biogàs (**15 KW**) que es basa principalment en la biomassa, com les deixalles d'animals i els cultius (remolatxa i tiges de blat de moro).
- 4- Llista de màquines utilitzades i dades tècniques i financeres relatives als costos, la rendibilitat, la productivitat i l'eficiència.
- 5- Post-tractament del biogàs produït.
- 6- Manteniment necessari per a una òptima funcionalitat de la planta.

Aquest projecte és un estudi exhaustiu i complet sobre una planta de biogàs pel que fa a la seva construcció, producció i manteniment.

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a Dios todopoderoso por darme fuerza y conocimiento para completar este proyecto y llegar a esta etapa de mi vida.

También me gustaría dar las gracias especialmente a mi familia por su apoyo continuo.

Por último, pero no menos importante, me gustaría dar mi más sincero agradecimiento a mi asesor, el profesor Santiago Ruiz, que ha hecho posible este trabajo. Su orientación y sus consejos me llevaron a lo largo de todas las etapas de la redacción de mi proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
Resum	4
AGRADECIMIENTOS	6
ÍNDICE DE CONTENIDO	8
NOMENCLATURA	9
1.0 Introducción	10
2.0 Objetivos	11
3.0 Biogás: Definición e Historia	12
Ventajas e inconvenientes	16
Digestión anaerobia: Definición y procedimiento	19
4.0 Diferencia entre autogeneración y cogeneración	28
5.0 Caso de estudio: Barich Biogas Plant	30
6.0 Unidad de Postratamiento	46
7.0 Unidad de cogeneración	50
8.0 Cuba de cuajar queso	52
9.0 Generación de electricidad	56
10.0 Estudio económico	58
11.0 Restricciones	64
12.0 Mejoras del proceso	65
13.0 Bibliografía	66

Nomenclatura :

- CO₂: Dióxido de Carbono
- GEI. Gases de Efecto Invernadero
- GLP: Gases Licuados del Petróleo
- CH₄: Metano
- PCI: Poder Calorífico Inferior (kWh/kg)
- L: Litro
- O₂: Oxígeno
- TRH: Tiempo de Retención Hidráulico
- COV: Carga Orgánica Volumétrica
- MS: Masa Seca
- MV: Masa Volátil
- REE: Rendimiento Eléctrico Equivalente
- MPC: Materia Prima para Carga (m³ /día)
- U: Coeficiente Global de Transferencia de Calor (W/m²K)
- Q: Pérdidas de Calor (W)
- K: Coeficiente de Conductividad Térmica (W/m·K)
- m: flujo másico (kg/tiempo)
- Cp: Calor Específico (J/kg·K)
- IVA: Impuesto sobre el Valor Añadido
- AGV: Ácidos grasos volátiles
- OLR: Tasa de carga orgánica

1.0 Introducción

1- Motivación y formulación del problema

En las últimas décadas, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en todo el mundo se ha convertido en una gran preocupación. Con el crecimiento de la población mundial y el aumento del consumo de energía combinado con una mayor probabilidad de vida suponen un enorme desafío para limitar e incluso minimizar las emisiones de especies contaminantes y de gases de efecto invernadero. Además, los combustibles fósiles disponibles son limitados; en consecuencia, con el aumento de los precios se necesitan fuentes de energía alternativas que sustituyan a los combustibles fósiles tradicionales.

La motivación de este proyecto es contribuir a mejorar lo expuesto anteriormente, además de usar la energía eléctrica generada en la producción de productos lácteos.

Con este proyecto se busca minimizar el impacto ambiental de una explotación ganadera mediante la implantación de una planta de biogás. De esta forma se pretende disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, además de gestionar los residuos del ganado. Por otra parte, se reducirán a largo plazo los costes energéticos de la misma mediante el autoconsumo de la energía producida, maximizando así los beneficios.



Fig 1.1: La transición de la energía limitada a la energía verde.

2.0 Objetivos

El presente proyecto tiene como objetivos principales diseñar y dimensionar una planta de biogás en una explotación ganadera que permita reducir los costes energéticos y el impacto ambiental de la misma. Para ello se propondrá un caso concreto de estudio mediante el cual se analizará su viabilidad económica.

3.0 Biogás

3.1. Definición

El biogás es un gas combustible producto de la digestión anaerobia de materia orgánica, denominada biomasa, mediante la acción de microorganismos. Se produce de forma espontánea en la naturaleza, como por ejemplo mediante la degradación de residuos vegetales en los pantanos, y por este motivo se ha denominado durante mucho tiempo el “gas de los pantanos”.

La principal diferencia entre el biogás y otros combustibles fósiles, como pueden ser el gas natural o los gases licuados del petróleo (GLP), es su origen. El biogás se obtiene mediante un proceso natural de descomposición de materia orgánica (metabolismo anaerobio con metanogénesis), mientras que los gases combustibles como el gas natural o los GLP son de origen fósil. Esto es, los combustibles fósiles provienen de la energía almacenada durante millones de años en los restos fósiles enterrados, su formación es mucho más lenta que la descomposición de la materia orgánica actual que da lugar al biogás.

Al diferenciar el origen de ambas fuentes de energía, surge la pregunta de por qué el biogás es considerado como una fuente de energía renovable, si ambas provienen de la descomposición de materia orgánica.

El motivo es la existencia de un balance neto de emisiones de CO_2 en el proceso de generación de biogás, esto es: el CO_2 emitido en la combustión del biogás se compensa con el CO_2 necesario para la producción de la materia orgánica o biomasa.

En el caso de este proyecto, la materia orgánica utilizada para la producción de biogás son los excrementos del ganado bovino, pero cabe destacar que para obtener estos excrementos, el ganado ha ingerido pasto, y que a su vez, para producirse, ha consumido el CO_2 en la fotosíntesis, además del fertilizante también obtenido de la digestión anaerobia.

La figura 2.1 ilustra el ciclo comentado en la figura 1.1

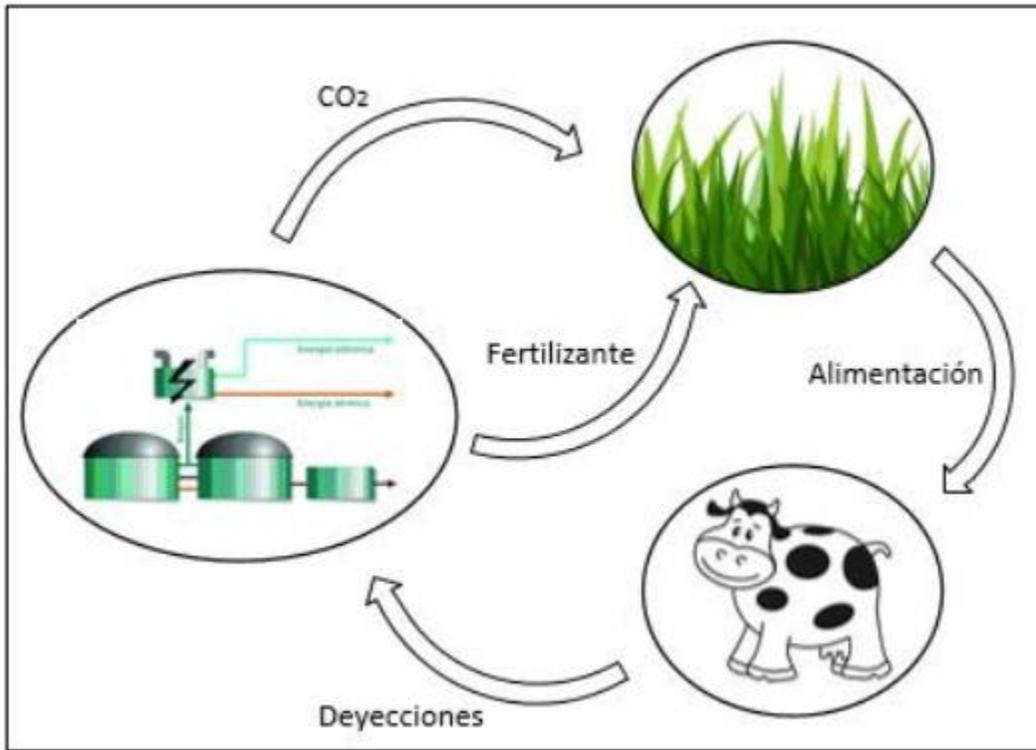


Figura 2.1: Diagrama del ciclo del CO₂ en la producción de biogás.

3.2 Breve historia cronológica del biogás

La primera persona que observó que la vegetación en descomposición producía un gas combustible fue Alessandro Volta, que en 1776 observó cómo salían más burbujas cuando removía el sedimento del fondo que contenía más materia vegetal. [1]

En 1806 William Henry demostró que el gas de Volta era idéntico al gas metano. Humphrey Devy, a principios del siglo XIX, observó que el metano estaba presente en los montones de estiércol de las granjas.

En 1868 Bechamp demostró que el estiércol se formaba a partir de compuestos de carbono por la acción de microorganismos. Tappeiner, en 1882, demostró de forma concluyente que el metano era de origen microbiológico.

La primera planta de producción de metano se instaló en el asilo de leprosos de Ackworth, en Mathunga (India), en 1900. En 1914 se instaló otra planta en Indonesia, que utilizaba residuos de cartón de paja como fuente de gas.

Un prototipo de planta de biogás se desarrolló por primera vez de forma experimental en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial, cuando había escasez de combustible. El interés por el biogás alcanzó su punto álgido al comienzo de la Segunda Guerra Mundial.

En 1940, científicos franceses que trabajaban en el norte de África desarrollaron la tecnología de producción de biogás a partir de residuos agrícolas y se informó de que en 1950 había unas 1.000 plantas de biogás en funcionamiento en Francia y el norte de África.

Alemania se vio obligada a desarrollar nuevos recursos energéticos durante la guerra. Según se informa, 90.000 vehículos fueron convertidos para funcionar con gas metano con el fin de ahorrar combustible de petróleo.

Por cada 1.000 kg de arroz que se muele, se producen 182 kg de cáscara. Los ingenieros chinos han desarrollado una forma de convertir este abundante subproducto en gas que puede utilizarse como sustituto del gasóleo. Una planta piloto construida en China utiliza hasta 7 Tm de cáscara al día y hace funcionar un generador de 140 kW para suministrar energía a una fábrica local.

Se puede afirmar que el coste de la electricidad producida es un 60% inferior a la generada con gasóleo. Además, esta operación permite eliminar un residuo problemático prácticamente sin contaminar, a diferencia de la técnica habitual de quemar la cáscara.

Las fuentes de energía no convencionales, como los desechos ganaderos y los residuos agrícolas, atrajeron la atención de los países desarrollados y subdesarrollados debido a la fuerte subida de los precios de los combustibles convencionales de origen fósil durante la década de 1970 (primera crisis energética mundial).

En India, el 80% de la población vive en pueblos y quema casi el 50% de los residuos ganaderos (estiércol) para cocinar. El gobierno de India ha puesto en marcha un programa para la construcción de plantas de biogás comunitarias en los pueblos, con el fin de suministrar combustible limpio y salvar de la quema la rica fuente de nutrientes de los cultivos. [2]

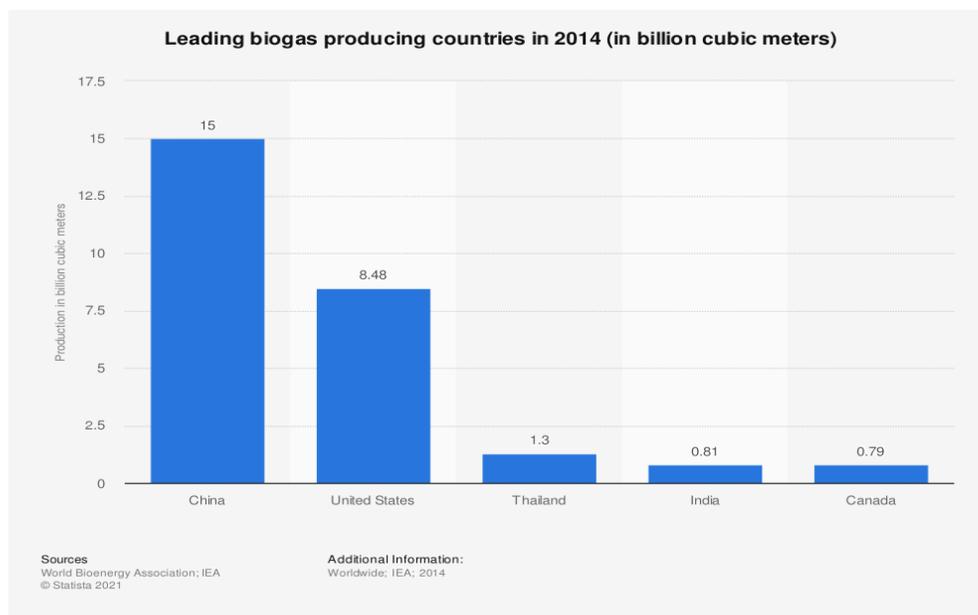


Fig 3.1: Los principales países productores de biogás.

3.3 Ventajas y desventajas del sistema de biogás

3.3.1 Ventajas

- **Motivo 1: El biogás es ecológico**

- 1- El biogás es una fuente de energía renovable y limpia. El gas generado a través de la biodigestión no es contaminante; de hecho se ha comprobado que reduce las emisiones de efecto invernadero.
- 2- No hay combustión en el proceso, lo que significa que hay cero emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera; por lo tanto, utilizar el gas de los residuos como forma de energía es realmente una gran manera de combatir el calentamiento global.
- 3- No es de extrañar que la preocupación por el medio ambiente sea una de las principales razones por las que se ha extendido el uso del biogás. Las plantas de biogás frenan considerablemente el efecto invernadero: las plantas reducen las emisiones de metano al capturar este gas nocivo y utilizarlo como combustible.
- 4- La generación de biogás ayuda a reducir la dependencia del uso de combustibles fósiles, como el petróleo y el carbón.
- 5- Otra ventaja del biogás es que, a diferencia de otros tipos de EERR, el proceso es natural y no requiere energía para el proceso de generación. Además, las materias primas utilizadas en la producción de biogás son renovables, ya que los árboles y los cultivos siguen creciendo. El estiércol, los restos de comida y los residuos de las cosechas son materias primas que siempre estarán disponibles, lo que lo convierte en una opción altamente sostenible.

- **Motivo 2: La generación de biogás reduce la contaminación del suelo y del agua**

- 1- Los vertederos desbordados no sólo propagan los malos olores (contaminación química atmosférica), sino que también permiten el vertido de líquidos tóxicos en las fuentes de agua subterráneas (contaminación química terrestre). De este modo, otra ventaja del biogás es que la generación de biogás puede mejorar la calidad del agua.
- 2- Además, la digestión anaeróbica desactiva los agentes patógenos y los parásitos, por lo que también es bastante eficaz para reducir la incidencia de las enfermedades transmitidas por el agua.

3- Del mismo modo, la recogida y gestión de residuos mejora significativamente en las zonas con plantas de biogás. Esto, a su vez, conduce a mejoras en el medio ambiente, el saneamiento y la higiene.

- **Motivo 3: La generación de biogás produce abono orgánico**

El subproducto del proceso de generación de biogás son los residuos orgánicos enriquecidos (digestato), que son un complemento perfecto o un sustituto de los fertilizantes químicos.

La descarga de fertilizante del digestor puede acelerar el crecimiento de las plantas y su resistencia a las enfermedades, mientras que los fertilizantes comerciales contienen productos químicos que tienen efectos tóxicos y pueden causar intoxicación alimentaria, entre otras cosas.

- **Motivo 4: Es una tecnología sencilla y de bajo coste que fomenta la economía circular**

1- La tecnología utilizada para producir biogás es bastante barata. Es fácil de instalar y necesita una pequeña inversión cuando se hace a pequeña escala. Se pueden utilizar pequeños biodigestores en casa utilizando los residuos de la cocina y el estiércol de los animales.

2- Un sistema doméstico se amortiza al cabo de poco tiempo, y los materiales utilizados para su generación son totalmente gratuitos.

3- El gas manifestado puede utilizarse directamente para cocinar y generar electricidad. Esto es lo que permite que el coste de la producción de biogás sea relativamente bajo.

4- Las granjas pueden aprovechar las plantas de biogás y los productos de desecho que produce su ganado cada día. Los productos de desecho de una vaca pueden proporcionar suficiente energía para alimentar una bombilla durante todo un día.

5- En las grandes plantas, el biogás también puede comprimirse hasta alcanzar la calidad del gas natural y utilizarse para alimentar automóviles. La construcción de estas plantas requiere una inversión de capital relativamente baja a nivel gubernamental y crea empleos verdes.

3.3.2 Desventajas

- **Pocos avances tecnológicos**

Una desafortunada desventaja del biogás en la actualidad es que los sistemas utilizados en la producción de biogás no son eficientes. Todavía no hay nuevas tecnologías que simplifiquen el proceso y lo hagan abundante y de bajo coste. Esto significa que la producción a gran escala para abastecer a una gran población todavía no es posible. Aunque las plantas más grandes disponibles hoy en día son capaces de satisfacer algunas necesidades energéticas, muchos gobiernos no están dispuestos a invertir en el sector.

- **Contiene impurezas**

Tras el refinamiento y la compresión, el biogás sigue conteniendo impurezas. Si el biocombustible generado se utilizara para alimentar automóviles, podría corroer las partes metálicas del motor, lo que provocaría un aumento de los costes de mantenimiento. La mezcla gaseosa es mucho más adecuada para cocinas, calderas de agua y lámparas.

- **Efecto de la temperatura en la producción de biogás**

Al igual que otras fuentes de EERR, la generación de biogás también se ve afectada por el clima. La temperatura óptima que necesitan las bacterias para digerir los residuos es de unos 37 °C. En climas fríos, los digestores necesitan energía térmica para mantener un suministro constante de biogás.

- **Menos adecuado para áreas metropolitanas densas**

Otra desventaja del biogás es que las plantas industriales de biogás sólo tienen sentido cuando las materias primas son abundantes (residuos alimentarios y estiércol). Por este motivo, la generación de biogás es mucho más adecuada para las zonas rurales y suburbanas.

3.4 Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica (DA) es la degradación de materiales orgánicos por parte de microorganismos en ausencia de oxígeno. Se trata de un proceso biológico de varios pasos en el que el carbono orgánico se convierte principalmente en dióxido de carbono y metano [3]. El proceso puede dividirse en cuatro pasos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. A continuación, se describen los pasos de forma más exhaustiva.

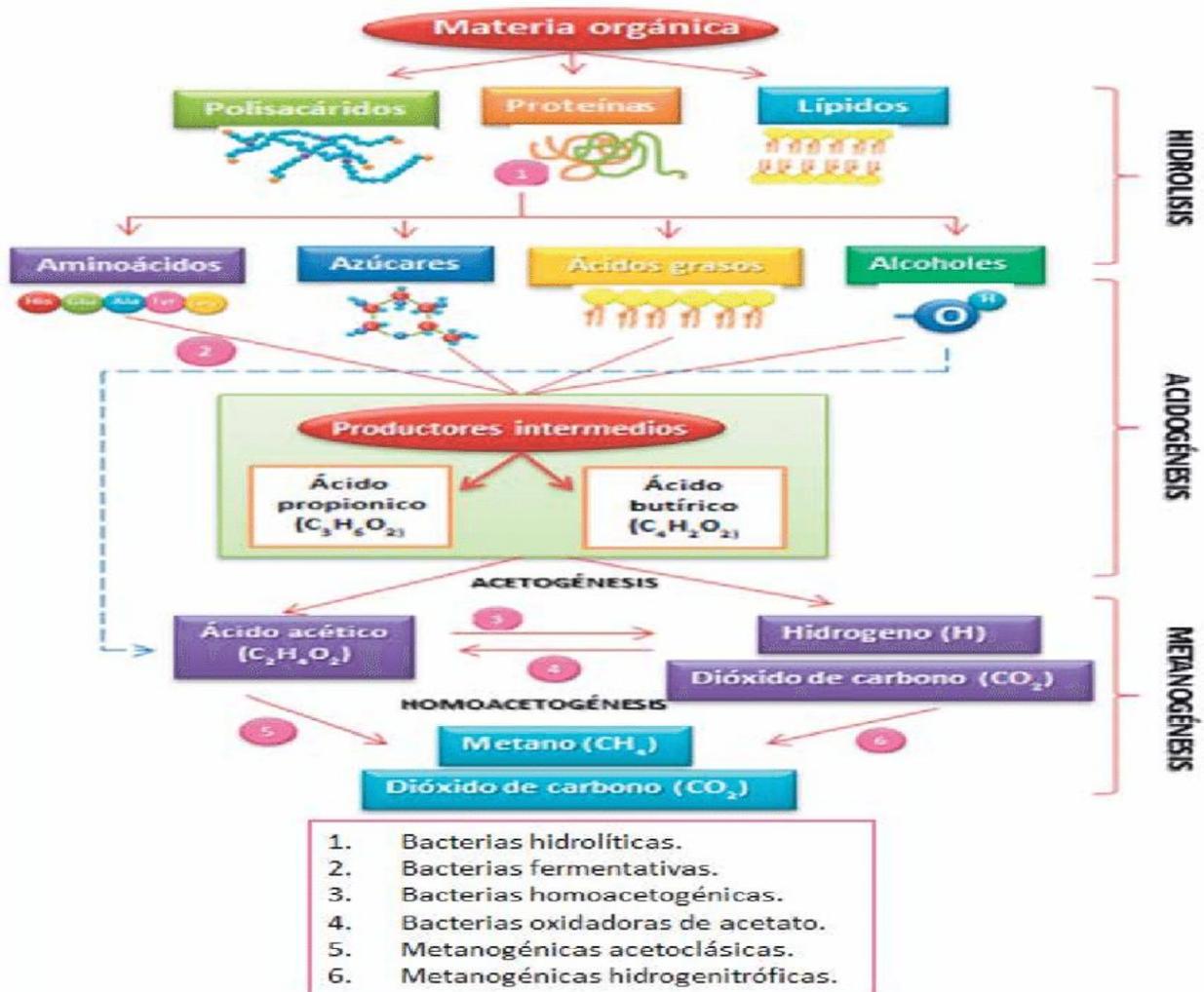


Fig 4.1: proceso de la digestión anaeróbica.

3.4.1 Hidrólisis

La hidrólisis es el primer paso en los procesos de digestión anaeróbica. Durante esta etapa, las materias orgánicas complejas, como los hidratos de carbono, las proteínas y los lípidos, se hidrolizan en moléculas orgánicas solubles, como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, mediante enzimas extracelulares, es decir, celulasa, amilasa, proteasa o lipasa [4]. Las bacterias hidrolíticas, que hidrolizan el sustrato con estas enzimas extracelulares, son anaerobios facultativos.

Cuando el sustrato se hidroliza, queda disponible para el transporte celular y puede ser degradado por las bacterias fermentadoras en el siguiente paso de acidogénesis.

3.4.2 Acidogénesis

En el paso de acidogénesis, las moléculas orgánicas solubles procedentes de la hidrólisis son utilizadas por bacterias fermentativas u oxidantes anaeróbicas [5]. Estos microorganismos son tanto anaerobios obligados como facultativos.

En un digester anaerobio estable, la principal vía de degradación da lugar a acetato, dióxido de carbono e hidrógeno. Los productos intermedios, como los ácidos grasos volátiles y los alcoholes, desempeñan un papel menor.

Esta vía de degradación proporciona un mayor rendimiento energético para los microorganismos y los productos pueden ser utilizados directamente por los microorganismos metanogénicos [6].

Sin embargo, cuando la concentración de hidrógeno y formiato es alta, las bacterias fermentadoras cambiarán el camino para producir más metabolitos reducidos.

Los productos de la etapa de acidogénesis consisten aproximadamente en un 51% de acetato, un 19% de H_2/CO_2 , y un 30% de productos reducidos, como mayores AGV, alcoholes o lactato [7].

El paso de acidogénesis suele considerarse el más rápido en la digestión anaeróbica de la materia orgánica compleja [8].

3.4.3 Acetogénesis

Los productos intermedios formados durante la acidogénesis consisten en ácidos grasos de más de dos átomos de carbono, alcoholes de más de un átomo de carbono y ácidos grasos aromáticos y de cadena ramificada.

Estos productos no pueden ser utilizados directamente en la metanogénesis y tienen que ser oxidados a acetato y H_2 en el paso de acetogénesis por bacterias reductoras de protones obligadas en una relación sintrófica con los utilizadores de hidrógeno.

Una baja presión parcial de H_2 es esencial para que las reacciones acetogénicas sean termodinámicamente favorables [9].

Los productos de la acetogénesis son entonces los sustratos para el último paso de la digestión anaeróbica, que se llama metanogénesis.

3.4.4 Metanogénesis

En el paso de la metanogénesis, el acetato y el H_2/CO_2 son convertidos en CH_4 y CO_2 por las arqueas metanogénicas.

Las arqueas metanogénicas son capaces de crecer directamente con H_2/CO_2 , acetato y otros compuestos de un solo carbono, como el formiato y el metanol [10].

En los digestores anaerobios normales, el acetato es el precursor de hasta el 70% de la formación total de metano, mientras que el 30% restante se origina a partir de H_2/CO_2 [11].

A temperaturas más altas, la vía de oxidación del acetato es más favorable [12].

3.5 Factores que afectan al proceso de biogás

Los factores que afectan a la producción de biogás se deben principalmente a las características de la materia prima y a las condiciones de funcionamiento del proceso. En ocasiones, la propia materia prima puede contener inhibidores, como altas concentraciones de cationes. Otras veces los compuestos tóxicos no están presentes inicialmente en la materia prima, sino que se producen durante el proceso de digestión anaeróbica, como los AGV. Los factores de la materia prima (es decir, los nutrientes, el pH, la capacidad de amortiguación y los compuestos inhibidores) y las condiciones de funcionamiento (es decir, la temperatura y la OLR influyen directamente en el rendimiento de los microorganismos.

3.5.1 Temperatura

La digestión anaeróbica puede aplicarse en una amplia gama de temperaturas. El aumento de la temperatura tiene varias ventajas: puede aumentar la solubilidad de los compuestos orgánicos; aumentar las tasas de reacción química y biológica; mejorar la difusividad del sustrato soluble; aumentar la tasa de muerte de las bacterias patógenas, especialmente en condiciones termófilas; aumentar la degradación de los ácidos grasos de cadena larga, los AGV y otros intermediarios, etc. [13]. La desventaja de la alta temperatura puede ser que disminuya el pKa del amoníaco, por lo que aumenta la fracción de amoníaco libre que es inhibidora de los microorganismos y aumenta el pKa de los AGV, lo que aumenta su fracción no disociada, especialmente a pH bajo (4-5) como en el reactor acidogénico. Esta es la razón por la cual, el proceso termófilo es en general más sensible a la inhibición [14].

3.5.2 Nutrientes

La biodegradación eficiente requiere nutrientes y, por lo tanto, son importantes para el crecimiento de las células microbianas. Los macronutrientes como el carbono, el nitrógeno, el potasio, el fósforo y el azufre [15] y los micronutrientes como el Fe, el Ni, el Zn y el Co en menor cantidad [16] son necesarios para un crecimiento microbiano anaeróbico óptimo.

3.5.3 pH y capacidad de amortiguación

Muchos grupos de microorganismos tienen el mismo rango óptimo de pH, mientras que cada grupo tiene una región específica de pH para el crecimiento óptimo en la degradación anaeróbica. Las arqueas metanogénicas pueden funcionar en un intervalo de pH bastante estrecho, de 5,5 a 8,5, con un rango óptimo de 6,5 a 8,0 [17]. Las bacterias fermentadoras pueden funcionar en un intervalo de pH más amplio, de 4 a 8,5 [18], y tienen diferentes pH óptimos con respecto a los productos de fermentación [19]. En un digestor anaeróbico de cultivo mixto, el rango óptimo de pH es de 6,6 a 7,8 [20]. El conocimiento del pH y de los factores que causan o resisten el cambio de pH es esencial para controlar y asegurar el éxito de la operación en un sistema de AD. La capacidad de amortiguación (también llamada alcalinidad) es un factor importante para la estabilidad del proceso, en términos de resistencia al cambio de pH.

3.5.4 Ácidos grasos volátiles (AGV)

Los AGV son algunos de los intermediarios más importantes en el proceso de biogás anaeróbico; lo importante es la conversión de los AGV en metano y dióxido de carbono [21]. El aumento de la concentración de AGV en el proceso de biogás es bien conocido, como resultado del desequilibrio del proceso. Por lo tanto, se ha sugerido comúnmente como un indicador en el digestor anaeróbico [22]. Se ha descubierto que la fracción no ionizada de los ácidos grasos volátiles (AGV) contribuye a la inhibición de la metanogénesis. Los ácidos grasos no ionizados, también llamados libres, pueden atravesar las membranas celulares y disociarse, lo que altera la homeostasis celular [23].

3.5.5 Tasa de carga orgánica (OLR)

La mayoría de los residuos orgánicos industriales contienen una alta fracción de materias orgánicas fácilmente degradables, lo que se traduce en un alto rendimiento de metano, sin embargo, también conduce a una alta producción de AGV. Por lo tanto, es importante controlar la OLR para maximizar la producción de biogás. Una carga insuficiente del proceso (con una baja tasa de alimentación) da una baja tasa de producción de biogás. Por supuesto, es más seguro funcionar con una carga insuficiente para evitar fallos en el proceso, pero también es antieconómico porque la capacidad del proceso no se utiliza completamente.

El aumento de la carga orgánica conlleva una mayor producción de biogás, pero también el riesgo de sobrecarga. La sobrecarga del reactor suele provocar la acumulación de AGV. Así, una alta concentración de AGV disminuye el pH y hace que los AGV se vuelvan más tóxicos para los metanógenos, lo que puede poner fin al proceso de AD. Es decir, tanto la infracarga como la sobrecarga introducen un desequilibrio del proceso en el digester anaerobio [24].

3.5.6 Inhibición iónica

La alta concentración de iones podría causar inhibición en el proceso de biogás [25]. [26] investigaron el efecto del sodio y el potasio a la concentración de 25 y 50 g/L en la hidrólisis anaeróbica y la acidogénesis de los residuos vegetales. Observaron que la acidogénesis era más sensible que la hidrólisis y que era necesario controlar el pH cuando la concentración de cationes era alta, para asegurar el éxito de la acidogénesis. Se ha informado que el catión sodio causa una inhibición moderada a 3,5-5,5 g/L y una fuerte inhibición a 8 g/L [27].

3.6 Mejora del proceso de biogás

La optimización del proceso de biogás mediante un mejor seguimiento y control es una forma de mejorar la eficiencia del proceso. Otras formas pueden ser el pretratamiento del sustrato

para liberar más compuestos biodegradables, o la codigestión con diferentes residuos y/o con estiércol animal. Esto limitará la inhibición del sustrato y mejorará la producción de biogás.

3.6.1 Tratamiento hidrotérmico

El tratamiento hidrotérmico, también llamado de vapor, se realiza a alta temperatura y presión. Durante el pretratamiento, la biomasa se suele mezclar con agua y se calienta a unos 180 – 200 °C durante 5-15 minutos para destruir la estructura protectora de la lignina y hacer que la celulosa esté disponible para las enzimas. Está demostrado que el pretratamiento hidrotérmico puede mejorar significativamente la biodegradabilidad al lograr una solubilización suficiente de la lignocelulosa para mejorar la hidrólisis en el proceso de AD, lo que resulta en el aumento de la producción de biogás [28].

3.7 Posibles ventajas de la digestión anaeróbica controlada

- El olor del estiércol digerido es sustancialmente menor que el del estiércol líquido almacenado.
- La energía producida por el biogás compensa el coste de la inversión.
- El contenido en nutrientes del estiércol digerido es igual al del estiércol crudo.
- El estiércol digerido está más licuado que el crudo, lo que facilita su bombeo a largas distancias.
- El estiércol digerido está biológicamente estabilizado, lo que facilita su almacenamiento durante largos periodos sin problemas de olores.
- El estiércol digerido homogéneo se comporta bien en los sistemas de aplicación de líquidos.
- Es menos probable que los roedores y las moscas se sientan atraídos por el estiércol digerido.
- Se reducen las emisiones de metano de las zonas de almacenamiento de estiércol líquido.

3.8 Desventajas potenciales de la digestión anaeróbica

- La inversión inicial puede ser costosa para un sistema de digestión. Los banqueros y los prestamistas pueden ser cautelosos a la hora de prestar dinero para estos sistemas.
- El digester requiere un cuidado y una alimentación adecuados al igual que un animal. Se requieren conocimientos técnicos del proceso de digestión y una buena gestión.

- Se requiere mano de obra para el mantenimiento preventivo y no programado. Lo ideal es que una persona se encargue del digestor, y que éste tenga prioridad sobre las demás tareas de la granja de esa persona.
- Las tareas de mantenimiento diario son mínimas, pero se requieren cambios de aceite semanales, revisiones regulares del motor y limpieza periódica del digestor.
- No se reduce la cantidad de estiércol a manipular. Si se añade agua al sistema, el volumen aumenta.
- La conservación de nutrientes puede ser indeseable en una granja con exceso de nutrientes que gestionar.
- Gran parte del nitrógeno del estiércol crudo se transforma en su forma orgánica de amonio. El amonio puede transformarse en amoníaco o en nitrato. El amoníaco puede perderse a partir del estiércol no incorporado y aplicado en el campo. El nitrato puede llegar a través del suelo y eventualmente puede llegar a las aguas subterráneas.
- La aplicación en el campo y la gestión para reducir las pérdidas de nitrógeno pueden ser más exigentes en el caso de un digestor que en el del estiércol líquido no tratado.
- Los digestores anaeróbicos pueden ser un peligro para la seguridad de la granja.
- Alternativas a la generación eléctrica de los digestores anaeróbicos: Con pequeñas modificaciones en el equipo, el biogás puede utilizarse como sustituto del gas natural. El funcionamiento de una caldera de gas es un método barato y eficiente para utilizar el biogás. El obstáculo será encontrar usos para el calor, especialmente en verano. Los sistemas de refrigeración por absorción (activados por el calor) son una tecnología prometedora para utilizar el exceso de calor, pero actualmente tienen un coste inicial elevado. Otra opción es eliminar el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno del biogás y venderlo como gas natural. Depurar el gas, encontrar un mercado, proporcionar al comprador un suministro fiable de gas y mantener el equipo de distribución requieren dinero, tiempo, mantenimiento y gestión. Además, el gas natural se vende a un precio mucho más bajo que la electricidad. Aunque existen otras opciones para la utilización del biogás, la electricidad es el producto energético más versátil y valioso del biogás.

3.9 Residuos producen biogás

- 1- Residuos urbanos (basura):
 - a. Urbanos (excrementos humanos)
 - b. Rurales y agrícolas
 - c. Estiércol de vaca
 - d. Animales de carnicería

- 2- Los residuos agrícolas incluyen:
 - a. Paja de arroz, trigo, otros cereales o cultivos
 - b. Bagazo de la caña de azúcar
 - c. Cáscara de cacahuete, cáscara de nuez, cáscara de trigo, etc
 - d. Granos alimenticios no utilizados de todo tipo

- 3- Los residuos de frutas y árboles frutales incluyen:
 - a. Residuos de todo tipo de frutas, por ejemplo, residuos de cocoteros, cáscara de coco, uvas no utilizadas y estropeadas, anacardos, plátanos, mangos, etc.

- 4- Los residuos de animales rurales incluyen:
 - a. Estiércol de vaca, estiércol de caballo y estiércol de oveja; residuos de mataderos; excrementos y desechos de aves de corral; estiércol y residuos de porquerizas; residuos urbanos y basura municipal, residuos y cultivos acuáticos; residuos de la pesca algas cosechadas; jacinto de agua, etc.

3.9 Residuos no producen biogás

- 1- Residuos ricos en fibra, como la madera, las hojas, etc., son difíciles de digerir
- 2- Metales pesados
- 3- Materiales inorgánicos en alta concentración (nitrato, sodio, sulfato, sodio, potasio, calcio, magnesio, etc.)

4.0 Diferencia entre Autogeneración y Cogeneración

Es el proceso por el cual se obtienen simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil. Tiene eficiencia energética y evita cambios de tensión. Se diferencia de la generación paralela ya que se utilizan dos procesos uno para generar energía eléctrica y otro para generar energía térmica.

La **cogeneración** es el procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente sanitaria). Si además se produce frío (hielo, agua fría, aire frío, por ejemplo) se llama trigeneración [29].

La ventaja de la cogeneración es su mayor eficiencia energética ya que se aprovecha tanto el calor como la energía mecánica o eléctrica de un único proceso.

Al generar electricidad mediante un alternador movido por un motor térmico, el aprovechamiento de la energía química del combustible oscila entre 25- 46% (sobre el poder calorífico inferior), y el resto se disipa en forma de calor. Con la cogeneración se aprovecha una parte importante de la energía térmica que normalmente se disiparía a la atmósfera o a una masa de agua y evita volver a generarla con una caldera. Además, evita los posibles problemas generados por el calor no aprovechado.

La maquinaria utilizada para instalaciones de cogeneración puede ser:

- Turbina de vapor
- Turbina de gas
- Motor de combustión interna
- Ciclos Rankine con fluido orgánico...

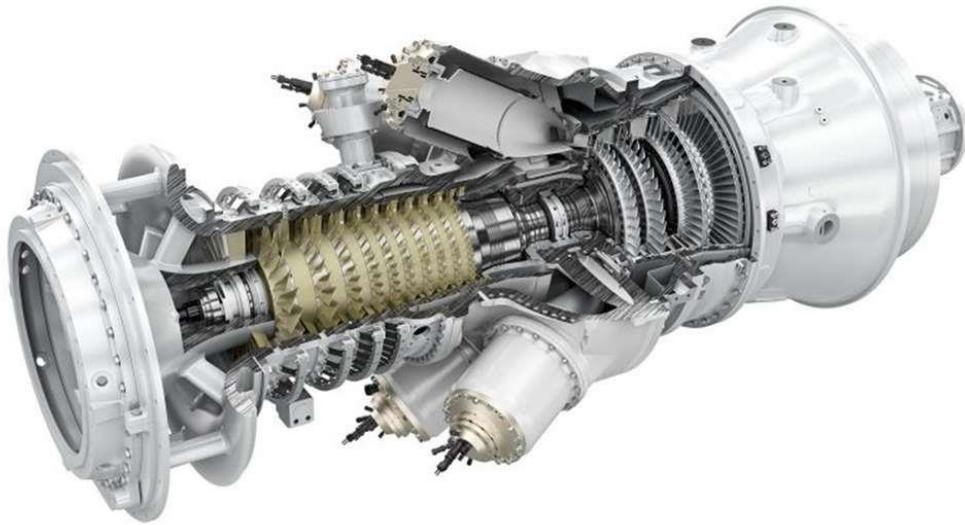


Fig 5.0: Turbina de gas (SGT-300 Siemens).

5.0 Barich Biogas Plant

Una planta de biogás es una instalación que proporciona condiciones sin oxígeno en las que se puede producir la digestión anaeróbica. En pocas palabras, es un sistema artificial donde se pueden convertir los residuos en energía y fertilizantes sostenibles, con efectos positivos para el medio ambiente.

Una planta de biogás tiene tres componentes principales que hacen posible el proceso de producción de biogás:

- Zona de recepción
- Digestor (o tanque de fermentación)
- Depósito para almacenamiento de gas

Se pasa a continuación a describir brevemente cada una de las zonas comentadas

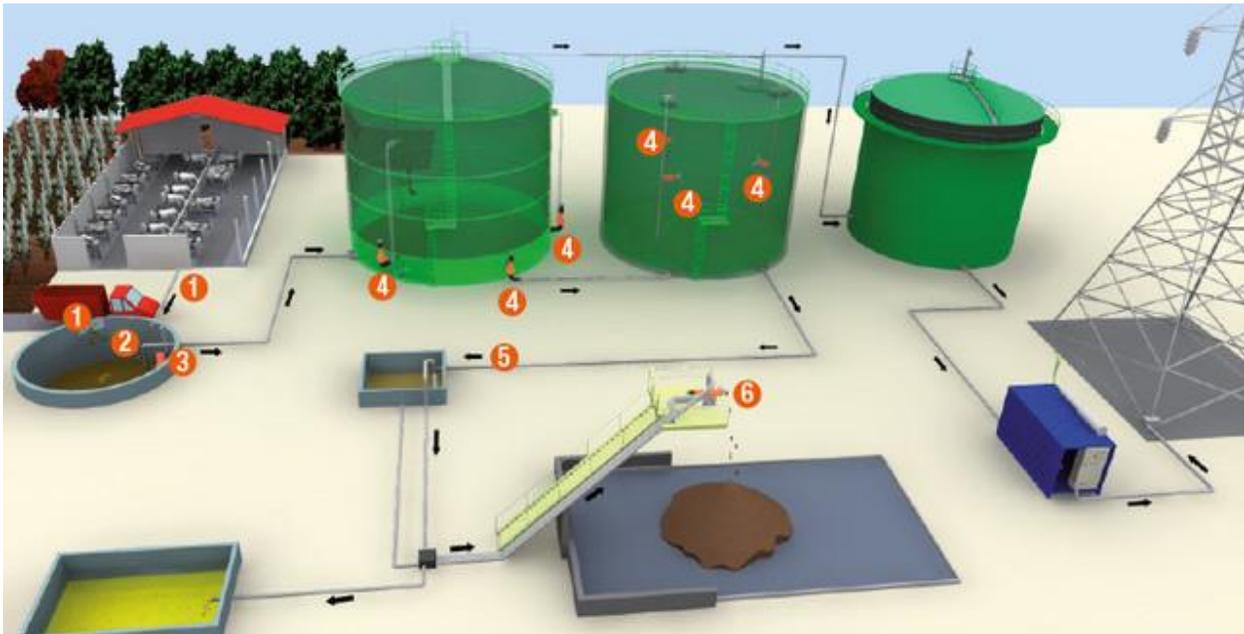


Fig 6.0: Una planta simple de biogás.

Zona de recepción

La zona de recepción es donde aquella en la que se reciben las materias primas y se preparan para la digestión anaeróbica. Cada tipo de biomasa tiene un proceso de fermentación diferente, por lo que la duración total del proceso de producción de biogás varía en función de las materias primas utilizadas, y no es infrecuente el uso de pretratamientos en las plantas industriales de biogás para acelerar la fermentación y aumentar la producción de biogás.

Algunas de las opciones de biomasa más populares son los residuos de cultivos, las aguas residuales municipales e industriales (depuradoras), el material agrícola, el estiércol del ganado, las algas marinas, el procesamiento de alimentos y los residuos de papel, pero la lista de materias primas utilizadas es mucho más larga.

Digestor

El digestor es un contenedor hermético e impermeable con una vía de entrada para la biomasa. Aquí se introducen las materias primas que se van a transformar en energía. A continuación, unos agitadores desplazan la biomasa periódicamente para liberar los gases y evitar la formación de capas. El digestor también incluye una tubería que permite retirar el digestato una vez finalizada la fermentación.

Depósito de almacenamiento de gas

El depósito de gas es un recipiente hermético, de acero o de otro material neutro e inerte con los gases y sustancias liberados, que recoge el gas generado durante el proceso de fermentación. Está provisto de una salida de gas que permite que el biogás salga del sistema para su uso en la producción energética en forma de energía térmica y su uso en motores térmicos.

Dependiendo de la cantidad de residuos que se quiera eliminar del medio ambiente o del volumen de biogás que se necesite producir, una planta puede disponer de más de un digestor y de depósitos acumuladores de gas (plantas modulares).

5.1 Funcionamiento

Las plantas de biogás siguen un proceso automático y sencillo creado para reproducir el proceso natural de la digestión anaeróbica en un entorno artificial, lo que hace que la producción de biogás sea sencilla y neutra en carbono.

Aunque algunos pasos pueden variar en cada planta de biogás, la mayoría de las instalaciones utilizan el mismo proceso para producir biogás.

Paso 1: Pretratamiento y llenado del digestor

En el digestor entran varios tipos de materia orgánica llamados sustratos. Algunos sustratos pueden ser estiércol líquido, materias primas renovables (como el maíz o la hierba) o residuos producidos por la industria alimentaria. Algunos de ellos pueden tener que ser almacenados en contenedores de cemento y tratados previamente antes de entrar en el tanque hermético. Una planta puede incluir varios digestores, dependiendo de su tamaño.

Paso 2: Proceso de fermentación

Los sustratos se calientan a varias temperaturas dentro del fermentador, y una serie de microorganismos comienzan a descomponer la materia orgánica en ausencia de luz y oxígeno. Durante el proceso, la materia orgánica se desplaza para evitar que se formen capas en la parte superior e inferior del tanque.

Paso 3: Producción de biogás

Como resultado de la fermentación, se produce biogás con metano como ingrediente principal dentro de los fermentadores. En esta fase del proceso, el gas incluye, además de metano y dióxido de carbono, agua y sulfuro de hidrógeno, lo que constituye una de las principales razones por las que los contenedores deben ser de acero, conocido por soportar los efectos del gas durante largos períodos.

Paso 4: Eliminación de residuos

Después de la fermentación, los residuos, llamados “digestato”, se extraen del tanque para utilizarlos como fertilizante de alta calidad y respetuoso con el medio ambiente. De este modo, el proceso de producción de biogás se convierte en un sistema de cero residuos que elimina la basura de los vertederos y, al mismo tiempo, proporciona una solución para mejorar los cultivos.

Paso 5: Eliminación de impurezas

El biogás pasa por un proceso de limpieza, en el que se eliminan el agua, el sulfuro de hidrógeno y las impurezas para producir biometano que puede utilizarse además para generar energía y calor. El biogás se controla permanentemente para garantizar la calidad del producto final.

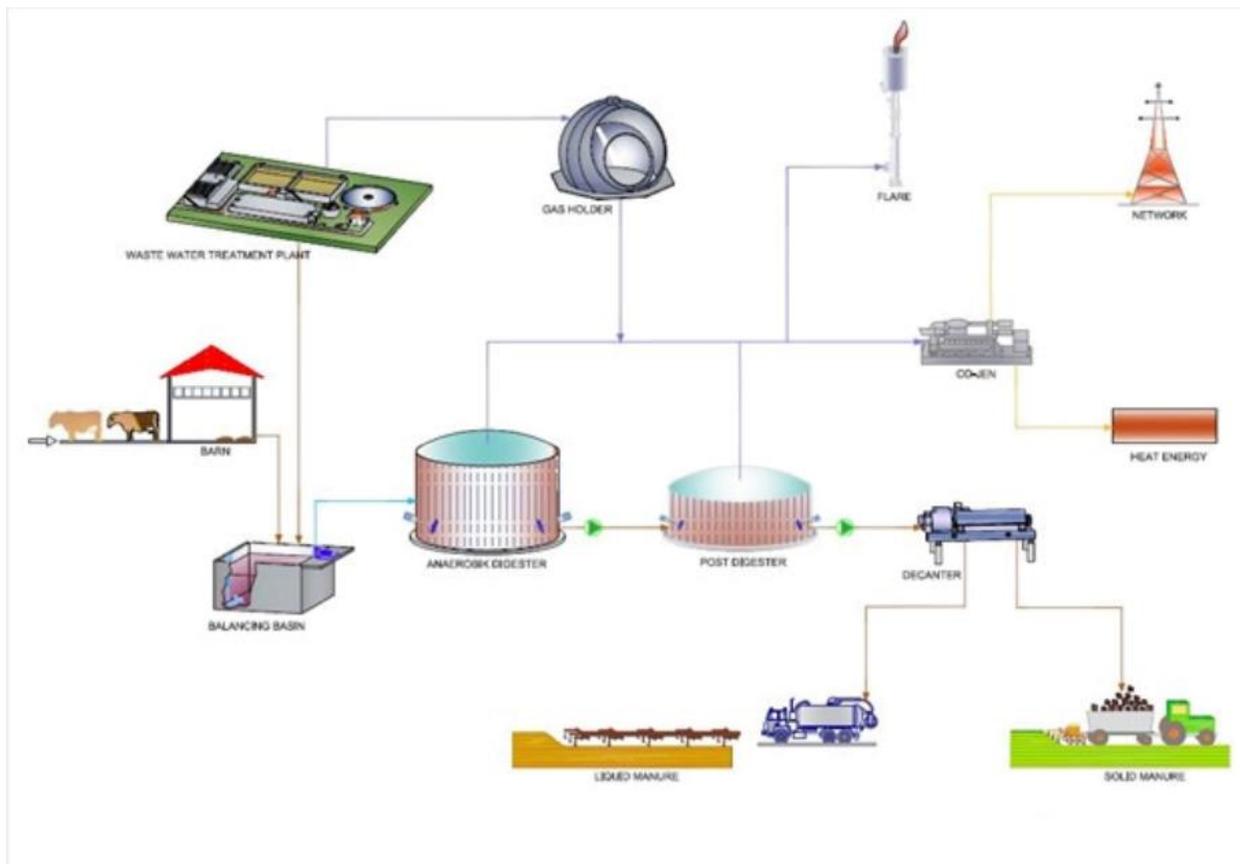


Figura 7.1: Diagrama simple de proceso de biogás.

5.2 Antecedentes del proyecto

En la granja se crían un total de 100 vacas. En el proceso normal de producción, se produce diariamente una gran cantidad de estiércol de vaca. Este estiércol tiene un alto contenido de materia orgánica y nutrientes, y contiene un gran número de bacterias patógenas, huevos de plagas y otras sustancias nocivas debido a la naturaleza de la alimentación del ganado vacuno. Aplicado directamente al suelo, fermenta en condiciones adecuadas y produce mucho calor, quemando las raíces de los cultivos. Al mismo tiempo, el propio estiércol de vaca es portador de un gran número de bacterias, lo que conlleva peligros ocultos de enfermedades para los cultivos. Por ello, el estiércol de vaca debe ser tratado antes de aplicarlo a los cultivos.

Por otra parte, la leche de vacas se utilizará para elaborar varios tipos de queso mediante una quesera.

5.3 Aprovechamiento residuos orgánicos: Producción de biogás

Los residuos orgánicos del ganado (es decir el estiércol y los purines), se van a aprovechar para producir biogás mediante la digestión anaerobia en el digestor. En los establos, los animales se encuentran sobre camas de paja, que junto a las heces forman el estiércol [30].

En primer lugar, es necesario definir dos parámetros que tienen una gran influencia en el dimensionamiento de digestores alimentados con residuos de ganado: la masa seca (MS) y la masa volátil (MV).

- **Masa seca (MS)**

La masa seca se define como la cantidad de sólidos que contiene el estiércol. Para calcular el porcentaje de masa seca se excluye el agua. El porcentaje de masa seca introducida en los digestores debe ser aproximadamente igual a 10% para que la digestión anaerobia se realice de forma adecuada. Si el estiércol tiene un porcentaje de MS superior al 10%, se debe diluir en agua.

- **Masa volátil (MV)**

La masa volátil se define como el porcentaje real de masa orgánica contenido en la biomasa, es decir el porcentaje de la biomasa que produce biogás. Se mide en porcentaje respecto a la masa seca. Estos dos parámetros varían en función del tipo de materia orgánica, e incluso para un mismo tipo influyen numerosos factores que hacen que los valores no se mantengan siempre constantes.

En el caso del estiércol del ganado, influyen factores como la alimentación, el peso y el tipo de confinamiento de los animales.

En una planta de biogás real, es importante realizar un estudio fisicoquímico previo de la biomasa introducida en el digestor para determinar los valores exactos de masa seca y masa volátil, y así poder determinar la producción real de biogás.

En este proyecto se toman los siguientes valores:

- $\%MS = 8\%$
- $\%MV = 83\%$ de la masa seca

A continuación, se calcula la cantidad de estiércol que genera cada cabeza de ganado. Cada kilogramo de peso vivo de animal genera 0,05 kg de estiércol al día. Es decir, un bovino adulto de raza frisona con un peso medio de 500 kg genera:

$$\frac{\text{kg estiércol}}{\text{cabeza} - \text{día}} = \frac{0,05 \text{ kg estiércol}}{\text{kg peso} \cdot \text{día}} \cdot \frac{500 \text{ kg peso}}{\text{vaca}} = \boxed{25 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{cabeza} - \text{día}}}$$

lo que supone 9.125 kg de estiércol por cabeza de ganado a lo largo de un año.

Por otra parte, un kilogramo de masa volátil genera entre 0,25 - 0,4 m³ de biogás en el digestor. Se toma el valor medio de 0,325 m³ de biogás por kilogramo de masa volátil.

A partir de los datos anteriores se obtiene

$$25 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{cabeza} - \text{día}} \cdot 0,08 \cdot 0,83 \cdot 0,325 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg MV}}$$
$$\rightarrow \boxed{\text{Biogás generado} = 0,5395 \frac{\text{m}^3}{\text{cabeza} - \text{día}}}$$

Para el total de 100 ejemplares de la raza bovina frisona esto supone una producción de aproximadamente **53,95 m³** de biogás diarios.

Es muy importante que el número de ejemplares en la explotación se mantenga constante a lo largo del año para optimizar la producción de biogás. La cantidad de residuos, es decir la relación de alimentación con la que se alimenta el digester debe mantenerse relativamente constante para que funcione de forma óptima.

Si el digester se alimenta con una cantidad de residuos superior a la de diseño (esto es, hay más de 100 ejemplares), la producción de biogás por unidad de materia orgánica introducida disminuye puesto que hay más materia orgánica que microorganismos, además de dificultar la movilidad de éstos.

Si por lo contrario, la cantidad de residuos con la que se alimenta el digester es menor que la cantidad de diseño, las bacterias anaerobias presentes en el digester no tienen suficiente alimento y mueren, disminuyendo la producción de biogás.

Por lo tanto, a la hora de definir el control del digester, se deberá controlar de manera estricta la cantidad de sustrato introducida para que se mantenga siempre constante.

5.4 Dimensionamiento y diseño de la planta de biogás

A continuación, se va a diseñar la planta de biogás. Para ello se dimensionarán los componentes principales de la misma: el tanque de alimentación, el biodigestor, el tanque de almacenamiento del digestato y la unidad de cogeneración.

En este proyecto se van a diseñar los distintos elementos partiendo del estiércol generado a diario por los 100 bovinos de la explotación ganadera.

5.4.1 Componentes principales

Para dimensionar el biodigestor, es necesario conocer previamente algunos parámetros de operación como la temperatura de los mismos, el tiempo de retención hidráulico (TRH) y la carga orgánica volumétrica (COV).

5.4.1.1 Obtención de la temperatura

La temperatura influye de forma directa en el desarrollo de los microorganismos que llevan a cabo la digestión anaerobia. A mayor temperatura, mayor velocidad de crecimiento, y mayor velocidad en la producción de biogás. Para ello se va a instalar un sistema de calefacción externo en el biodigestor para calentar el sustrato, puesto que el proceso anaerobio no genera calor. Con esto, se logra aumentar la temperatura del proceso y la producción de biogás.

Es importante destacar que a pesar de que a mayor temperatura mayor es la eficiencia en la producción de biogás, el proceso se vuelve mucho más sensible a pequeñas variaciones térmicas y de operación. Por ello la instalación se torna más compleja y más costosa económicamente. Con el sistema de calefacción se va a aumentar la temperatura del proceso de digestión en los digestores hasta aproximadamente 31 °C, temperatura dentro del rango mesófilo.

En este proyecto, se va a estimar una temperatura media anual.

A partir de las temperaturas medidas en 4 estaciones climatológicas distribuidas por Barich, se calcula la temperatura media anual de 2021, que es de 20 °C.

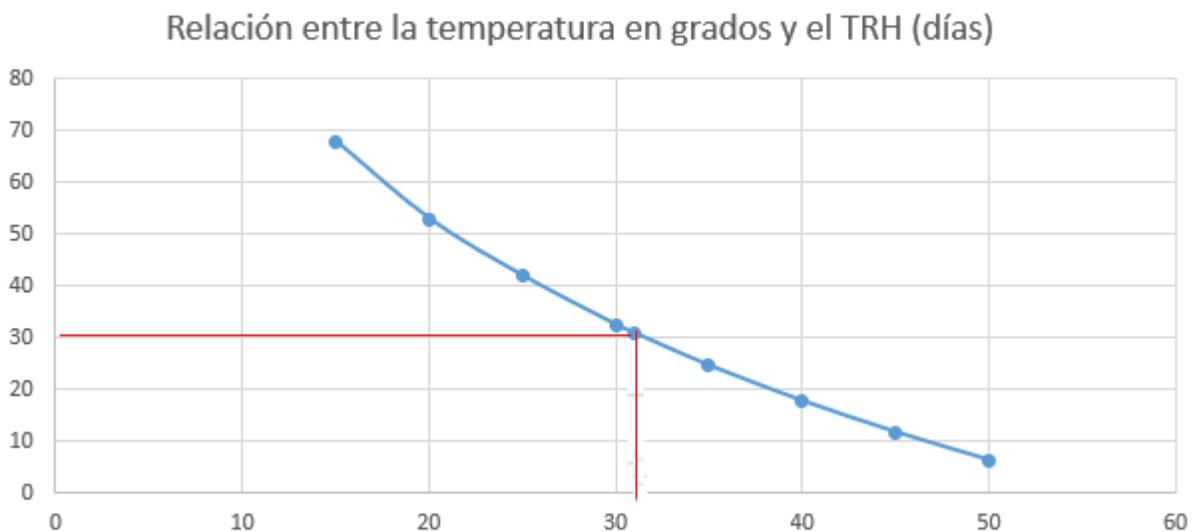
5.4.1.2 Cálculo del tiempo de retención hidráulico (TRH)

La temperatura obtenida previamente está relacionada con el tiempo de permanencia de la biomasa en el digestor hasta que se completa su degradación y se transforma en biogás, es decir con el tiempo de retención hidráulico (TRH). A mayor temperatura, más rápido se desarrollan los microorganismos y más rápido se produce la degradación de la biomasa, y por tanto disminuye el TRH.

Según la Unidad de planeación minero-energética de Colombia [31], se lleva a cabo una simulación a partir de datos ofrecidos por distintas fuentes para buscar una relación entre la temperatura y el tiempo de retención hidráulico. Se obtiene una curva de tendencia logarítmica que relaciona el TRH con la temperatura que sigue una ley según basada en datos experimentales tal como se expone a continuación

$$TRH = (-51,227 \cdot \ln(T \text{ } ^\circ\text{C}) + 206,72) \rightarrow \boxed{TRH = 30,8 \text{ días}}$$

donde T ($^\circ\text{C}$) es la temperatura de la digestión anaerobia en grados centígrados, es decir $31 \text{ } ^\circ\text{C}$. El tiempo que permanece la biomasa dentro del digestor es por tanto **30,8 días**.



Gráfica 1: Relación entre TRH y la temperatura.

5.4.1.3 Balance de masa global del proceso

En este apartado se va a realizar un balance de masa global del proceso para calcular las cantidades de digestato y biogás obtenidas en cada digestión.

La carga diaria de estiércol introducida en el biodigestor es de 2500 kg/día. De esa carga se obtienen 53.95 m³ de biogás diarios.

Para realizar el balance de masa es necesario convertir esa cantidad a unidades de masa, para lo cual es necesario conocer la densidad del biogás. La densidad del biogás está comprendida en un intervalo entre 1,16 - 1,27 kg/m³ [32]. En este proyecto se han tomado como valor de referencia para los cálculos 1,2 kg/m³.

Se procede a calcular la masa del biogás:

$$kg \text{ biogás} = \frac{53,95 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{1,2 \text{ kg biogás}}{1 \text{ m}^3} = \frac{64,74 \text{ kg biogás}}{\text{día}}$$

Con la masa de biogás se obtiene la masa diaria de digestato resultante de la digestión del estiércol:

$$\begin{aligned} kg \text{ digestato} &= 2.500 \frac{kg \text{ estiércol}}{\text{día}} - 64,74 \frac{kg \text{ biogás}}{\text{día}} \\ &= 2.435,26 \frac{kg \text{ digestato}}{\text{día}} \end{aligned}$$

Es necesario convertir las unidades de masa de la cantidad de digestato obtenida en unidades de volumen. Se toma una densidad del mismo de 1.020 kg/m³ [33].

$$volumen \text{ digestato} = \frac{2435,26 \text{ kg/día}}{1020 \text{ kg/m}^3} = 2.38 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \sim 2.4 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

5.4.1.4 Carga orgánica volumétrica (COV)

La carga orgánica volumétrica (COV) se define como la cantidad de materia orgánica que produce biogás con la que se alimenta el digestor por m^3 de este. Se mide en $\frac{kg-MV}{m^3-día}$ y depende del TRH, de la temperatura y del tipo de materia orgánica.

Se calcula según la siguiente ecuación:

$$COV = carga\ diaria \frac{m^3}{día} \cdot \% MV \cdot \rho\ estiércol \frac{kg}{m^3}$$

$$Volumen\ útil\ digestor = \frac{\% MV \cdot \rho\ kg/m^3}{TRH \cdot días}$$

Su valor debe estar comprendido entre 1 y 3 kg/m^3 -día. Si supera los 3 (kg/m^3 -día), el proceso es más inestable y se debe controlar constantemente para comprobar si disminuye o no la producción de biogás. Si alcanza los 4-5 kg/m^3 -día los microorganismos tienen un exceso de biomasa y disminuye la producción de biogás, ya el exceso de sólidos dificulta la movilidad de los microorganismos, reduciendo la efectividad del proceso.

Se calcula para el digestor:

$$COV = \frac{0,08 \cdot 0,83 \cdot 600}{30,8} = 1,29 \frac{kg}{m^3 \cdot día}$$

siendo la densidad del estiércol **600** kg/m^3 .

El COV, a pesar de ser relativamente bajo, se encuentra dentro del rango de valores admisibles para que el digestor funcione de forma correcta sin requerir una vigilancia continua debido a posibles inestabilidades.

5.5. Cálculo del volumen de los digestores. Comprobación COV

A partir de la definición del TRH, se obtiene el volumen útil del digestor:

$$\text{Volumen útil digestor} = \text{TRH}(\text{días}) \cdot \text{Caudal alimentación } m^3/\text{día}$$

El porcentaje de seguridad en digestor es el **10%** del volumen calculado.

A continuación, se calcula el volumen del digestor.

La carga o caudal de alimentación que se introduce en el digestor es la carga calculada previamente.

Es la totalidad de materia prima obtenida a diario por los 100 bovinos de la explotación y su valor es de **4,16** m³/día.

$$\text{Volumen útil digestor} = 30,8 \text{ días} \cdot 4,16 \text{ m}^3/\text{día} = \mathbf{128,13 \text{ m}^3}$$

El volumen útil del primer digestor es de **128,13** m³, es decir, aproximadamente **130** m³.

Este es el volumen donde se almacena la biomasa y se produce la digestión anaerobia.

Las dimensiones del digestor son las siguientes:

- CÚPULA

$$\text{Volumen biogas} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R^2}{3}$$

- Radio (R) = 2,675 m

$$\text{Vol. útil cilindro} = \pi \cdot R^2 \cdot H$$

- Radio (R) = 2,675 m
- Altura (H) = 6,31 m
- Diámetro = 5,35 m

Digestor de mezcla completa

Este digestor es uno de los más utilizados para el tratamiento de residuos mediante digestión anaerobia debido a su sencillez.

Como se puede observar en la figura 8.0, el digestor de mezcla completa es un digestor cilíndrico sellado, de acero u hormigón, en el cual la mezcla de materia orgánica y agua se mantiene permanentemente mezclada de forma homogénea mediante un sistema de agitación mecánico (agitador de hélices o de palas...) o neumático (sistema de recirculación del biogás a presión).

Del mismo modo que en el digestor de flujo pistón, se controla la temperatura para situarse en el rango de temperaturas de trabajo requeridas.

El tiempo de retención hidráulico oscila entre los 10 y los 30 días, y el porcentaje óptimo de residuos sólidos en la mezcla debe situarse entre el 3 y el 10%.

La carga puede realizarse de forma continua o discontinua, y puede existir o no recirculación del efluente.

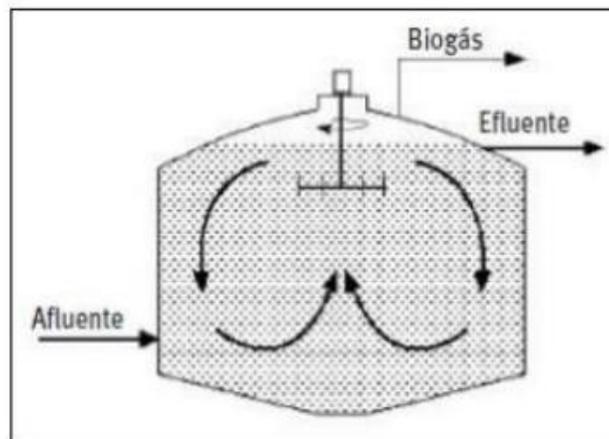


Figura 8.0: Digestor de mezcla completa.

(Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España, 2007)

5.6. Sistema de calefacción

Como se ha concluido previamente, es necesario aumentar la temperatura en el digestor mediante unos sistemas de calefacción para alcanzar los 31 °C, aprovechando la energía obtenida de la refrigeración del motor de la unidad de cogeneración.

El sistema de calefacción está compuesto por una red de tuberías a través de las cuales circula agua caliente, situadas en la pared interior de los digestores.

El sistema de calefacción debe cubrir por lo menos $\frac{1}{3}$ de la altura del digestor.

5.7. CALOR REQUERIDO PARA MANTENER LA TEMPERATURA INTERIOR

El calor requerido se calcula mediante la siguiente ecuación

$$Q = \text{gasto } \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cdot C_p \text{ agua } \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (T_{\text{requerida}} - T_{\text{estiercol inicial}})$$

Siendo,

- $C_p \text{ agua} = 4186,8 \text{ J/kgK}$
- $\dot{m} = 2500 \text{ kg /día}$
- $T_{\text{requerida}} = 31 \text{ °C}$
- $T_{\text{estiercol inicial}} = T_{\text{ambiente}} = 20 \text{ °C}$
- $1 \text{ MJ} = 1000 \text{ kW}$

Se obtiene un calor de **115,37 MJ/día** o lo que es lo mismo **1.332,6 W**.

5.8. Tanque de almacenamiento del digestato

5.8.1. Características y usos del digestato

Mediante la digestión anaerobia de la materia orgánica se obtienen dos productos: el biogás y el digestato. Este segundo es un residuo semi-líquido compuesto por restos de la biomasa que no ha sido digerida, depositados en el fondo del digestor. Se utiliza como biofertilizante de alta calidad debido a su alto contenido en materia orgánica y en nutrientes.

El digestato se puede utilizar directamente como fertilizante según se extrae del digestor, pero para maximizar su eficacia lo habitual es realizar una separación mecánica separando así la fracción sólida de la líquida. Para ello se efectúa una filtración al vacío con una bomba de vacío, obteniendo por un lado el filtrado, que es la fracción líquida con un bajo porcentaje de materia orgánica, y por otro lado el residuo sólido rico en materia orgánica. Este último es que se utiliza como bio-fertilizante.

La cantidad de digestato resultante de la digestión anaerobia se ha calculado mediante un balance de masa global, obteniendo **2.435,26 kg diarios**.

El volumen del tanque de almacenamiento debe ser el volumen que ocupa el digestato obtenido a lo largo de un día más el porcentaje de seguridad del 20%. Para calcular el volumen del digestato se debe conocer su densidad, que varía en cada instalación dependiendo del número de digestiones anaerobias y de las condiciones del proceso.

5.8.2. Almacenamiento y acondicionamiento biogás

El biogás se almacena en la cúpula del digestor de mezcla completa, dimensionada previamente, donde permanece el volumen generado durante un periodo de cinco horas.

A continuación, este es conducido mediante tuberías a la zona de acondicionamiento donde se le realizan diversos tratamientos para no dañar el sistema de cogeneración.

Estos tratamientos incluyen principalmente:

- Reducción de humedad
- Eliminación del sulfuro de hidrógeno H_2S
- Reducción de siloxanos

Es muy importante realizar un buen acondicionamiento del biogás, ya que cuanto mejor sea la calidad del mismo, menor mantenimiento requerirá el motor, y por tanto la planta estará operativa un mayor número de horas.

6.0 Unidad de postratamiento

El biogás está compuesto por un **55-60%** de CH_4 , un **35-45%** de CO_2 y un **5-10%** de H_2 , con trazas de H_2S y otras impurezas. En estas composiciones se pueden ver que los componentes combustibles del biogás son CH_4 y H_2 . Los otros gases son inútiles, tóxicos o dañinos y no tienen ninguna contribución energética en el biogás. Además, entre estos dos gases sólo el CH_4 está presente en una cantidad significativa.

El Protocolo de Kioto [34] ha definido explícitamente el metano como uno de los seis gases claves de efecto invernadero, donde el potencial de calentamiento global del metano es **25** veces mayor que el del dióxido de carbono. Por tanto, el uso de metano para la generación de energía no sólo puede proporcionar energía, sino también reducir la emisión de metano.

Con la composición típica del biogás descrita anteriormente, el biogás puede utilizarse fácilmente con el motor en términos de contenido calorífico. Sin embargo, el H_2S en el biogás, que se encuentra entre **50-10.000** ppm dependiendo de la composición del material alimentado al digester, puede causar corrosión en el motor y en las partes metálicas a través de la emisión de SO_2 de la combustión, especialmente cuando el motor no funciona continuamente, así como concentraciones tóxicas de $\text{H}_2\text{S}/\text{SO}_2$ en el lugar de trabajo. Por lo tanto, el H_2S debe ser eliminado antes de su utilización.

Existe un gran número de tecnologías para eliminar el H_2S de las corrientes de gas. Se puede evaluar la idoneidad de estas técnicas con los sistemas de biogás. La selección de la mejor depende del uso final del gas, la composición, la variabilidad y el volumen del gas a tratar, la concentración de H_2S presente y la cantidad absoluta de H_2S a eliminar. Cada tecnología tiene pros y contras. Además, se pueden combinar dos o más procesos para lograr una mayor eliminación de H_2S . El sulfuro de hidrógeno puede eliminarse en el digester, en el biogás bruto o en el proceso de mejora.

Las tecnologías comunes de eliminación de H_2S del biogás se clasifican en una de las siguientes:

- 1- Conversión biológica por la que los compuestos de azufre se convierten en azufre elemental por medio de microorganismos oxidantes de sulfuro con adición de aire/oxígeno.
- 2- Absorción en un líquido, ya sea agua o solución cáustica.

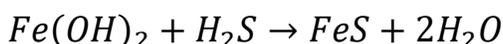
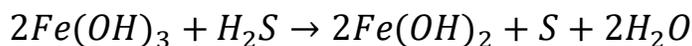
3- Adsorción en un sólido, como materiales a base de óxido de hierro, carbón activado o carbón activado impregnado.

En este proyecto, se combinarán los dos primeros métodos para reducir significativamente las ppm (partes por millón) de sulfuro de hidrógeno.

6.0.1 Primer método: reducción del sulfuro mediante la adición de sales/óxidos de hierro a los lodos del digestor

Los cloruros, fosfatos u óxidos de hierro se añaden directamente a los purines del digestor o al sustrato de alimentación en un tanque de pre-almacenamiento. La adición de $FeCl_2$, que es un líquido, es la más practicada. También se puede añadir hidróxido de hierro ($Fe(OH)_3$ o $Fe(OH)_2$) en forma sólida y cloruro ferroso ($FeCl_3$). A continuación, reaccionan con el sulfuro de hidrógeno producido y forman sales insolubles de sulfuro de hierro. Debido a esta precipitación, se evita la extracción de H_2S en el biogás.

Hidróxido ferroso:



Este método es muy eficaz para reducir los niveles elevados de H_2S , pero menos eficaz para conseguir un nivel bajo y estable de H_2S en el rango de demandas de los vehículos y de la inyección en la red de gas. Se han conseguido reducciones de las concentraciones de H_2S en el biogás de hasta **200 - 100** ppmv.

La eliminación a concentraciones más bajas requirió un gran exceso de iones de hierro. A este respecto, este método sólo puede considerarse un proceso de eliminación parcial y debe utilizarse junto con otra tecnología para bajar a **10** ppmv.

La eliminación “in situ” del sulfuro de hidrógeno está incluida en la planta de biogás llave en mano. Los costes de inversión son bastante bajos, ya que el único equipo necesario es un sistema de dosificación de cloruro de hierro.

6.0.2. Segundo método: Lavado con agua

La base de estos procesos es el lavado a alta presión del biogás con agua a presión. De este modo se elimina una parte importante de los contaminantes de los gases ácidos (incluido el

dióxido de carbono), que pueden desprenderse del agua de lavado en una torre de “stripping” de aire o vapor.



Figura 9.1: Sección de postratamiento de biogás de una planta en Dinamarca.

7.0 Unidad de cogeneración

En este apartado se procede a estudiar la unidad de cogeneración más adecuada para el caso de estudio.

La cogeneración es un proceso mediante el cual se obtiene simultáneamente energía térmica y eléctrica. El calor se aprovecha en la misma planta, en este caso para calentar los digestores, y la energía eléctrica o bien se consume en la planta o bien se inyecta a la red ingresando la cantidad económica correspondiente. Este proceso proporciona autonomía a la planta, además de beneficios económicos considerables.

Existen múltiples empresas que ofrecen motores de cogeneración para el trabajo con biogás. En este proyecto, se van a analizar motores ofrecidos por la empresa HELBIO [35] y por el fabricante UFL BIOGAS [36].

1- Modelo H2PS-5 Biogás de Helbio

Las características principales de este motor se resumen a continuación.

- Potencia eléctrica: **5 KW**
- Potencia térmica: **7 KW**
- Potencia introducida: **14,2 KW**
- Rendimiento eléctrico: **35%**
- Rendimiento térmico: **50%**
- Rendimiento total: **85%**
- Peso: **200 Kg**
- Precio: **5.600 €**

2- Modelo UFLBG-57 de UFL Biogás

Las características principales de este motor se resumen a continuación.

- Potencia eléctrica: **5,7 kW**
- Potencia térmica: **10 kW**
- Potencia introducida: **18,5 kW**
- Rendimiento eléctrico: **35%**
- Rendimiento térmico: **50%**
- Rendimiento total: **85%**
- Peso: **635 Kg**
- Precio: **7.890 €**

7.1 Selección de motor:

Ambos modelos cumplen los requerimientos energéticos.

- Se descarta el segundo modelo, es decir, el (UFLBG-57) por ser mucho más caro que el primer modelo.
- Se escoge el primer modelo (H2PS-5) por el motivo mencionado arriba.

Specs \ Modelo	H2PS-5 Helbio	UFLBG-57 UFL
Potencia eléctrica (KW)	5	5,7
Potencia térmica (KW)	7	10
Potencia introducida (KW)	14,2	18,5
Rendimiento eléctrico (%)	35	35
Rendimiento térmico (%)	50	50
Rendimiento total (%)	85	85
Peso (Kg)	200	635
Precio (€)	5.600	7.890

8.0 Cuba de Cuajar Queso

La cuba quesera o cuba de cuajar es la protagonista indiscutible dentro del proceso de fabricación del queso. Y es que en su interior es donde ocurre la transformación de la leche en cuajada al añadir el cuajo.

- las cubas suelen consistir en grandes recipientes u ollas en las que se deposita la leche y donde se realizan todas las operaciones de forma automática con el fin de:
 - Homogeneizar el aspecto y sabor del producto final
 - Llevar a cabo producciones de mayor envergadura

Los avances y mejoras que se han incorporado tanto en el diseño como en la configuración de las cubas de sección bi-circular –doble cero-, han permitido mayores rendimientos por la producción de menos finos, una mejor homogeneidad en el calentamiento de la masa y un mejor aislamiento térmico, por ejemplo. Por eso, estas cubas se han ido imponiendo y están sacando del mercado las cubas tipo holandesas (abiertas), ya obsoletas.

Así pues, la progresiva apuesta por las cubas cerradas se ha ido generalizado, en especial para medianas y grandes producciones, ya que son mucho más higiénicas y la cuajada, al no estar condicionada por el ambiente, permite obtener un producto más homogéneo producción tras producción.

Los procesos que tienen lugar en una cuba de cuajar:

- 1- La adición del cuajo, fermentos y otros componentes a la leche
- 2- Corte de la cuajada hasta tamaño de grano adecuado
- 3- Agitación de la mezcla de cuajada y suero para ayudar a la separación y formación del grano de cuajada
- 4- Drenaje de parte del suero
- 5- Calentamiento o enfriamiento (en caso de ser necesario) de la mezcla de la cuajada /suero
- 6- Incorporación de agua para lavado, escaldado o cocción de la cuajada (en caso de ser necesario disminuir la acidificación o requerir que se forme una “piel” en los granos de cuajada)
- 7- Limpieza final automática de la cuba

8.0.1. Elección de equipo:

Existen múltiples empresas que ofrecen cubas de cuajar para el trabajo con biogás.

En este proyecto, se van a analizar cubas ofrecidas por DUECINOX [37] y por LA CASA DEL CHEF [38].

A continuación, se compararán las características principales de distintas cubas, seleccionando la más adecuada con relación a eficiencia, consumo y coste.

1- Duecinox: TCG-300:

Cuba de cocción a gas (GLP) versión PRO con horno aislado y cuba de triple pared, sistema de baño maría con circulación de agua mediante bomba, termostato electrónico, sonda de temperatura del producto. Quemador profesional con encendido electrónico y alarma de fallo de llama con botón de rearme.

- Volumen: **300 l**
- Consumo de gas: **4,2 kg/h**
- Precio: **8.441,0 €** (IVA incluido)
- Garantía: **5 años**

2- Duecinox: TCE-200:

Cuba de cocción cilíndrica provista de triple pared con aislamiento y camisa para la recirculación del agua. Sistema de calentamiento al baño maría eléctrico con resistencias, sistema de enfriamiento de agua con agua a perder y electroválvula.

- Volumen: **300 l**
- Consumo eléctrico: **32A, 7,04 kW**
- Precio: **8.160,0 €**(IVA incluido)
- Garantía: **5 años**

3- La Casa del Chef: SKHCu-300:

SKH-Cu es un hervidor de queso SKH con interior de cobre. Gestión cómoda y sencilla mediante controladores inteligentes. Eficiencia energética.

- Volumen: **300 l**
- Consumo de gas: **4 kg/h**
- Precio: **9.629,0 €**(IVA incluido)
- Garantía: **3 años**

8.0.2 Selección de equipo:

- Se descarta el segundo equipo (Duecinox TCE-200) puesto que consume mucha energía eléctrica.
- Se descarta el ultimo equipo (La casa del chef SKHCu-300) puesto que sale más caro que el primer equipo (Duecinox TCG-300) y con menos años de garantía.
- Se escoge el primer equipo (Duecinox TCG-300) por los motivos mencionados arriba.

Specs \ Modelo	TCG-300	TCE-200	SKHCu-300
Volumen (L)	300	300	300
Consumo de gas (kg/h) O Consumo eléctrico (kW)	4,2	32 A, 7,04 kW	4
Precio (€)	8,441	8,160	9,629
Garantía (años)	5	5	3



Figura 10.1: Duecinox TCG-300

 <p>SINCE 1980</p> <p><small>DUE C INOX s.r.l. Via A. De Gasperi, 1 40126 GUASTALLA (RE) - ITALY Industrial Zone S. GIACOMO Tel. +39 0522 - 831205 Telefax +39 0522 - 832053</small></p> <p><small>Web: www.duecinox.it E-mail: duecinox@duecinox.it Web/F: 0037731004 C.C.I.A.A. n. 348328-B-RE Incr. n. 0798 R.S. 76-B-RE</small></p> <p><small>SUPPLIERS: PROTECTION WELDED TUBES - SANITARY TUBES PIPE FITTINGS - STAINLESS STEEL BENDS AND VALVES PIPE FLOWING FOR THIRD PARTY ACCOUNT</small></p> <p><small>MANUFACTURERS: STAINLESS STEEL MILK PROCESSING AND DAIRY EQUIPMENT VATS - TUBES - TANKS STAINLESS STEEL MANUFACTURING</small></p>	<p>Company details</p> <p>Hussein Mazeh - InterBarco Trading S.L. calle nino Bravo 3 Valencia _E 0 SPAGNAZ</p> <p>P.Iva: 0 CF:</p> <p>E-Mail: hussein.mzh@hotmail.com Tel: 0034663548836</p> <p>Cod. SDI: Cod. ZUC.:</p>	 <p>SINCE 1980</p> <p><small>DUE C INOX s.r.l. Via A. De Gasperi, 1 40126 GUASTALLA (RE) - ITALY Industrial Zone S. GIACOMO Tel. +39 0522 - 831205 Telefax +39 0522 - 832053</small></p> <p><small>Web: www.duecinox.it E-mail: duecinox@duecinox.it Web/F: 0037731004 C.C.I.A.A. n. 348328-B-RE Incr. n. 0798 R.S. 76-B-RE</small></p> <p><small>SUPPLIERS: PROTECTION WELDED TUBES - SANITARY TUBES PIPE FITTINGS - STAINLESS STEEL BENDS AND VALVES PIPE FLOWING FOR THIRD PARTY ACCOUNT</small></p> <p><small>MANUFACTURERS: STAINLESS STEEL MILK PROCESSING AND DAIRY EQUIPMENT VATS - TUBES - TANKS STAINLESS STEEL MANUFACTURING</small></p>	<p>Company details</p> <p>Hussein Mazeh - InterBarco Trading S.L. calle nino Bravo 3 Valencia _E 0 SPAGNAZ</p> <p>P.Iva: 0 CF:</p> <p>E-Mail: hussein.mzh@hotmail.com Tel: 0034663548836</p> <p>Cod. SDI: Cod. ZUC.:</p>																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Place</td><td>Guastalla 42016 RE ITALY</td></tr> <tr><td>Date</td><td>30/03/2022</td></tr> <tr><td>Type</td><td>Offer</td></tr> <tr><td>RE</td><td>TCG300</td></tr> <tr><td>Rif</td><td>CIX P 388 / 2022</td></tr> </table>	Place	Guastalla 42016 RE ITALY	Date	30/03/2022	Type	Offer	RE	TCG300	Rif	CIX P 388 / 2022		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Place</td><td>Guastalla 42016 RE ITALY</td></tr> <tr><td>Date</td><td>30/03/2022</td></tr> <tr><td>Type</td><td>Offer</td></tr> <tr><td>RE</td><td>TCG300</td></tr> <tr><td>Rif</td><td>CIX P 388 / 2022</td></tr> </table>	Place	Guastalla 42016 RE ITALY	Date	30/03/2022	Type	Offer	RE	TCG300	Rif	CIX P 388 / 2022	
Place	Guastalla 42016 RE ITALY																						
Date	30/03/2022																						
Type	Offer																						
RE	TCG300																						
Rif	CIX P 388 / 2022																						
Place	Guastalla 42016 RE ITALY																						
Date	30/03/2022																						
Type	Offer																						
RE	TCG300																						
Rif	CIX P 388 / 2022																						

Note :

Pos	Art.	Description	Qty	Unit Price € Vat Excluded	Total Price € VAT Excluded	Indicative Picture
1	TCG300	Gas cooking vat (LPG) PRO version with insulated furnace and triple-wall tank, bain marie system with water circulation through pump, electronic thermostat, product temperature probe. Professional Burner with electronic ignition and failed flame alarm with reset button Advanced Control Panel with: -Configurable Multiprogram; -Automatic Cooling Management with Electrovalve; -Integrated USB Recorder for Thermal Cycles. Simple agitator (liquids ONLY) with low number of revolutions and lid. Discharge with Butterfly Valve DN100 Nominal Capacity LT 300 Burner Power 35 Kw about Minimum Workable Capacity LT 75	1	7.481,00	7.481,00	
2	O_touch	Touch Screen Panel EVO Touch Screen Control Panel 7" Multiprogram Integrated USB recorder With advanced functions Possibility to upload/download programs with the laptop Real-time graphic of the thermal cycles Storage of the graphics/thermal cycles recorded on USB Intuitive interface, cooling and heating advanced control	1	960,00	960,00	
TOTAL COST € VAT EXCLUDED						68.441,00
Final Note:						

Figura 10.2: Proforma Duecinox TCG-300

9.0 Generación de electricidad

El sistema de cogeneración instalado genera **4,5 kW** de potencia eléctrica.

De acuerdo con los apartados previos, el sistema de cogeneración está en funcionamiento 8.500 horas anuales, sin embargo, la granja necesita electricidad los 365 días del año (iluminación, ventilación, limpieza, ordeño...)

Es imprescindible estimar la electricidad consumida en la explotación para obtener el porcentaje de la electricidad generada que se destina a autoconsumo.

La potencia eléctrica generada en la unidad de cogeneración corresponde a la siguiente producción eléctrica anual:

$$\begin{aligned} & \textit{Energía eléctrica generada} \\ & = 4.5KW \cdot 8500 \textit{ horas/año} = \mathbf{38250} \textit{ kWh/año} \\ & = 4.5KW \cdot 24 \textit{ horas/día} = \mathbf{108} \textit{ kWh/día} \end{aligned}$$

10.0 Estudio económico

En este punto se va a profundizar en el aspecto económico de la instalación de la planta de biogás. Se estudiarán los distintos gastos e ingresos para determinar la viabilidad económica del proyecto.

En primer lugar, se estimará un presupuesto de la instalación completa, seguido del cálculo de la retribución por la energía eléctrica generada inyectada a la red.

Según el presupuesto ofrecido, la planta costaría alrededor de **31.000 \$**.

Este coste incluye todos los componentes de la planta estudiados previamente (biodigestores, tanque de alimentación, tanque de almacenamiento del digestato, unidad de cogeneración, sistema de recuperación de calor, instalación eléctrica, antorcha de emergencia, bombas, tuberías, válvulas...).

A esta cantidad hay que añadir el coste de obra civil: este incluye la mano de obra, preparación del terreno... El coste civil representa aproximadamente **4.000 \$**.

También hay que añadir el coste de envío por barco desde China. El coste marítimo representa aproximadamente **10.000 \$**.

Al coste total de la planta se le añade el coste de la cuba de cuajar. El coste de ese equipo es de **8.800 €** que equivale a **9.680 \$**.

Finalmente se deben tener en cuenta los costes totales de operación y mantenimiento anuales de la planta de biogás.

Basándose en datos ofrecidos por el grupo de cogeneración, estos costes ascienden a aproximadamente **300 \$** anuales.

Con todo esto el coste total de la inversión es de **53.800 \$** iniciales, y además de un coste anual de **300 \$**.

Tal como calculamos antes, la planta generará alrededor de **53,95 m³** de biogás al día que equivale a **108 kWh** eléctricos al día y la maquina lactosa consumirá **12,6 Kg** biogás/día que equivale a **10,5 m³/día** de biogás.

Lo que queda del biogás que es **43,45** m³ al día se suministra a la unidad de CHP para la generación de energía.

Por tanto, la energía eléctrica generada será de **86,9** kWh al día.

Esa energía se consumirá totalmente por los equipos eléctricos dentro de la granja como ventiladores, neveras, equipos de seguridad, cámaras de empleados...

10.2. Ahorro económico en el consumo de electricidad

El cálculo del ahorro económico en el consumo de electricidad, es decir, la electricidad que se deja de comprar a la red para satisfacer las necesidades eléctricas de la explotación requiere los siguientes términos: la energía comprada, el término fijo de potencia, el impuesto eléctrico y el IVA.

Por estar el proyecto en el Líbano, que es un país que importa gasoil desde Arabia Saudí y Rusia, se verá muy afectado por el precio muy alto de la energía.

Ya que **1** kWh de energía incluyendo las tasas y impuestos sale a **0,325** \$. Es un coste que hace que Líbano sea uno de los diez países que más cobran por el kWh.

A continuación, se calcula el coste de la energía consumida al año.

Consumo energía anual:

$$\text{Consumo energía anual} = 108 \text{ kWh/día} \cdot 365 \text{ días/año} = \mathbf{39420} \text{ kWh/año}$$

$$\text{Coste energía} = 39420 \text{ kWh/año} \cdot 0.32 \text{ \$/kWh} = \mathbf{12614} \text{ \$/año}$$

Gracias al autoconsumo de la electricidad generada por el sistema de cogeneración, cada año la explotación reduce sus gastos en aproximadamente

12.614 \$, es decir, **1.052** \$ al mes

10.3 Estudio económico del digestato

Tal como se ha explicado antes, el digestato anaeróbico tiene muchas ventajas y se usa como un fertilizante.

Según el ministerio de agricultura libanes, un kilo del digestato anaeróbico se vende a **0,01 \$**.

$$\begin{aligned} \text{Ganancias por el digestato al día} &= 2435 \frac{\text{kg digestato}}{\text{día}} \cdot 0.01 \text{ \$/Kg digestato} \\ &= \mathbf{24.35 \text{ \$/día}} \end{aligned}$$

Que equivalen a

$$24.35 \text{ \$/día} \cdot 30 \text{ días/mes} = \mathbf{730.57 \text{ \$/mes}}$$

10.4 Estudio económico de la maquinaria lactosa

La granja genera **300** litros de leche al día. El coste de la producción de un litro es de **0,8 \$** tomando en cuenta el coste de la cama de paja y coste de la alimentación de las vacas.

La cuba de quajar se ha comprado por **9.680 \$** para la elaboración de queso de Mozzarella.

Sabiendo que **1** kilo de mozzarella se requiere casi un **7,7 l** de leche, o sea, de cada **100** litros de leche se elabora **13** kilos de queso, se podrá elaborar **39** kilos de queso mozzarella.[39]

Según los precios de Carrefour tienda Beirut [40], un kilo de queso se vende a **9 \$**.

A continuación, se calcula el balance para la producción de queso

$$\text{El coste total de leche} = 300 \frac{\text{Litros}}{\text{día}} \cdot 0.8 \frac{\text{\$}}{\text{litro}} = \mathbf{240 \frac{\$}{\text{día}}}$$

$$\text{Ingresos por la venta de queso} = 39 \frac{\text{Kg queso}}{\text{día}} \cdot 9 \frac{\text{\$}}{\text{Kg queso}} = \mathbf{351 \frac{\$}{\text{día}}}$$

$$\text{Ganancias diarias} = 351 - 240 = \mathbf{111 \text{ \$/día}}$$

$$Ganancias\ mensuales = 111 \frac{\$}{día} \cdot 30 \frac{días}{mes} = 3.333 \$/mes$$

Con todos los cálculos previos, los ingresos mensuales ascienden a la siguiente cantidad

$$Ingresos\ mensuales = 3333 + 730 = 4.063 \frac{\$}{mes}$$

Ahorros mensuales= **1.052** \$/mes

10.5 Viabilidad económica: análisis de rentabilidad

El estudio se lleva a cabo para un período de un año, suponiendo que los ingresos provenientes de la inyección de electricidad a la red se mantienen constantes a lo largo de este periodo.

10.5.1 Pay-Back

El pay-back representa los años que serán necesarios para recuperar la inversión inicial de un proyecto. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} Pay - back &= \frac{Inversión\ inicial\ \$}{Ingresos\ mensuales + Ahorros\ mensuales} \\ &= \frac{54680}{4063 + 1052} = 10,74\ meses \end{aligned}$$

El periodo de recuperación de la inversión es de **10,74** meses si el sistema de cogeneración está en funcionamiento **8.500** horas anuales.

10.6. Conclusiones

Una vez estudiados los distintos indicadores de rentabilidad del proyecto, se obtiene un resultado positivo: **el proyecto es viable económicamente.**

Por tanto, el resultado del estudio económico es favorable a realizar la inversión en este tipo de explotación.

QUOTATION LIST

Date: 2022.3.22
wmb-wj-2022-032-1

Buyer: Country: Spain

contact person: hussein mazeh Email: export@interbarcostrading.com 00-34-677881832

Seller: Hebei Zhaoyang Environmental Technology Co., Ltd (Boselan Tanks Co., Ltd.)

Add: Qianbeijiao village, Guozhuang Town, Wuji county, Shijiazhuang, Hebei, China https://zytank.en.alibaba.com & https://sjzzyzq.en.alibaba.com www.boselan.com

Contact person: Jane Mob: 15373670441 Tel: 86-0311-89690050 Email: Jane@zytank.cn

Name	Item	Specifications	Details	Unit-price (FOB XINGANG IN USD) (Not include Item 6)	QTY	Total amount (FOB XINGANG IN USD) (Not include Item 6)
1.Pretreatment Unit	Artificial grille	0.6x1m	hot-dip galvanized carbon steel	250	1 set	250
	vertical mixer	not standard	Include: Motor, reducer, agitator blade, spindle, carbon steel anticorrosion	1167	1 set	1167
	Electric lifting device	Maximum lifting weight 0.5MT	Carbon steel	333	1 set	333
	feeder pump	4 Kw	Carbon steel	417	2 sets	834
2. Anaerobic digester tank (independent)	Glass fused to steel bolted tank wall	100m ³ φ5.35x4.8m	Including: glass fused to steel plate / Special Titanium alloy for enameled (staining steel) / Panel thickness: 4mm-3mm-3mm-4mm / Panel size: 1250x2500mm Qty: 4 rings 7pcs/ring, total 28pcs / 14pcs of 3x1250x2500mm, 14pcs of 4x1250x2500mm / Zinc coating stirrup for tank wall: 14pcs of ∠75x50x5mm, for tank bottom: 7pcs of ∠100x63x6mm for press membrane: 7pcs of ∠75x50x5mm / Special bolts : M12, 8.8 grade, DACROMET brand and with washers around 2705 sets (This is reference quantity, and it shall be subject to the actual design calculation during delivery) / Special sealant : 570ml/pc, around 120pcs (This is reference quantity, and it shall be subject to the actual design calculation during delivery) / The bar U-ring : 42 pcs, 1pc/ 400mm distance, Hop-dipped galvanized carbon steel material	9967	1 set	9967
	central support	108 Model	1pc, hot-dipped galvanized carbon steel			
	Positive and Negative Pressure Protector	300 model	Including: One Positive Pressure Protector and One Negative Pressure Protector, 304 stainless steel.			
	Man hole	DN600	1 set, hot-dipped galvanized material			
	Technical nozzles		Including: nozzle for biogas pipe, sampling nozzle, nozzle for inlet and outlet pipe etc. Hot Galvanized material.			
	waterproof/sealant for tank bottom		YUHKONG brand waterproof sealant, 2 buckets, (Provide on-line video guidance for construction)			
	Vertical ladder		1 set, hot-dipped galvanized material			
	platform on tank top	width: 800mm	Galvanized checkered plate walkway, hot galvanized guardrail. The length of the platform is L=2m.	700	1 set	700
	Hydraulic circulation mixing system	4kw	Including circulating pump and circulating pipe and supporting brackets. Carbon steel materials.	2667	1 set	2667
	Tank process pipeline		Including: slag discharge, sampling, water outlet, biogas pipeline and pipeline support. Carbon steel material.	1833	1 set	1833

3.Integrated Gas holder	Double membrane gas holder top	30m ³ φ5.35x2.14m	Include: 1 set of Inner membrane and outer membrane (domestic membrane material) / 1 set of Fan control system (Include: fan, supporting air duct, stainless steel air inlet and outlet, stainless steel control cabinet) / 1 set of High quality lacing bolt / 1 set of High quality lacing set / 1 set of Stainless steel watching window / 1 set of Positive pressure protector for outer membrane / PVC materials / Special bolts (M12, 8.8 grade, DACROMET brand and with washers) around 184 sets (This is reference quantity, and it shall be subject to the actual design calculation during delivery) / Special sealant : 570ml/pc, around 120pcs (This is reference quantity, and it shall be subject to the actual design calculation during delivery) / 1 set of Installation accessories (Include: Hole opener, stainless steel pipe clamp, etc)	2467	1 set	2467
4.Purification Unit	desulfurization cans	φ300x1200mm	drain valve, pressure gauge, sight glass. 304 Stainless steel material	250	1 set	250.00
	Desulfurizing agent		ferrous oxide desulfurizer			
	dehydrator	φ219x670mm	Drainage valve, level gauge. 304 Stainless steel material	167	1 set	167
	water sealed tank	φ219x670mm	Drainage valve, level gauge. 304 Stainless steel material	167	1 set	167
	dry fire retarder	DN50	Inner Core Material: Stainless Steel	167	1 set	167
	vortex flowmeter	DN50	On-site display of cumulative and instantaneous flow, stainless steel material	417	1 set	417
5.Other equipment	thermometer		Thermometer	333	2 sets	666
	biogas Electric generator	15kw		6333	1 set	6333
6	Inland freight and cost at harbour and customs	match	From Shijiazhuang city to Xingang port, Tianjin, China for 1*20GP	1333	1 item	1333
7	Tools for assembling		Hoist pole, hand chain block / Electric welding machine, electric hammer, electric drill, electric wrench, angle grinder etc.	233	5 sets	1165
	Cost of assembling		Salary of technician for assembling: usually USD200 per technician per day, it will be calculated particularly based on actual circumstances (it not include traffic charge, charge for room and meal, application charge for Visa)	667	1 set	667
Total amount		US\$31,550.00				
FOB Xingang, China						
						Thirty-one thousand five hundred and fifty US dollars

Remarks:

Shipment: need around 1*20GP container

Standard: Unless otherwise specified all parts of tank in this quotation list are according to Chinese standard

The amount in this quotation list does not include: 1. installation charge, 2. charge for keeping warm outside tank, 3. charge for civil engineering etc.

Mode of payment: The contract will go into effect after seller receiving 30% prepayment, and the delivery will take place within 2 days after receiving the remaining 70% payment.

Date of delivery: Forty working days after contract taking effect

Guarantee period: One year

Valid date: This quotation is valid for 10 days

Figura 10.3: Proforma maquinaria de la planta de biogás.

11.0 Restricciones

A continuación, se va a mencionar unas restricciones que el proyecto ha tenido que cumplir por varios motivos.

- Por ser la potencia generada menor de **10 kW**, no se podrá instalar otro biodigestor de manera que el digestato que sale del primer digestor vuelve a fermentarse dentro del segundo digestor para aprovechar al máximo la energía del digestato aumentando así la producción de biogás.
- Por ser la potencia generada menor de **10 kW**, la cámara de retención de gas tiene que ser integrada en el biodigestor.
- Por ser la potencia generada menor de **100 kW**, no se va a separar el metano del resto de componentes del biogás.

12.0 Mejoras del proceso

El objetivo de este apartado es proponer distintas mejoras para optimizar la producción de biogás en la planta. De esta forma mejoraría la eficiencia de la instalación, reduciendo así el periodo de amortización de la misma, e incrementando los ingresos provenientes de la inyección de energía eléctrica a la red.

- 1- En primer lugar, se propone estudiar la posibilidad de llevar a cabo una codigestión de más de un sustrato en los digestores. Para optimizar la producción de biogás se mezclaría el estiércol obtenido en la granja con otro sustrato proveniente de otro tipo de industria que tenga a su vez un alto potencial de generación de biogás.
- 2- Sin llegar a ser una mejora, una alternativa a la generación de electricidad es procesar el biogás obtenido a calidad de gas natural para inyectarlo a la red de gas existente.
- 3- Para este proceso se requiere una instalación específica de purificación del biogás en la cual se elimina prácticamente la totalidad del dióxido de carbono contenido en el biogás.
- 4- El gas obtenido contiene un porcentaje de metano superior al **97%**. En este caso la energía térmica resultante también se recupera en un circuito de recuperación para calentar los digestores y facilitar la digestión anaerobia.

Estas son algunas de las múltiples mejoras que se pueden llevar a cabo en una instalación de este tipo.

13.0 Bibliografía

- [1]: 'Design and Optimization of Biogas Energy Systems'. ISBN: 978-0-12-822718-3 British Library Cataloguing-in-Publication Data
- [2]: 'Design and Optimization of Biogas Energy Systems'. ISBN: 978-0-12-822718-3 British Library Cataloguing-in-Publication Data
- [3]: Angelidaki, I., Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants; status and future trends. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109 (1-3), 95-106.
- [4]: Parawira, W., Murto, M., Read, J.S., Mattiasson, B. (2005). Profile of hydrolases and biogas production during two-stage mesophilic anaerobic digestion of solid potato waste. *Process Biochemistry*, 40 (9), 2945-2952.
- [5]: Garcia-Heras, J.L. (2003). Reactor sizing, process kinetics and modelling of anaerobic digestion of complex wastes. Ed. Mata-Alvarez, *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*, IWA, UK, pp. 21-58.
- [6]: Schink, B. (1997). Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61 (2), 262-280.
- [7]: Angelidaki, I., Ellegaard, L., Sorensen, A.H., Schmidt, J.E. (2002). Anaerobic processes. In: Angelidaki I, editor. *Environmental biotechnology*. Institute of Environment and Resources. Technical University of Denmark (DTU). pp. 1-114
- [8]: Vavilin, V.A., Rytov, S.V., Lokshina, L.Y. (1996). A description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter. *Bioresource Technology*, 56 (2-3), 229-237.
- [9]: Schink, B. (1997). Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61 (2), 262-280.
- [10]: Schink, B. (1997). Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61 (2), 262-280.
- [11]: Klass, D.L. (1984). Methane from anaerobic fermentation. *Science*, 223 (4640), 1021- 1028.

- [12]: Schink, B. (1997). Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61 (2), 262-280.
- [13]: Boe, K. (2006). Online monitoring and control of the biogas process. Institute of Environment and Resources, Technical University of Denmark (DTU). Ph.D. Thesis.
- [14]: Boe, K. (2006). Online monitoring and control of the biogas process. Institute of Environment and Resources, Technical University of Denmark (DTU). Ph.D. Thesis.
- [15]: Kayhanian, M., Rich, D. (1995). Pilot-scale high solids thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste with an emphasis on nutrient requirement. *Biomass and Bioenergy*, 8 (6), 433-444.
- [16]: Cresson, R., Carrere, H., Delgenes, J.P., Bernet, N. (2006). Biofilm formation during the start-up period of an anaerobic biofilm reactor—Impact of nutrient complementation. *Biochemical Engineering Journal*, 30, 55-62.
- [17]: Boe, K. (2006). Online monitoring and control of the biogas process. Institute of Environment and Resources, Technical University of Denmark (DTU). Ph.D. Thesis.
- [18]: Hwang, M.H., Jang, N.J., Hyum, S.H., Kim, I.S. (2004). Anaerobic bio-hydrogen production from ethanol fermentation: the role of pH. *Journal of Biotechnology*, 111 (3), 297-309
- [19]: Horiuchi, J., Shimizu, T., Tada, K., Kanno, T., Kobayashi, M. (2003). Selective production of organic acids in anaerobic acid reactor by pH control. *Bioresource Technology*, 82 (3), 209-213.
- [20]: Lay, J.J., Li, Y.Y., Noike, T. (1997). Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Research*, 31 (6), 1518- 1524.
- [21]: Pind, P.F., Angelidaki, I., Ahring, B.K. (2003). A new VFA sensor technique for anaerobic reactor systems. *Biotechnology and Bioengineering*, 82 (1), 54-61.
- [22]: Björnsson, L. (2000). Intensification of biogas process by improved process monitoring and biomass retention. Department of Biotechnology, Lund University. Ph.D. Thesis.
- [23]: Russell, J.B., Diez-Gonzalez, F. (1997). The effects of fermentation acids on bacterial growth. *Advances in Microbial Physiology*, 39, 205-234.

- [24]: Stamatelatou, K., Lyberatos, G., Tsiligiannis, C., Pavlou, S., Pullammanappallil, P., Svoronos, S.A. (1997). Optimal and suboptimal control of anaerobic digesters. *Environmental Modeling and Assessment*, 2, 355-363.
- [25]: McCarthy, P.L., McKinney, R.E. (1961). Salt Toxicity in Anaerobic Digestion, *Journal of Water Pollution Control Federation*, 33, 399-408.
- [26]: He, P.J., Lü, F., Shao, L.M., Pan, X.J., Lee, D.J. (2006). Effect of alkali metal cation on the anaerobic hydrolysis and acidogenesis of vegetable waste. *Environmental Technology*, 27 (3), 317-327.
- [27]: Kugelman, I.J., McCarty, P.L. (1965). Cation toxicity and stimulation in anaerobic waste treatment. *Journal of Pollution Control Federation*, 37, 97-116.
- [28]: Bruni, E. (2010). Online improved anaerobic digestion of energy crops and agricultural residues. Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark (DTU). Ph.D. Thesis.
- [29]: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cogeneraci%C3%B3n>
- [30]: “Dimensionamiento, Diseño y Construcción de Biodigestores y Plantas de Biogás” (edición Aqualimpia Engineering e.K)
- [31]: “*Guía de Implementación de Sistemas de Biogás*” de la Unidad de planeación minero-energética de la UPME.
- [32]: <https://www.intechopen.com/chapters/62959>
- [33]: <https://www.climate-policy-watcher.org/wastewater-sludge/physical-and-biological-properties.html#:~:text=The%20density%20of%20primary%20sludge,1.2%20to%201.4%20g%2F%20cm3>
- [34]: https://en.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protocol
- [35]: <https://helbio.com/5-kw-combined-heat-and-power-system-chp/>
- [36]: <http://www.biogas-chp.co.uk/wp-content/uploads/2017/03/UFL-micro-biogas-CHPs.pdf>
- [37]: <https://www.duecinox.it/index-EN.asp>
- [38]: <https://lacasadelchef.net/>

[39]: [https://www.businessinsider.com/italian-mozzarella-cheese-factory-braiding-curd-milk-bari-puglia-italy-2017-](https://www.businessinsider.com/italian-mozzarella-cheese-factory-braiding-curd-milk-bari-puglia-italy-2017-4#:~:text=It%20takes%20around%2010%20kg,make%201%20kg%20of%20mozzarella.)

4#:~:text=It%20takes%20around%2010%20kg,make%201%20kg%20of%20mozzarella.

[40]: <https://www.carrefourlebanon.com/maflbn/en/v4/search?keyword=cheese>