



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

**Aprovechamiento energético del biogás generado en una
explotación de ganado bovino en el Principado de
Asturias.**

Autor: Víctor García Santos

Tutora: Laura Faba Peón

Oviedo, Julio de 2023



RESUMEN

En el camino hacia la transición energética, los gases obtenidos a partir de materias primas renovables se alzan como una solución para alcanzar los objetivos climáticos propuestos para España para el año 2030. Unos objetivos que pretenden conseguir la reducción de la dependencia energética, la descarbonización de la energía y el desarrollo de nuevos vectores energéticos de origen renovable, entre otros.

España cuenta con un gran potencial para el desarrollo de la producción de biogás agroindustrial mediante la digestión anaerobia de los residuos orgánicos procedentes de la actividad ganadera, agrícola y de la industria alimentaria. Asimismo, mediante la valoración energética de los residuos, se fomenta la economía circular y la protección del medio ambiente mediante una gestión más eficiente y segura de los residuos y la reducción de las emisiones de metano a la atmósfera (componente mayoritario del biogás).

En el presente Trabajo Fin de Máster se abordará, de forma preliminar, la implantación de una planta de biogás en una explotación intensiva de ganado vacuno en el Principado de Asturias. El objetivo será aprovechar el biogás generado a partir de las deyecciones animales generadas para garantizar, mediante su combustión, el autoabastecimiento energético de la explotación. Esta alternativa permitirá reducir los gastos energéticos de la explotación y conseguir la estabilización de los purines de forma que su vertido sea respetuoso con el medio ambiente.

Para ello, se expondrán en primer lugar los fundamentos de la digestión anaerobia enumerando los diferentes parámetros que afectan al proceso. Se diseñará el tratamiento anaerobio definiendo el régimen y temperatura de funcionamiento, así como la configuración del sistema y el tipo de digestor a utilizar. Para el diseño del digestor se emplearán ecuaciones matemáticas que permitirán definir los parámetros de diseño teniendo en cuenta las condiciones de operación. Por último, se analizará el potencial energético del biogás generado y se estudiará su aprovechamiento en la explotación.



ABSTRACT

On the path towards energy transition, renewable gases emerge as a solution to achieve the climate objectives proposed for Spain by 2030. These objectives aim to reduce the energy dependence, decarbonize the energy sector, and develop new renewable energy sources, among others.

Spain has great potential for the development of agro-industrial biogas production through anaerobic digestion of organic waste from livestock, agricultural, and the food industry. Additionally, by utilizing waste for energy valorization, it promotes circular economy and the environmental protection through more efficient and secure waste management as well as reducing methane emissions into the atmosphere (the main component of biogas).

This Master's Thesis will address with the preliminary implementation of a biogas plant in a semi-intensive cattle farm in the Principado de Asturias. The objective will be to harness the biogas generated from the animal manure to ensure energy self-sufficiency through its combustion on the farm. This alternative will reduce energy expenses for the operation and achieve the stabilization of manure, enabling environmentally friendly disposal practices.

To accomplish this, the fundamentals of anaerobic digestion will be presented, listing the different parameters that affect the process. The anaerobic treatment will be designed defining the operating regime and temperature as well as the system configuration and the type of digester to be used. Mathematical equations will be employed for digester design, defining the design parameters considering the operating conditions. Lastly, the energy potential of the biogas generated will be analyzed, studying its utilization on the farm.



ÍNDICE

1.	Introducción.....	1
1.1.	Situación actual del biogás en España	2
1.2.	El futuro del biogás en España	3
2.	Biogás como fuente de energía renovable.....	4
2.1.	Características del biogás.....	5
2.2.	Usos del biogás	6
2.3.	Producción de biogás. Digestión anaerobia.....	7
2.3.1.	Etapas de la digestión anaerobia.....	7
2.3.2.	Parámetros que afectan a la digestión anaerobia	9
2.3.2.1.	Parámetros ambientales.....	10
2.3.2.2.	Parámetros operacionales.....	11
2.3.3.	Otros aspectos importantes en la digestión anaerobia	14
2.3.4.	Tecnologías de digestión anaerobia.....	15
3.	Propuesta de implantación de una planta de biogás	18
3.1.	Localización.....	18
3.2.	Descripción general de las instalaciones existentes.....	19
3.3.	Caracterización del purín empleado	20
3.4.	Descripción general de la planta de biogás.....	22
3.4.1.	Ubicación.....	22
3.4.2.	Equipamiento principal.....	23



4.	Metodología de cálculo	27
4.1.	Producción diaria de purín	27
4.2.	Funcionamiento de la planta de biogás	28
4.3.	Parámetros de diseño del proceso de digestión anaerobia	30
4.4.	Necesidades energéticas de la explotación	33
4.5.	Selección del grupo de cogeneración.....	35
4.6.	Cálculo de la inversión inicial de la planta	37
5.	Conclusiones.....	39
6.	Bibliografía.....	41
	ANEXO I.....	44
1.	Cálculo de la producción diaria de purín generado	45
2.	Desarrollo del modelo de Chen y Hassimoto para la digestión anaerobia	45
3.	Aplicación del modelo.....	52
4.	Cálculo de las necesidades energéticas de la instalación	58
5.	Selección del grupo de cogeneración	63
6.	Cálculo de la inversión inicial de la planta.....	65
	ANEXO II	66
1.	Ficha técnica del grupo de cogeneración.....	67
	ANEXO III	68



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Instalaciones productoras de biogás en España. Adaptado de (CNAE, 2009)	2
Figura 2 Número de instalaciones productoras de biometano en Europa en 2022. (European Biogas Association, 2022).....	3
Figura 3 Formas de aplicación del purín en el terreno. (Google Imágenes, 2023)	5
Figura 4 Fases de la fermentación anaerobia. (GIRO Centro Tecnológico, 2023)	9
Figura 5 Velocidad específica del crecimiento de las bacterias metanogénicas respecto a la temperatura. (Llata, A, (2020).....	12
Figura 6 Diagrama de flujo de un digester de mezcla completa. (Situación y potencial de generación de biogás, 2011).....	16
Figura 7 Diagrama de flujo de un digester de flujo pistón. (Situación y potencial de generación de biogás, 2011).....	17
Figura 8 Localización de la explotación ganadera. Adaptado de (Google Maps, 2023).....	19
Figura 9 Naves ganaderas de la explotación. Adaptado de (Google Maps, 2023).....	19
Figura 10 Ubicación de la planta. Adaptado de (Google Maps, 2023)	23
Figura 11 Esquema de funcionamiento de la planta de biogás. (Elaboración propia).	28
Figura 12 Producción volumétrica de gas y porcentaje de depuración respecto al tiempo de retención hidráulico. (Elaboración propia).....	31
Figura 13 Sección de la pared del reactor. (Elaboración propia).	35
Figura 14 Grupo de cogeneración MC 30-60. (Crasli Energy, 2023).	37
Figura 15 Inversión inicial de una planta de biogás. (Universidad de Cataluña y Naturgy, 2019).....	38



Figura 16 Esquema del reactor con los parámetros que definen el balance de masas. (Fernández, ,2016).....	46
Figura 17 Producción volumétrica de gas y porcentaje de depuración respecto al tiempo de retención hidráulico. (Elaboración propia).....	53
Figura 18 Dimensiones del reactor biológico. (Elaboración propia).....	54
Figura 19 Sección de la pared del reactor. (Elaboración propia)	60
Figura 20 Inversión inicial de una planta de biogás. (Universidad de Cataluña y Naturgy, 2019).....	65



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición promedio del biogás. (MAPA, 2010).....	5
Tabla 2 Composición química promedio de un purín de ganado vacuno. (B. Haroon et al., 2018).....	21
Tabla 3 Parámetros químicos de un purín de ganado vacuno. (Blanco, L., 2016).....	21
Tabla 4 Ecuaciones y parámetros del modelo de Chen y Hashimoto. (Elaboración propia)	30
Tabla 5 Parámetros de diseño del digestor anaerobio. (Elaboración propia)	32
Tabla 6 Potencia total instalada en la explotación ganadera. (Elaboración propia)	33
Tabla 7 Características técnicas del grupo de cogeneración MC 30-60. (Elaboración propia)	36
Tabla 8 Parámetros de partida para el cálculo del digestor. (Elaboración propia).	52
Tabla 9 Tabla resumen con los parámetros de diseño obtenidos (Elaboración propia)	56
Tabla 10 Potencia total instalada en la explotación ganadera. (Elaboración propia).	58
Tabla 11 Conductividades térmicas de las capas del reactor. (García, E. 2017).....	61
Tabla 12 Coeficiente de convección de calor. (García, E. 2017)	62
Tabla 13 Características técnicas del grupo de cogeneración MC 30-60. (Elaboración propia)	64



1. Introducción

La producción de biogás a partir de la descomposición anaerobia de los residuos orgánicos supone un claro ejemplo de impulso de la economía circular. El beneficio que se obtiene es doble al contribuir conjuntamente al aprovechamiento energético de los residuos y a la mejora de la gestión medioambiental de los mismos.

Desde el punto de vista energético, el biogás obtenido se alza como una solución más para alcanzar los objetivos de descarbonización establecidos por la Unión Europea para el horizonte 2030-2050. El biogás constituye una fuente de energía 100% renovable destinada a contribuir en la supresión de los combustibles fósiles y a reducir de forma significativa las emisiones de gases de efecto invernadero.

Adicionalmente, en los últimos años se ha experimentado un importante crecimiento de la ganadería intensiva en España lo que ha supuesto un aumento en la generación de purines. Este incremento ha dificultado la gestión de los mismos debido a los problemas ambientales derivados del uso excesivo de purín como fertilizante agrícola. Además, se han endurecido las normativas ambientales limitando la aplicación del purín en determinadas zonas con cierto riesgo medioambiental.

Conjuntamente, el tratamiento de los purines con fines energéticos, ofrece a las explotaciones ganaderas la posibilidad de autoabastecerse de energía reduciendo así sus gastos. Ofrece una oportunidad para la reactivación económica de las zonas rurales y una alternativa para evitar el despoblamiento de estas zonas mediante la creación de empleo y el asentamiento de la población.



1.1.Situación actual del biogás en España

España es reconocida por la Unión Europea como el tercer país con mayor potencial de producción de biogás, después de Francia y Alemania (Genia Bioenergy, 2023). Dicha consideración viene derivada de la gran cantidad de materia prima disponible susceptible de ser revalorizada energéticamente. Según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), en España se producen anualmente 130 millones de toneladas de estiércoles y purines, 7 millones de residuos alimentarios y 11 millones de toneladas de residuos agrícolas y forestales (MAPA, 2023).

Según los datos disponibles en el registro administrativo de instalaciones de energía eléctrica (PRETOR) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, actualmente en España se produce biogás en 146 instalaciones (MITECO, 2023). Sin embargo, según los datos reflejados en la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) únicamente 13 plantas pertenecen al sector agropecuario lo que supone un 10% de las instalaciones. En la Figura 1 se ilustra el reparto por sectores de las diferentes instalaciones generadoras de biogás.

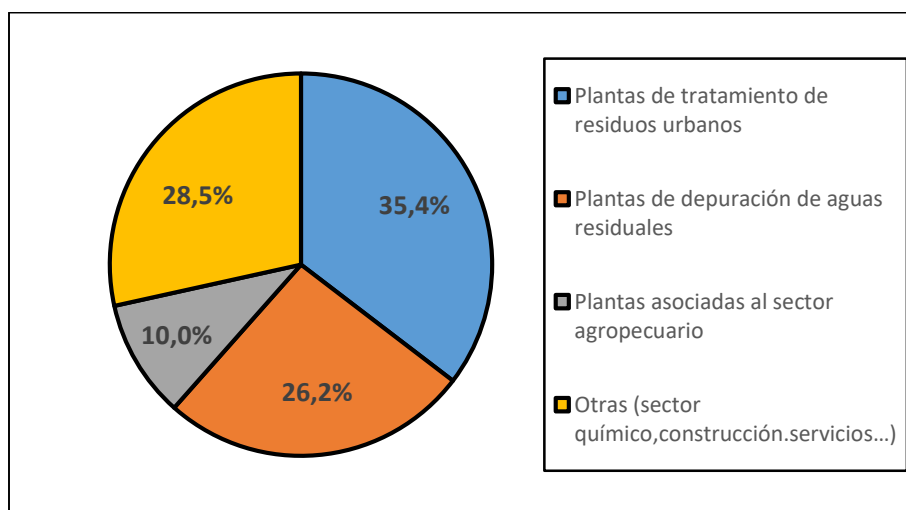


Figura 1: Instalaciones productoras de biogás en España. Adaptado de (CNAE, 2009)

1.2.El futuro del biogás en España

A pesar del gran potencial de materia prima disponible para producir biogás, España ha experimentado en los últimos años un desarrollo más modesto que el resto de los países de Europa, tal y como se puede observar en la Figura 2. Por este motivo, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 establece, a través de la Hoja de Ruta del Biogás, un objetivo mínimo de producción de biogás de 10,41 TWh anuales en 2030 (Hoja de Ruta del Biogás, 2022). Esto supondrá incrementar la producción de biogás en más de un 26% respecto a los datos obtenidos en 2020 (Hoja de Ruta del Biogás, 2022).

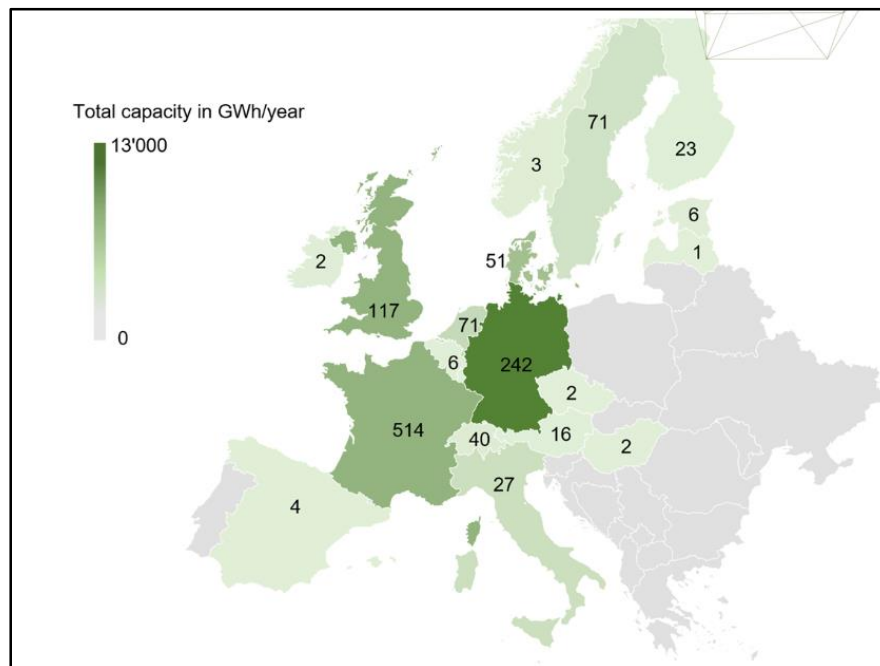


Figura 2 Número de instalaciones productoras de biometano en Europa en 2022. (European Biogas Association, 2022)

Es por ello que España se ha comprometido a cumplir durante los próximos años una serie de hitos relacionados con el desarrollo y el diseño de mecanismos que permitan impulsar la



producción de biogás. Medidas destinadas a promover la I+D+i para impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías y a favorecer la inversión en este tipo de proyectos de empresas e industrias partícipes en la cadena de valor del biogás (principalmente empresas e industrias del sector ganadero, agroindustrial, agrícola o de la gestión de residuos).

2. Biogás como fuente de energía renovable

El biogás es una fuente de energía renovable e inagotable obtenida a partir de la descomposición biológica anaerobia (sin oxígeno) de materia orgánica. Este proceso se lleva a cabo en unos tanques o biodigestores en los que los desechos son descompuestos por la acción de microorganismos ayudados de calor.

El resultado de este proceso es la formación de biogás, una mezcla de diferentes gases, mayoritariamente metano y dióxido de carbono, cuya composición varía según el sustrato que se utilice y la tecnología empleada para su obtención.

Además del gas, se genera un subproducto estabilizado denominado digestato que posee importantes propiedades fertilizantes debido a su alto contenido en nutrientes. Esto hace que pueda ser empleado en beneficio de la agricultura o para la mejora ecológica de los suelos (Hoja de Ruta del Biogás, 2022). La aplicación del digestato en el terreno debe realizarse siguiendo la Ley 7/2022 de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular y dentro de los límites establecidos por el Real Decreto 47/2022 sobre la protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.

En la Figura 3 se puede observar diferentes formas de aplicación del purín en el terreno. En la imagen izquierda por rociado y en la imagen derecha por inyección directa en el terreno.



Figura 3 Formas de aplicación del purín en el terreno. (Google Imágenes, 2023)

2.1. Características del biogás

Como se expuso anteriormente, la composición del biogás generado dependerá principalmente de las características del sustrato empleado como materia prima y la tecnología empleada para su obtención. De forma general, la composición promedio del biogás se recoge en la Tabla 1.

Tabla 1 Composición promedio del biogás. (MAPA, 2010)

Gas	Composición media
Metano (CH ₄)	50-75 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	20-45 %
Hidrógeno (H ₂)	0-3 %
Nitrógeno (N ₂)	1-5 %
Oxígeno (O ₂)	0,1-1 %
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0,1-0,5 %
Otros (siloxanos, partículas...)	<0,05 %



Debido a su elevado contenido en metano, hace que el biogás tenga un importante poder calorífico promedio. Se considera que para un biogás con una composición del 60% en metano, su poder calorífico inferior es de aproximadamente 5500 kcal/Nm³ lo que supone un 50% menos que el poder calorífico del gas natural (OCCSan, 2023).

2.2. Usos del biogás

El biogás ofrece diferentes alternativas para su aprovechamiento energético. La Hoja de Ruta del Biogás establece los siguientes usos (MITECO, 2022):

- Biogás para uso térmico: desde el punto de vista de la eficiencia energética y de la viabilidad económica, requiere que el punto de producción de la materia prima y el punto de consumo se encuentren muy próximos. Es frecuente en industrias del sector agroalimentario y en explotaciones ganaderas.
- Biogás para uso eléctrico o cogeneración: es el uso más extendido en España. Requiere de motores de combustión interna o turbinas para generar electricidad.
- Biogás para uso en transporte: puede ser empleado por determinados vehículos (por ejemplo, maquinaria agrícola). Sin embargo, para poder ser utilizado es necesario purificarlo mediante la eliminación del agua, la separación del dióxido de carbono y la eliminación de determinadas partículas. De esta forma, se obtiene el biometano, un gas con propiedades y aplicaciones similares al gas natural.
- Biogás para uso como materia prima: ofrece la posibilidad de ser empleado como recurso para obtener otras fuentes de energía con un elevado valor añadido como puede ser el hidrógeno renovable, el metanol o el gas natural licuado.



2.3. Producción de biogás. Digestión anaerobia

El proceso biológico que permite la obtención de biogás a partir de materia orgánica es la digestión anaerobia o biometanización. Es un proceso que puede llevarse a cabo en medio seco o en medio húmedo según la naturaleza del sustrato empleado. La digestión anaerobia en medio seco se emplea cuando la materia prima contiene entre el 20 y el 40% de materia orgánica mientras que la digestión por vía húmeda se emplea para residuos con un porcentaje entre el 10 y el 20% de materia orgánica (Situación y potencial de generación de biogás, 2011).

La descomposición de la materia biodegradable o sustrato se lleva a cabo en cuatro etapas donde los residuos iniciales se degradan de manera progresiva por la acción de diferentes microorganismos. Estas etapas son la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

2.3.1. Etapas de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia sucede en el interior de un reactor biológico en el que se producen diferentes procesos complejos de sintetización basados en reacciones bioquímicas en las que participan gran cantidad de microorganismos.

El proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica se puede simplificar en cuatro etapas consecutivas (Manual de biogás, 2011):

- **Hidrólisis:** supone la primera fase de la descomposición anaeróbica. Es llevada a cabo por bacterias hidrolíticas que rompen las moléculas de cadena larga presentes en la materia orgánica. De esta forma, las estructuras moleculares complejas, como glúcidos o lípidos se fragmentan en estructuras más cortas dando lugar a azúcares, aminoácidos, alcoholes y ácidos grasos.



- Acidogénesis: durante la hidrólisis se forman una serie de productos orgánicos intermedios como el ácido propiónico o butírico que, por la acción de las bacterias acidogénicas, son sintetizados en ácido acético y en gases como el CO_2 o H_2 que serán utilizados por las bacterias metanogénicas. Además de producir el alimento de las bacterias que actúan posteriormente, las bacterias acidogénicas son las encargadas de eliminar cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema.
- Acetogénesis: en esta etapa las bacterias homoacetogénicas se encargan de consumir el ácido acético y transformarlo en productos más sencillos como es el hidrógeno.
- Metanogénesis: las bacterias metanogénicas pueden ser consideradas como las más importantes dentro del conjunto de bacterias anaerobias. Son las responsables de la formación del metano y de la eliminación del medio de los productos generados en las etapas posteriores. Por un lado, las bacterias metanogénicas hidrogenófilas consumen H_2 y CO_2 y las bacterias metanogénicas acetoclasticas consumen el acetato completando así el proceso de digestión anaerobia.

En la Figura 4 se puede observar, de forma esquematizada, las diferentes etapas de la digestión anaerobia, así como las bacterias encargadas de llevar a cabo dichas transformaciones.

Las fases de la digestión anaerobia se diferencian por la velocidad de crecimiento de los microorganismos y también por la sensibilidad del proceso a compuestos inhibidores como puede ser el grado de acidez o la presencia de sustancias inhibidoras como disolventes o metales pesados entre otros.

Esto implica que cada etapa tendrá una velocidad de reacción diferente que dependerá de la composición del sustrato y del equilibrio del proceso con el fin de evitar la acumulación de compuestos inhibidores que puedan impedir el crecimiento poblacional de las bacterias.

La velocidad del proceso quedará limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual dependerá de la composición de cada residuo. Para reducir los tiempos de residencia del

sustrato y aumentar la producción de biogás es importante llevar a cabo diferentes pretratamientos del sustrato que aumenten su biodegradabilidad.

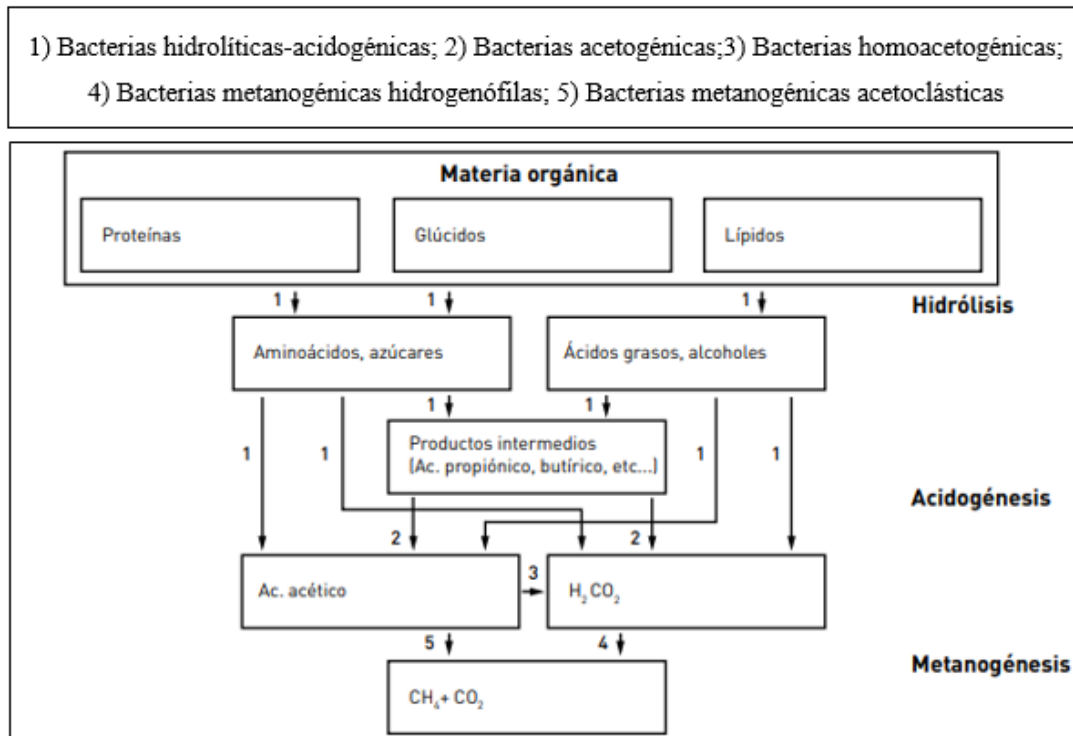


Figura 4 Fases de la fermentación anaerobia. (GIRO Centro Tecnológico, 2023)

2.3.2. Parámetros que afectan a la digestión anaerobia

Al tratarse de un proceso complejo, la digestión anaerobia debe llevarse a cabo bajo unas condiciones operativas que favorezcan la proliferación de los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica. Por ello, es importante monitorear de forma periódica estos parámetros para conocer en todo momento la evolución del proceso y actuar en caso de que sea necesario para que el sistema se encuentre en equilibrio dinámico.

Existen parámetros ambientales y operacionales que pueden influir en el desarrollo del proceso.



2.3.2.1. Parámetros ambientales

Estos parámetros deben controlarse y mantenerse durante el desarrollo del proceso. Estos son:

- Relación C/N: el carbono y el nitrógeno son la principal fuente de alimentación de los microorganismos metanogénicos por lo que influirán en la producción de biogás. Además, estos nutrientes deben encontrarse en unas proporciones adecuadas para evitar la inhibición del proceso por falta de nitrógeno o la inhibición de éste por la formación de amonio (exceso de nitrógeno). Se considera que la proporción de carbono debe ser entre 20 y 30 veces mayor que la proporción de nitrógeno (GIRO Centro Tecnológico, 2023). Una forma de equilibrar la relación C/N es mezclar diferentes residuos con relaciones nutricionales diferentes (codigestión).
- Sustancias inhibidoras: la concentración de estas sustancias debe estar limitada para impedir que el proceso se vea afectado. Algunas de estas sustancias inhibidoras ingresan al digestor con el sustrato (metales pesados, desinfectantes, sales...) y otras se forman durante la degradación (amoníaco, ácidos grasos y sulfuros) (GIRO Centro Tecnológico, 2023).
- pH: la acidez del medio tiene gran influencia en la fermentación anaerobia. Aunque cada tipo de bacteria posee su propio pH óptimo, cuando el proceso consta de una sola etapa, el rango de operación estará cercano a la neutralidad, entre 6,8 y 8 (Xavier Flotats & Sarquella, 2008). Dicho rango debe mantenerse durante el proceso para evitar desequilibrios que afecte a la actividad de los microorganismos. Para ello puede ser necesario aportar NaOH o HCl para regular el pH según se requiera bajar o subir la acidez.



2.3.2.2. Parámetros operacionales

Estos parámetros hacen referencia las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso en el interior de los reactores biológicos. Estos son:

- Temperatura: existen tres tipos de digestiones según el rango de temperatura a la que se producen. Cuanto mayor sea la temperatura de operación mayor será la velocidad de crecimiento de las bacterias, mayor será la tasa de fermentación y mayor será la producción de biogás. Sin embargo, temperaturas demasiado elevadas pueden inhibir el proceso por la aparición de amoníaco.

Los intervalos de temperatura más empleados son:

- Intervalo psicrófilo ($T^a < 20^{\circ}\text{C}$): trabaja a temperatura ambiente por lo que no necesita aporte de calor. El coste de producción será menor, pero al disminuir la tasa de crecimiento de los microorganismos la producción de biogás también será menor. (Situación y potencial de generación de biogás, 2011).
- Intervalo mesofílico ($35\text{-}40^{\circ}\text{C}$): es aplicable en cualquier tipo de digestor y es habitual en plantas de biogás individuales que empleen sustratos agroindustriales. Este rango de temperatura es aplicable cuando existe riesgo de inhibición por amoníaco (como es el caso de la digestión de deyecciones ganaderas). Las plantas que operan con estas temperaturas se caracterizan por conseguir producciones de gas relativamente altas, por garantizar la estabilidad del proceso y poseer una mayor tolerancia a cualquier cambio de temperatura (Situación y potencial de generación de biogás, 2011).
- Intervalo termofílico ($55\text{-}60^{\circ}\text{C}$): a igual tiempo de permanencia del sustrato en el reactor, la producción de biogás por unidad de volumen de digestor es mayor que en el rango mesofílico. Esto es debido a que con el aumento de la temperatura se favorece la etapa de metanogénesis, aumentando así la velocidad de crecimiento de las bacterias y con ello la velocidad de producción de biogás. Es aplicable cuando no existe riesgo de inhibición por amoníaco y permite conseguir una



mejor higienización del residuo (Situación y potencial de generación de biogás, 2011).

En la Figura 5 se puede observar cómo aumenta la velocidad específica máxima de crecimiento ($\mu_{\text{máx}}$) de las bacterias metanogénicas a medida que aumenta la temperatura de operación del reactor.

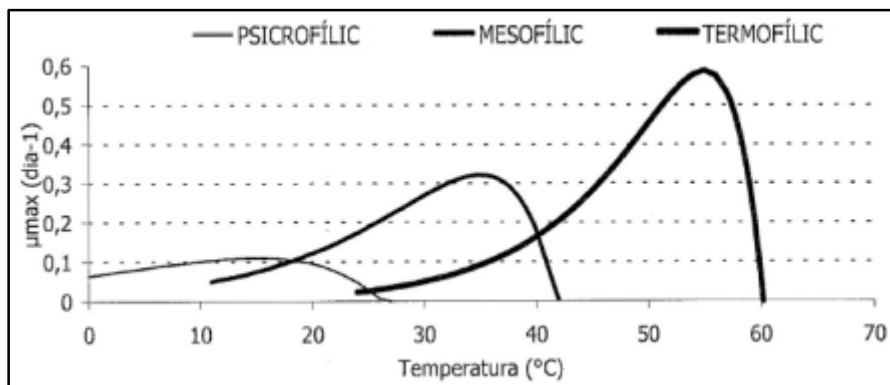


Figura 5 Velocidad específica del crecimiento de las bacterias metanogénicas respecto la temperatura. (Llata, A, (2020)

- **Agitación:** es necesaria para mezclar y homogeneizar los microorganismos con la materia fresca, conseguir una temperatura uniforme en todo el reactor, evitar la sedimentación y evitar la formación de espumas (comunes en el tratamiento de purines). El agitado debe realizarse a una velocidad moderada para conseguir que las partículas se mantengan en suspensión, pero sin provocar la destrucción de los agregados de bacterias. Existen varios tipos de mezclado, siendo los más utilizados los agitadores rotatorios de paletas. (Manual de biogás, 2011).
- **Tiempo de retención hidráulico (θ):** se define como el cociente entre el volumen del reactor y el caudal de tratamiento. Indica el periodo de tiempo que permanece la mezcla de los purines en el interior del reactor hasta que son descargados. Este parámetro está



relacionado con la naturaleza del sustrato y la temperatura de operación (Manual de biogás, 2011). Se define mediante la ecuación (1):

$$\theta = \frac{V_r}{Q} \quad (1)$$

Donde:

V_r : volumen del reactor [m^3].

Q : caudal de tratamiento [$m^3/día$].

- Velocidad de carga orgánica (VCO): es la cantidad de materia orgánica introducida en el reactor por unidad de volumen y tiempo. Indica la cantidad de sólidos volátiles que se introducen en el digestor por unidad de volumen y tiempo (Manual de biogás, 2011). Debe buscarse un valor óptimo que dependerá de cada planta y del residuo a tratar. Valores bajos de VCO indican baja concentración de materia orgánica en el sustrato o un elevado tiempo de retención hidráulico y por el contrario valores elevados de VCO indican baja producción de biogás por unidad de materia orgánica introducida en el reactor. Se calcula mediante la ecuación (2):

$$VCO = \frac{Q \times S_o}{V_r} \quad (2)$$

Donde:

V_r : volumen del reactor [m^3].

S_o : concentración de materia orgánica [$kg\ SV/m^3$].

Q : caudal de tratamiento [$m^3/día$].

Los valores más comunes de VCO para conseguir la mayor producción de biogás oscilan entre 3,5-4 $kg\ SV/m^3\ día$ (Fernandez, L. 2016).



2.3.3. Otros aspectos importantes en la digestión anaerobia

Existen otras características del sustrato que deben tenerse en cuenta para la obtención de biogás a partir de residuos orgánicos.

Estas características son:

- Sólidos totales (ST): corresponde a la parte seca del sustrato que se introduce en el reactor. Si el sustrato posee un porcentaje elevado de sólidos totales, la movilidad de las bacterias se ve reducida y por tanto el desarrollo del proceso se ve perjudicado. En algunos casos pueden ser necesario agregar agua para conseguir un porcentaje de sólidos totales acorde a las condiciones de operación del reactor. El porcentaje óptimo de sólidos totales oscila entre 10-15% (Fernandez, L., 2016).
- Sólidos volátiles (SV): corresponden a la fracción orgánica que contiene el sustrato. Son los componentes de la mezcla que se liberan cuando se seca durante dos horas a 600°C. Estos sólidos son los susceptibles de ser convertidos en biogás durante la digestión anaerobia. En el caso de los residuos orgánicos agroindustriales, el contenido de sólidos volátiles suele variar entre 70-95% respecto a los sólidos totales (Flotats y Sarquella, 2008).
- Demanda química de oxígeno (DQO): expresa la cantidad, en miligramos, de oxígeno que es necesario para oxidar las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en un litro de disolución. Informa, junto con los sólidos volátiles sobre la cantidad de materia orgánica que interviene en el proceso. Sin embargo, la DQO ofrece información más fiable del proceso ya que, al no variar la concentración de oxígeno en el interior del reactor, la DQO se mantiene constante durante todo el proceso. Por contra, la concentración de sólidos volátiles puede variar (Fernandez, L., 2016).



- Potencial máximo de producción de biogás: es un parámetro que se obtiene de forma experimental e informa del potencial máximo de producción de biogás que cada tipo de residuo orgánico lleva asociado. Se expresa en m^3 de biogás por cada kilogramo de sólido volátil (m^3 de biogás/kg SV).
- Producción real de biogás: tiene en cuenta factores que influyen en la producción como es la temperatura, la presencia de sustancias inhibidoras o el tiempo de retención hidráulico.

2.3.4. Tecnologías de digestión anaerobia

Actualmente, existen diferentes tipos de reactores empleados en la digestión anaerobia de materia orgánica para la obtención de biogás. La distinción entre unos tipos u otros se basa generalmente en tres aspectos: la tecnología empleada para llevar a cabo el proceso, la temperatura de trabajo y el número de etapas en las que se realiza el proceso.

A continuación, se detallan las características más significativas de los dos tipos de digestores industriales más empleados para el tratamiento de purines. Estos son: digestores de mezcla completa y digestores de flujo pistón (Situación y potencial de generación de biogás, 2011).

Digestores de mezcla completa
- Consiguen una distribución uniforme del sustrato y de los microorganismos gracias al sistema de agitación. Consiguen una temperatura homogénea en todo el reactor.
- Destaca por su simplicidad en cuanto a diseño y por su versatilidad para trabajar en régimen continuo o discontinuo.



- Suelen emplearse en procesos de digestión por vía húmeda (bajos contenidos de materia seca).
- No disponen de sistemas de fijación de la biomasa por lo que los microorganismos abandonan el digestor junto con el digestato.
- Mayor dificultad para controlar el tiempo de retención hidráulico que en digestores tipo flujo pistón.
- Las operaciones de mantenimiento requieren el vaciado completo del reactor.

En la Figura 6 se representa de forma esquematizada el diagrama de flujo de un digestor de mezcla completa.

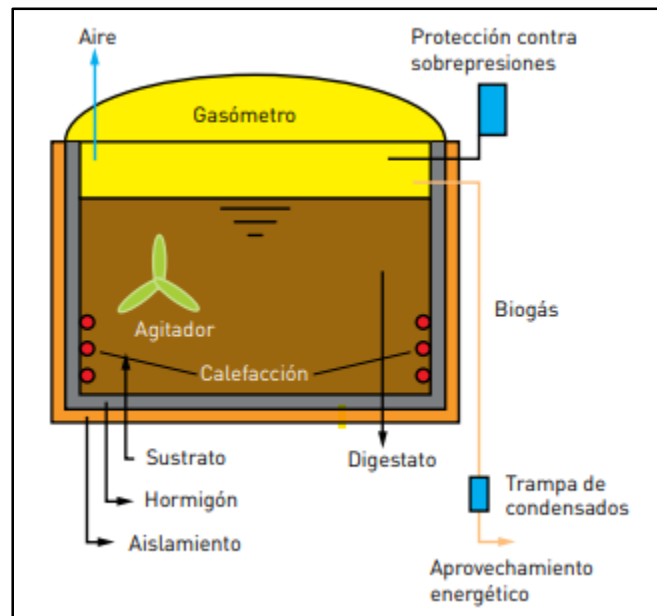


Figura 6 Diagrama de flujo de un digestor de mezcla completa. (Situación y potencial de generación de biogás, 2011)

Digestores de flujo pistón
- Permite mayores concentraciones de sólidos que en el caso de los digestores de mezcla completa.
- Necesitan menor tiempo de retención hidráulico que los reactores de mezcla completa y por tanto necesitan volúmenes más pequeños.
- Su diseño compacto y sencillo hace que las pérdidas de calor disminuyan lo que permite aumentar la eficacia del sistema de calefacción.
- Pueden operar en régimen continuo o semicontinuo introduciéndose el material por un extremo y extrayéndose por el extremo contrario.
- Requieren una mayor inversión por unidad de volumen que en el caso de los digestores de mezcla completa.

En la Figura 7 se representa de forma esquematizada el diagrama de flujo de un digestor de mezcla completa.

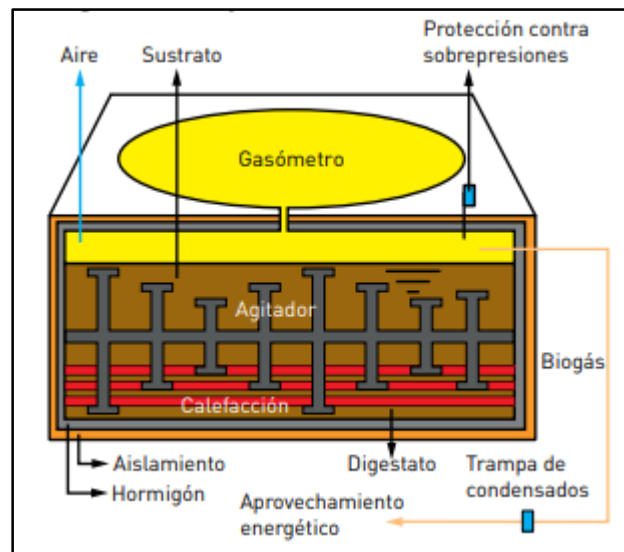


Figura 7 Diagrama de flujo de un digestor de flujo pistón. (Situación y potencial de generación de biogás, 2011)



3. Propuesta de implantación de una planta de biogás

En el presente Trabajo Fin de Máster se abordará la implantación de una planta de biogás en una explotación dedicada al engorde de terneros de la raza autóctona Asturiana de los Valles situada en el concejo de Proaza.

El objetivo principal será dimensionar el reactor biológico de la planta, teniendo en cuenta la producción diaria y las características químicas del purín empleado. Para ello, se realizará un estudio técnico que permita definir el funcionamiento del proceso, los equipos necesarios, y los parámetros de diseño.

3.1. Localización

La explotación ganadera se ubica en la localidad de Villamejín perteneciente al concejo de Proaza, en la zona centro del Principado de Asturias. Se trata de un pueblo con tradición ganadera donde actualmente hay censadas 517 cabezas de ganado vacuno (Ayuntamiento de Proaza, 2023).

En la Figura 8, se indica la localización de la explotación ganadera.



Figura 8 Localización de la explotación ganadera. Adaptado de (Google Maps, 2023).

3.2.Descripción general de las instalaciones existentes

Se trata de dos cuadras contiguas con una superficie de 480 m² y 315 m² (Figura 9), según datos extraídos del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SigPac), ubicada en una finca de 5 ha destinada al pastoreo.

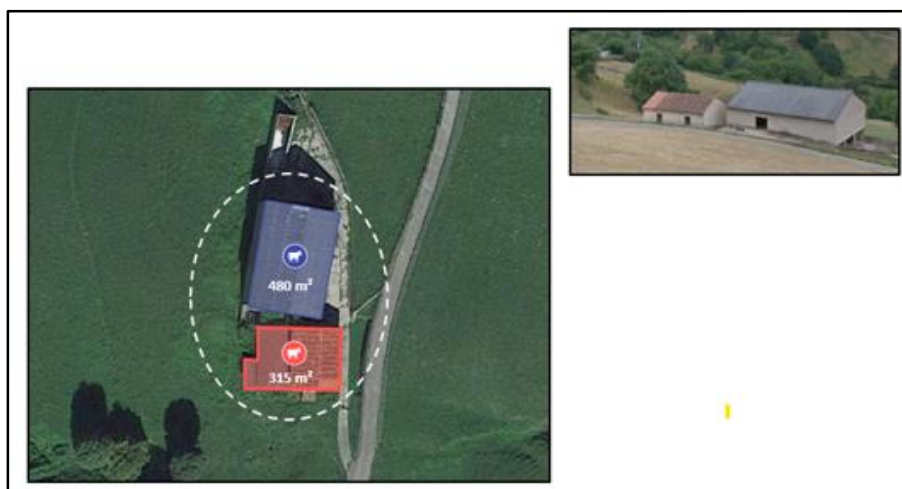


Figura 9 Naves ganaderas de la explotación. Adaptado de (Google Maps, 2023)



Ambas cuadras permiten albergar de forma intensiva hasta 300 terneros, ofreciendo la posibilidad a todos los ganaderos de los concejos colindantes de Quirós, Teverga, Proaza y Santo Adriano llevar sus terneros para su engorde.

La explotación cuenta con una fosa de purines subterránea dimensionada para la recogida de las deyecciones generadas diariamente por los animales.

3.3. Caracterización del purín empleado

El purín empleado como sustrato para producir biogás procederá de la explotación de ganado vacuno descrita en el epígrafe 3.2. Está formado por una fase líquida constituida por la orina de los animales y agua de lavado y una fase sólida formada por los excrementos de los animales y restos de forrajes.

El Código de buenas prácticas agrarias redactado por la Consejería de Agricultura del Principado de Asturias establece que aproximadamente el 70% del purín corresponden a estiércol y un 30% a la orina de los animales (Consejería del Principado de Asturias, 1997).

La composición química del purín depende de las particularidades de la explotación en cuanto a tipo de alimentación, sistema de limpieza, características constructivas de la explotación... entre otras. Sin embargo, existen unas características comunes a todos los purines extraídas de diferentes procedimientos experimentales.

Para el presente Trabajo Fin de Máster se ha empleado los datos extraídos de diferente bibliografía. En la Tabla 2 y en la Tabla 3 se recoge diferentes características para un purín de ganado vacuno.



Tabla 2 Composición química promedio de un purín de ganado vacuno. (B. Haroon et al., 2018)

Elemento	Unidad	Composición media
Carbono	g/kg	480,6
Nitrógeno	g/kg	32,2
Fósforo	g/kg	38,9
Potasio	g/kg	490,9
Magnesio	g/kg	192,6
Sodio	g/kg	225,2
Calcio	g/kg	157,3
Cobre	g/kg	126,6
Hierro	g/kg	389,4
Manganeso	g/kg	197,6
Zinc	g/kg	276,5
Níquel	g/kg	96,5
Plomo	g/kg	66,3
Cadmio	g/kg	37,5

Tabla 3 Parámetros químicos de un purín de ganado vacuno. (Blanco, L., 2016)

Parámetro	Unidad	Composición media
Sólidos totales (ST)	g/kg	62,16
Sólidos totales volátiles (STV)	g/kg	42,33
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	gO ₂ /kg	69,7
pH	-	8,9



En relación a lo expuesto en el epígrafe 2.3.2 se puede destacar lo siguiente:

- La relación C/N es de aproximadamente 15:1 (se recomienda entre 20:1 y 30:1) lo que resulta una relación de nutrientes ligeramente baja para la proliferación de las bacterias metanogénicas pudiendo afectar al volumen de biogás producido.
- El purín contiene 62,16g/kg de sólidos totales de los cuales 42,33g/kg, es decir el 68,1% corresponden a sólidos volátiles. Este valor de sólidos volátiles se encuentra próximo al valor mínimo tomando como referencia (70%) para que el sustrato sea considerado apto para la digestión anaerobia.
- En cuanto al pH, el purín bovino es ligeramente básico por lo que puede resultar necesario la adición de HCl para mantener el reactor trabajando en un medio neutro para favorecer la actividad de las bacterias.

3.4.Descripción general de la planta de biogás

3.4.1. Ubicación

La planta se instalará en las inmediaciones de las instalaciones existentes con el fin de reducir los costes asociados a las conducciones y al bombeo de los purines. Al disponer de superficie suficiente no existen impedimentos en cuanto a espacio para su instalación.

En la Figura 10, se indica la ubicación de la planta de biogás próxima a la explotación ganadera.



Figura 10 Ubicación de la planta. Adaptado de (Google Maps, 2023)

3.4.2. Equipamiento principal

La generación de biogás es un proceso complejo que requiere una gran cantidad de equipos y subsistemas cuyo tamaño dependerá de las condiciones operativas de la planta y de la materia prima (residuos) a tratar. De este modo, se describirá de forma resumida el equipamiento de la planta.

A continuación, se desglosan los equipos principales que compondrán la planta:

- Tanque de trituración y mezclado: Su función es garantizar una mezcla homogénea sin partículas de gran tamaño. La trituración aumenta la superficie específica del material y por consiguiente permite alcanzar una mayor solubilización de la materia orgánica. Es alimentado desde la fosa de purines y permite regular, según las condiciones del proceso, la pastosidad de la mezcla mediante el aporte de agua de red.



- Tanque de precalentamiento: Consiste en un recipiente cilíndrico vertical calefactado con una corriente de agua caliente. Es alimentado desde el tanque de trituración y mezclado y su función es elevar la temperatura de la mezcla hasta temperaturas próximas al rango de operación mesofílico del digester.
- Digester: Se implantará un digester anaerobio de mezcla completa por su versatilidad en cuanto a la naturaleza de la alimentación y por ser de los más empleados para el tratamiento industrial de purines tal y como se expone en el epígrafe 2.3.4.
Consiste en un tanque cilíndrico provisto en su interior de un intercambiador de calor por el que circulará agua caliente procedente del acumulador. Este sistema de calefacción será el encargado de mantener la temperatura del reactor dentro del rango mesofílico (35-40°C). Se ha optado por esta temperatura de trabajo del reactor por ser la que mejor se ajusta al equilibrio entre el consumo de energía para generar dicho calor y la producción de biogás.
El tiempo de retención hidráulico de estos reactores suele variar de 10 a 30 días para una temperatura de operación de 35°C (Hurtado, F.J., 2012).
El régimen de funcionamiento del reactor será en continuo para favorecer la actividad de los microorganismos.
- Depurador del biogás: Su función es purificar el biogás para mejorar su poder calorífico y hacerlo apto para que pueda ser quemado. Las sustancias que se eliminan son H₂S, H₂O, CO₂, NH₃ y determinadas partículas. El resultado de depurar o purificar el biogás es el biometano, un gas con propiedades similares a las del gas natural (IDAE, 2010).
- Gasómetro: Permite el almacenamiento del gas generado. Va acompañado de una antorcha de seguridad que permite quemar el gas en exceso cuando se supera la capacidad máxima permitida o cuando se produce alguna avería en la instalación. Existen algunos



tipos de reactores que llevan incorporado en el propio reactor el gasómetro para la recogida y almacenamiento del biogás producido.

- Estabilizador del digestato: Permite reducir el exceso de nitrógeno que contiene el digestato mediante operaciones de nitrificación-desnitrificación. De esta forma se consigue unos valores aptos para su vertido en el terreno. Además, permite reducir los microorganismos patógenos y eliminar los malos olores del digestato.
- Separador de fracciones: Permite la separación del digestato estabilizado en dos fracciones, una sólida que servirá de fertilizante en forma de compost y una fracción líquida que puede ser recirculada al tanque de trituración y mezclado o bien ser utilizada como agua de riego enriquecida en nutrientes. Ambas fracciones son almacenadas en tanques diferentes para su posterior uso.
- Grupo de cogeneración: Grupo electrógeno provisto de un motor de combustión interna que quemará el biogás generado. Permite la obtención de energía eléctrica a través de un generador acoplado a su eje de transmisión. La energía eléctrica generada se acumula en baterías para disponer de ella cuando la explotación la necesite. Además, la energía térmica de los gases de la combustión es empleada para calentar el agua del acumulador de calor.
- Acumulador de calor: Sistema provisto de dos intercambiadores de calor. Un circuito primario alimentado cuando el grupo de cogeneración esté en funcionamiento y un circuito secundario alimentado por una caldera. Éste actuará de apoyo funcionando



cuando el grupo no esté trabajando para mantener de forma permanente la temperatura de operación del reactor.

- Conducciones de purines y gas: Fabricadas con PVC y acero galvanizado respectivamente. Deben dimensionarse para suplir las condiciones operativas de la planta desde el punto de vista técnico y de la seguridad.
- Equipamiento auxiliar: bombas, válvulas y medidores.
- Caseta de control: dispondrá de los equipos necesarios para analizar, controlar y supervisar el todo momento el correcto funcionamiento de la planta.

Debido a que el digestor constituye el equipo principal de la planta, en el presente Trabajo Fin de Máster se abordará la selección, dimensionamiento y definición de los parámetros de diseño del digestor.



4. Metodología de cálculo

La metodología de cálculo empleada ha consistido en recopilar los datos necesarios a partir de diferente bibliografía basada principalmente en ensayos experimentales realizados a partir de purines de origen vacuno. Se han considerado como válidos debido a la similitud con el objeto de este proyecto y la comprobación de la viabilidad de los resultados obtenidos.

Una vez caracterizado químicamente el purín (según epígrafe 3.3) generado en la explotación ganadera descrita en el epígrafe 3.2, se calculará la cantidad diaria generada de purín según unos coeficientes de generación y teniendo en cuenta el carácter intensivo de la explotación.

A partir de las condiciones operativas definidas en el epígrafe 3.4.2, se dimensionará el reactor empleando las ecuaciones matemáticas definidas en el modelo cinético de Chen y Hashimoto. Se ha optado por este modelo por su aplicabilidad en la digestión de residuos ganaderos.

Finalmente se calculará la producción de biogás generada en el reactor, se hará una estimación del consumo energético de la explotación y se seleccionará el grupo de cogeneración según los requerimientos necesarios en cuanto a consumo de biogás y potencia térmica y eléctrica generada.

4.1. Producción diaria de purín

Para el cálculo de las deyecciones diarias generadas por 300 terneros se ha tenido en cuenta los datos extraídos del RD 1053/2022 por el que se establecen normas básicas de ordenación de las granjas bovinas. Este decreto establece que, para macho bovinos de 12 a 14 meses en régimen de intensivo, la producción de purín diaria por animal es de 52,1 kg, lo que supone una producción diaria total de 15.630 kg.

4.2. Funcionamiento de la planta de biogás

En la Figura 11 se representa de forma esquematizada el ciclo de funcionamiento de la planta así como los elementos principales que la componen. Además, en el ANEXO III, se adjunta el Plano 1: *Esquema de funcionamiento de la planta*.

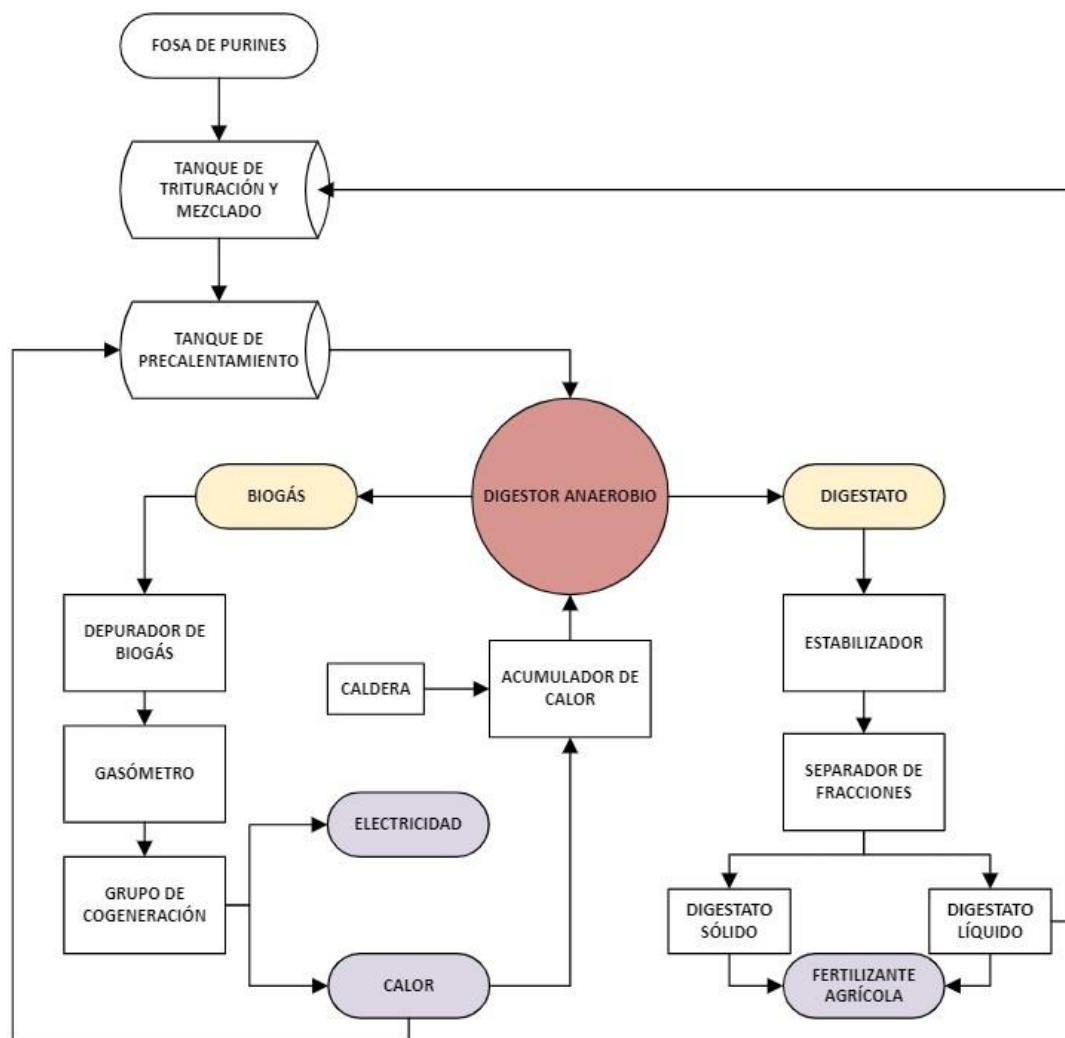


Figura 11 Esquema de funcionamiento de la planta de biogás. (Elaboración propia).



El ciclo de producción del biogás comienza con la etapa de alimentación y pretratamiento donde el purín es bombeado desde la fosa de purines hasta el tanque de trituración y mezclado. Una vez conseguida una mezcla totalmente homogénea sin impurezas no digeribles y sin restos sólidos de gran tamaño, ésta es llevada al tanque de precalentamiento donde se eleva la temperatura hasta una temperatura próxima a la temperatura de operación del digestor.

A continuación, se inicia la etapa de digestión donde el purín es sintetizado en ausencia de oxígeno como consecuencia de diferentes reacciones químicas llevadas a cabo por microorganismos. Una vez alcanzado el tiempo de retención hidráulica, el resultado de dichas transformaciones será la formación del biogás y la generación de un subproducto que es el digestato.

El biogás y el digestato son llevados a una etapa de post-tratamiento con el fin de adaptarlos a las condiciones que las hacen aptas para su consumo. Por un lado, el biogás es llevado a un depurador de gas para eliminar todas aquellas partículas que puedan resultar perjudiciales para su combustión como el H_2O y el H_2S . Una vez purificado se almacena en el gasómetro hasta su consumo. Por otro lado, el digestato obtenido pasa por un separador de fracciones para obtener, por un lado, una parte líquida con altas propiedades fertilizantes que puede ser recirculado al tanque de trituración y mezclado para reducir el consumo de agua de red y, una parte sólida que puede ser utilizada como materia prima para la obtención de compost.

La última etapa consistirá en el aprovechamiento energético de biogás mediante su combustión. El biogás almacenado en el gasómetro es quemado en el grupo de cogeneración generando energía eléctrica y energía térmica en forma de agua caliente.



4.3. Parámetros de diseño del proceso de digestión anaerobia

Según lo explicado en el epígrafe 3.4.2, se ha optado por escoger un reactor de mezcla completa en el que el proceso anaerobio tiene lugar de forma continua en una sola etapa o tanque. Se trata de un reactor muy versátil y con un coste reducido en comparación con otros reactores.

Una vez definido y caracterizado el sustrato a tratar, definido el proceso biológico y seleccionado el modelo de reactor, se pueden definir los parámetros de diseño del proceso. Para ello, se empleará el modelo cinético de Chen y Hashimoto. Se trata de un modelo basado en expresiones algebraicas que establecen un balance de masa al sustrato y a la biomasa en el interior del reactor. Se optó por este modelo por su aplicación contrastada en la digestión anaerobia de deyecciones animales. El modelo de Chen y Hashimoto así como las ecuaciones correspondientes se desarrollan en el ANEXO I. En la Tabla 4 se recogen las ecuaciones y parámetros que definen el modelo.

Tabla 4 Ecuaciones y parámetros del modelo de Chen y Hashimoto. (Elaboración propia)

(S): Concentración del sustrato en el digestor [kg SV/m³]	$S = \frac{K}{(\theta \cdot \mu_{m\acute{a}x} - 1 + K)} \cdot S_0 \quad (3)$
(E): Eficacia de eliminación del sustrato [%]	$E = 1 - \frac{S}{S_0} = E = 1 - \frac{K}{(\theta \cdot \mu_{m\acute{a}x} - 1 + K)} \quad (4)$
(P_c)_{CH₄}: Producción de metano referida al sustrato [Nm³ CH₄/kg SV]	$P_c = G_0 \cdot E = G_0 \cdot \left(1 - \frac{K}{(\theta \cdot \mu_{m\acute{a}x} - 1 + K)}\right) \quad (5)$
(P_v)_{CH₄}: Producción volumétrica de metano [m³ CH₄/m³ día]	$P_v = G_0 \cdot \frac{(S_0 - S)}{\theta} = \frac{G_0 \cdot S_0}{\theta} \cdot E = \frac{Q}{V} \cdot G_0 \cdot S_0 \cdot E \quad (6)$



Donde:

V_r : volumen del reactor [m^3].

S_0 : concentración de materia orgánica [$kg\ SV/m^3$].

Q : caudal de tratamiento [$m^3/día$].

θ : tiempo de retención hidráulico [días].

$\mu_{máx}$: tasa máxima de crecimiento [$días^{-1}$].

G_0 : producción de CH_4 por unidad de materia orgánica degradada [$Nm^3CH_4/kg\ SV$].

K : constante de inhibición de Chen-Hashimoto.

En la Figura 12 se representa gráficamente el porcentaje de eliminación del sustrato (E) y la producción volumétrica de gas (P_v) respecto al tiempo de retención hidráulico (θ). En la gráfica se puede observar que hay un tiempo de retención mínimo por debajo del cual no existe depuración de la materia orgánica. Este tiempo de retención mínimo es de 3,2 días. Además, se puede observar que el tiempo de retención que corresponde a la máxima producción de biogás es de 5,9 días.

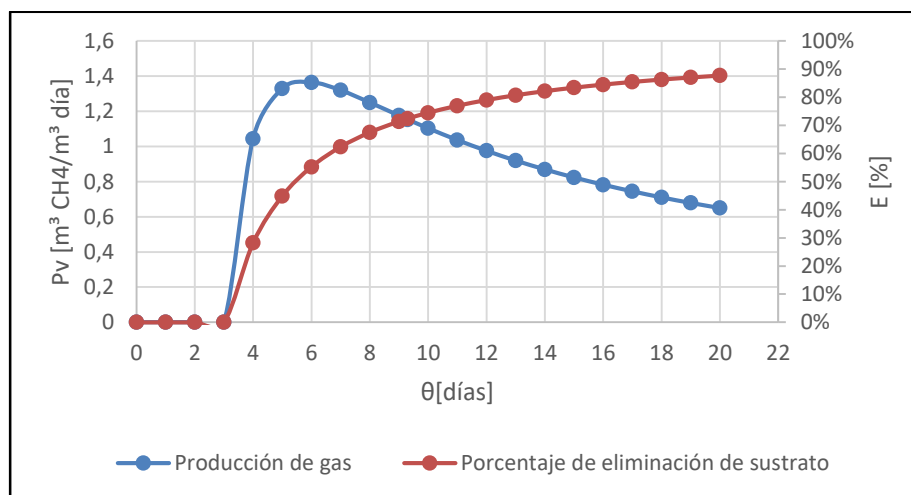


Figura 12 Producción volumétrica de gas y porcentaje de depuración respecto al tiempo de retención hidráulico. (Elaboración propia).



Sin embargo, es importante destacar que la máxima producción de biogás no corresponde a la máxima depuración. Consecuentemente, debe fijarse cuál es el objetivo final del proceso. En este caso, se buscará un equilibrio entre la producción de biogás con el fin de conseguir el mayor aprovechamiento energético y el porcentaje de depuración con el objetivo de conseguir un digestato lo más estabilizado posible para su vertido en el terreno. Se ha optado por escoger un tiempo de retención hidráulico de 10 días, lo que supone trabajar con una eficacia de eliminación del 74%.

En la Tabla 5 se recogen los parámetros de diseño calculados en el ANEXO I:

Tabla 5 Parámetros de diseño del digestor anaerobio. (Elaboración propia)

Caudal de purines	15,63 m ³ purín/día
Concentración de sustrato a la entrada (S₀)	42,33 kg/m ³
Tiempo de retención hidráulico (θ)	10 días
Eficacia de eliminación del sustrato (E)	74 %
Producción volumétrica de metano (P_v)_{CH₄}	1,096 m ³ CH ₄ /m ³ día
Producción volumétrica de biogás (P_v)_{biogás}	2,963 m ³ biogás/m ³ día
Producción de metano referida al sustrato (P_c)_{CH₄}	0,259 Nm ³ CH ₄ /kg SV
Producción de biogás referida al sustrato (P_c)_{biogás}	0,4144 Nm ³ biogás/kg SV
Producción diaria de metano	171,36 Nm ³ CH ₄ /día
Producción diaria de biogás	274,17 Nm ³ biogás/día
Ahorro de emisiones de CO₂-eq	63,11 t CO ₂ -eq/año
Volumen útil del digestor (V_{útil})	156,36 m ³
Volumen real del digestor (V_{real})	187,63 m ³
Diámetro del digestor (m)	6 m



Altura del digestor (m)	6,64 m
Velocidad de carga orgánica (VCO)	4,23 kg SV/m ³ día

4.4.Necesidades energéticas de la explotación

La planta de biogás deberá satisfacer las necesidades energéticas de la explotación ganadera. Por ello, deberá proporcionar la energía eléctrica que requiere la explotación y la energía térmica para calentar el sustrato.

Para calcular la potencia total instalada en la explotación, se ha tenido en cuenta la potencia unitaria de cada uno de los equipos que existen en la instalación. Estos datos, han sido extraídos de catálogos comerciales.

En la Tabla 6 se recoge la potencia total instalada en la explotación.

Tabla 6 Potencia total instalada en la explotación ganadera. (Elaboración propia)

	Número	Potencia unitaria (kW)	Potencia total [kW]
Luminarias	12	0,036	0,432
Termo eléctrico para ACS	1	2,4	2,4
Bomba sumergible para purines	5,5	1	5,5
Ventilador de pared con rejilla	6	0,22	1,32
Hidrolimpiadora	1	2,1	2,1
			11,75

Por tanto, la mínima potencia eléctrica requerida por la instalación será de 11,75 kWe.



Por otro lado, el consumo térmico de la instalación se centra en el sistema de calefacción necesario para elevar la temperatura del sustrato y mantenerla a 35°C.

Para ello, el calor procedente de la combustión del biogás se empleará para calentar el agua que circula por el intercambiador de calor. Dicho calor a su vez será transmitido al sustrato a través de las canalizaciones de agua caliente que rodean al digestor en su interior.

Los requerimientos serán dos; por un lado, elevar la temperatura del sustrato que entra en el digestor y, por otro lado, compensar las pérdidas de calor debidas a la diferencia de temperatura con el exterior.

El aporte de calor que es necesario suministrar al sustrato se ha calculado en el ANEXO I empleando las ecuaciones de transferencia de calor. Se ha obtenido una potencia térmica mínima de 14,67 kWt.

Para la estimación de las pérdidas térmicas del digestor se ha considerado la transferencia de calor entre las paredes laterales del digestor y la cubierta. La sección de la pared del reactor y los diferentes espesores de las capas que la componen aparecen representados en la Figura 13:

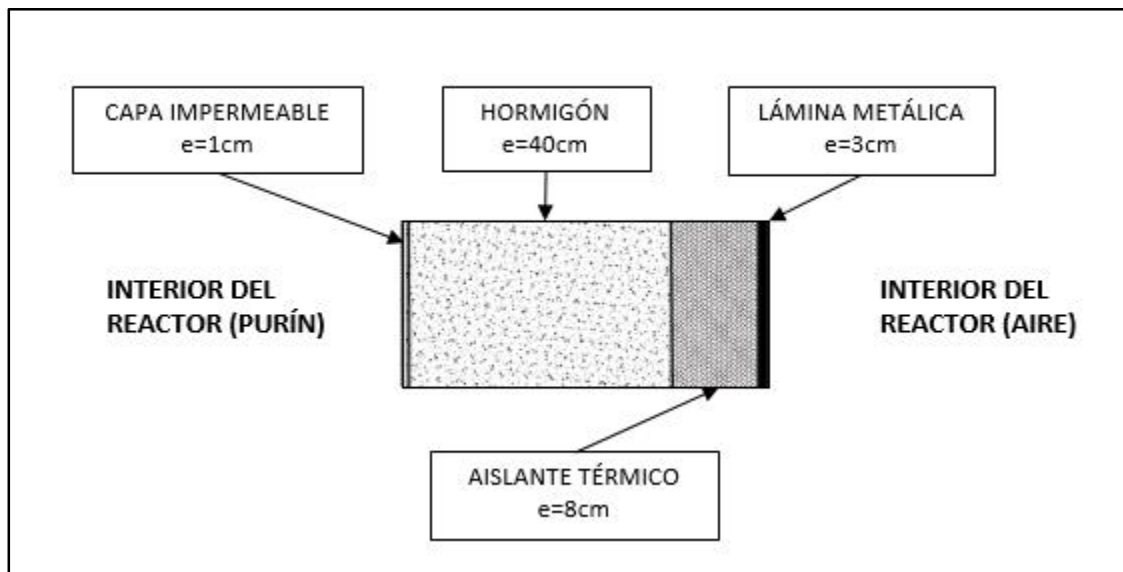


Figura 13 Sección de la pared del reactor. (Elaboración propia).

En el ANEXO I, se ha obtenido el calor perdido por las paredes del reactor teniendo en cuenta las diferentes resistividades de las capas. Las pérdidas de calor suponen una potencia térmica de 1,6 kWt.

Finalmente, sumando ambos valores se obtiene que la potencia térmica requerida para mantener el digestor a una temperatura constante de 35°C será de 16,27 kWt.

4.5. Selección del grupo de cogeneración

En primer lugar, es necesario conocer la potencia que es capaz de aportar diariamente la combustión del biogás generado. A partir de la producción diaria de biogás y su poder calorífico inferior (para un contenido en metano del 60%) se ha calculado en el ANEXO I que la potencia aportada por el biogás es de 73kW.

Los requerimientos que ha de cumplir el grupo de cogeneración y que condicionará la elección del mismo son:



- Debe tener un consumo de energía menor que 73kW, puesto que es la máxima energía que puede suministrar el biogás.
- El motor debe proporcionar una potencia eléctrica mínima de 11,75 kWe.
- El motor debe proporcionar una potencia térmica mínima de 16,27 kWt.

A partir de los requerimientos indicados, se ha seleccionado el grupo de cogeneración MC 30-60 de la marca Crasli Energy.

Las principales características técnicas del grupo de cogeneración se muestran en la Tabla 7. En el ANEXO II se adjunta la ficha técnica del grupo de cogeneración.

Tabla 7 Características técnicas del grupo de cogeneración MC 30-60. (Elaboración propia)

Potencia eléctrica	30 kW
Potencia térmica	62 kW
Rendimiento total	89 %
Rendimiento eléctrico del motor	29 %
Rendimiento térmico del motor	60 %
Consumo	65 kW

En la Figura 14 se puede observar el grupo de cogeneración escogido.

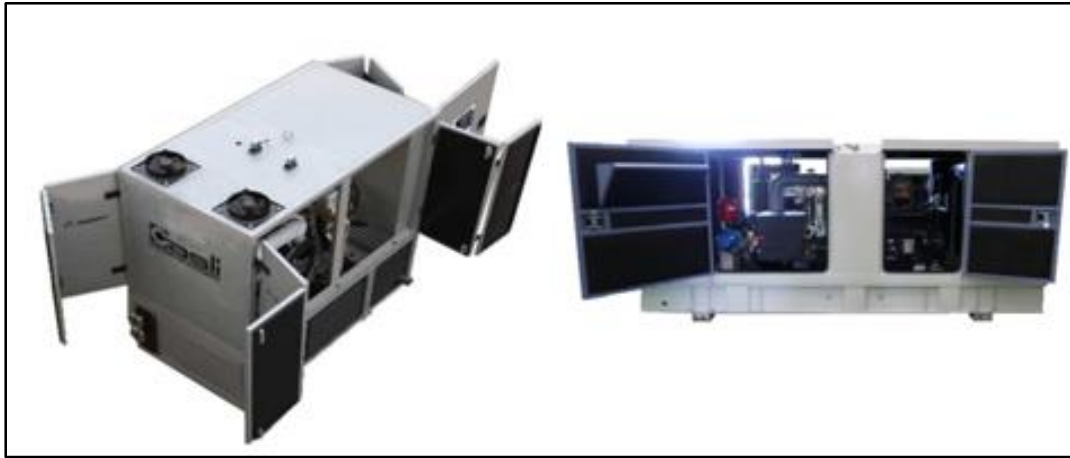


Figura 14 Grupo de cogeneración MC 30-60. (Crasli Energy, 2023).

4.6. Cálculo de la inversión inicial de la planta

Para el cálculo de la inversión inicial que requiere la instalación de la planta de biogás en la explotación ganadera, se ha tenido en cuenta un estudio realizado por la Universidad Politécnica de Cataluña y la compañía eléctrica Naturgy.

En la Figura 15 se representa los costes según la potencia eléctrica que producen. Estos costes dependen de la producción específica de la materia prima. La línea negra representada en la Figura 15 corresponde a las deyecciones de origen ganadero y la línea discontinua a cultivos energéticos.

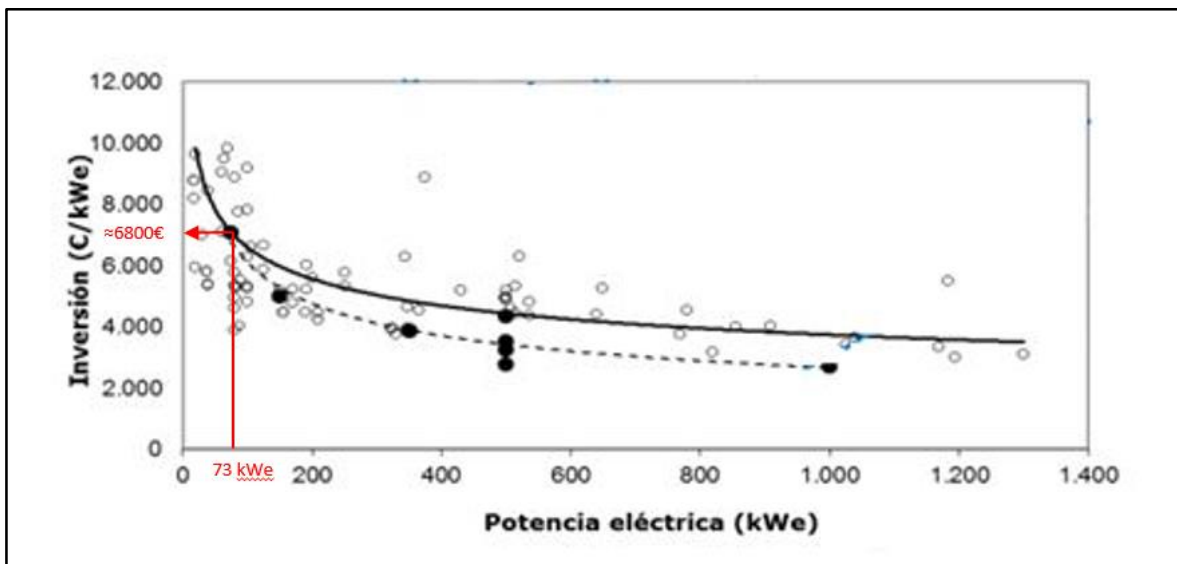


Figura 15 Inversión inicial de una planta de biogás. (Universidad de Cataluña y Naturgy, 2019)

Según la Figura 15, para una producción de 73kWe el coste por kWe es de aproximadamente 6.800€. Esto supone una inversión inicial de 496.400€.



5. Conclusiones

- La explotación ganadera objeto de estudio de este proyecto, con capacidad para albergar 300 terneros, genera diariamente 15,63 m³ de purines. El tratamiento anaerobio de estos purines permite obtener una producción diaria de 274,17 m³ de biogás. Por tanto, por cada m³ de purín se genera 17,53 m³ de biogás o lo que es lo mismo, cada animal genera diariamente mediante sus deyecciones 0,91 m³ de biogás. Teniendo en cuenta que por cada m³ de biogás se genera 6,39 kWh esto significa que diariamente se genera 1.751,95 kWh o lo es lo mismo, cada animal genera 5,84 kWh al día (lo que equivaldría a una bombilla de 60W funcionando durante aproximadamente 4 días de forma continua).
- La producción de biogás a partir de la fermentación biológica tiene un rendimiento relativamente bajo respecto a la inversión que requiere la planta. Una de las posibles causas podría ser la composición química de los purines de origen bovino ya que poseen una relación C:N de 15:1 mientras que se recomienda una relación entre 20-30 para garantizar el correcto desarrollo del proceso. Esta relación implica un déficit de nutrientes para las bacterias que puede afectar a la producción de biogás. Este problema se podría paliar incorporando la codigestión de residuos orgánicos. Esto es, incorporar un segundo residuo a la digestión que aporte más materia orgánica a la mezcla enriqueciéndola. Por ejemplo, la adición de glicerina a la mezcla haría aumentar el rendimiento de producción de biogás. Otra solución, sería aumentar la cantidad de purín disponible, por ejemplo, facilitando que otros ganaderos de los concejos colindantes lleven a la planta de biogás el purín que se genera en sus explotaciones. Esta alternativa requiere de un estudio previo que confirme su viabilidad técnica y económica.
- El aprovechamiento energético del biogás generado permite a la explotación disponer de una energía renovable contribuyendo así a reducir las emisiones de CO₂ y a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como es el CH₄. La instalación de la planta de



biogás supondría evitar la emisión de 46,1 toneladas de CH_4 al año lo que corresponde a 63,11 toneladas de CO_2 equivalente al año.

- Uno de los principales obstáculos de la implantación de plantas de biogás en explotaciones ganaderas es la inversión inicial que es necesario realizar. Para la planta de biogás objeto de este estudio, la inversión inicial es de 496.400€. Es por ello que las administraciones públicas están incentivando la implantación de plantas de biogás mediante la concesión de subvenciones. Otra forma de recuperar la inversión en menos tiempo sería obtener beneficios económicos de la comercialización del digestato resultante en forma de compost. De esta forma, se obtendría un subproducto que supondría una fuente de ingresos adicional.



6. Bibliografía

- B .Haroon, A. M. Abbasi, Faridullah, P.An, A. Pervez M. Irshad (2018). *Chemical Characterization of Cow Manure and Poultry Manure after Composting with Privet and Cypress Residues*
- Blanco Lucinda (2016). *Análisis y caracterización de purines para la obtención de estruvita y biogás*. Universidad Politécnica de Valencia
- Consejería de Agricultura del Principado de Asturias (1997) *Código de buenas prácticas agrarias redactado por la Consejería de Agricultura del Principado de Asturias*,
- Elordi García Lucas (2017), *Diseño de un digestor para una planta de biogás industrial*. Universidad de Cantabria.
- Fernández García, Laura (2016). *Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines codigeridos con glicerina*. Universidad de Cádiz.
- Flotats, Xavier & Sarquella. (2008). *Biogás y gestión de deyecciones ganaderas*.
- Genia Bioenergy (2023), *Expectativas para el biometano agroindustrial en 2023*.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2011), *Situación y potencial de generación de biogás*.
- Hurtado Sánchez, Francisco José (2012), *Estudio fluidodinámico de un reactor de mezcla continua para la digestión de fangos provenientes de aguas residuales*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Instituto Nacional de Estadística (2009), *Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE)*.
- Ley 7/2022, de 8 de abril, de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular.



- Llata, Ana Isabel (2020), *Estudio técnico sobre aplicabilidad de la tecnología de digestión anaerobia seca para la conversión de restos de alimentos en biogás*. Universidad de Cantabria
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023), *Registro administrativo de instalaciones de energía eléctrica*.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023), *Plan Nacional Integrado de energía y Clima (PNIEC) 2021-2030*.
- Ministerio de Energía de Chile (2011), *Manual del Biogás*.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (marzo 2022), *Hoja de Ruta del Biogás*.
- RD 47/2022, de 18 de enero, sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.
- RD 1053/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas básicas de ordenación de las granjas bovinas.

Páginas web

- Ayuntamiento de Proaza. <https://www.proaza.es/> [consultado 5 de junio de 2023]
- European Biogas Association (EBA), <https://www.europeanbiogas.eu/> [consultado 5 de julio de 2023]
- Gestión Integral de Residuos Orgánicos (GIRO-Centro tecnológico)
- Google Maps. <https://www.google.es/maps/preview>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). <https://www.miteco.gob.es/es/> [consultado 20 de junio 2023].
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). <https://www.mapa.gob.es/es/> [consultado 10 de junio de 2023].



-
- Oficina Local del Cambio Climático de Santander (OCCSan), <http://www.oficinacambioclimaticosantander.es/opencms/opencms/Contacto> [consultado 2 de julio de 2023]
 - Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SigPac). <https://sigpac.mapa.gob.es/fega/visor/> [consultado 23 de mayo de 2023]
 - Agencia Estatal de Meteorología. <https://www.aemet.es/es/portada> [consultado 7 de julio de 2023]



ANEXO I

Cálculos



1. Cálculo de la producción diaria de purín generado

El caudal diario de purín producido se calcula teniendo en cuenta que en la explotación se generan 15.630 kg (ver epígrafe 4.1) y que se puede considerar que 1000kg de purín equivale a 1 m³. Por tanto:

$$Q = 15.630 \frac{kg \text{ purín}}{día} \times \frac{1m^3 \text{ purín}}{1000kg \text{ purín}} = 15,63 \frac{m^3 \text{ purín}}{día}$$

De los cuales, teniendo en cuenta lo expuesto en el epígrafe 3.3, el 70% corresponderá a deyecciones sólidas, es decir 10,94 m³/día y el 30% restante serán deyecciones líquidas (4,69m³/día).

2. Desarrollo del modelo de Chen y Hassimoto para la digestión anaerobia

Los autores Chen y Hashimoto propusieron un modelo cinético basado en el desarrollo de expresiones algebraicas que establecen el balance de masa (de biomasa y de sustrato) en el reactor.

Este modelo tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- Es aplicable a digestores de mezcla completa trabajando en régimen continuo.
- Considera que la densidad se mantiene constante durante todo el proceso ya que la masa de biogás es despreciable respecto a la masa de digestato.
- El sustrato a la entrada del reactor no contiene microorganismos ($X_0 \approx 0$).
- La tasa de crecimiento de los microorganismos es mucho mayor que la tasa de muerte por lo que ésta se puede despreciar.

A partir de la Figura 16 se establecen los balances de biomasa y de sustrato en el reactor.

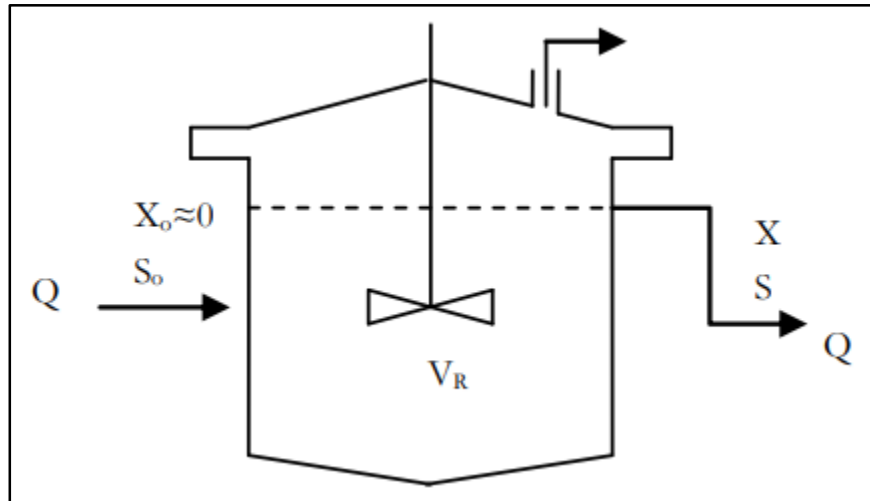


Figura 16 Esquema del reactor con los parámetros que definen el balance de masas. (Fernández, ,2016)

Donde:

V_r : volumen del reactor [m^3].

Q : caudal de entrada \approx salida [$m^3/día$].

X : concentración de microorganismos [kg/m^3].

S_0 : concentración de sustrato a la entrada [kg/m^3].

S : concentración de sustrato a la salida [kg/m^3].

Balance de microorganismos en la biomasa:

$$\frac{d(X \cdot V_r)}{dt} = -Q \cdot X + r_x \cdot V_r \quad (7)$$



r_x : velocidad de crecimiento de los microorganismos [kg/m³día]. Se define, según la ecuación de Monod, como:

$$r_x = \frac{dX}{dt} = \mu \cdot X \quad (8)$$

μ : tasa de crecimiento específico [días⁻¹].

Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (7) se obtiene:

$$\frac{d(X \cdot V_r)}{dt} = -Q \cdot X + \mu \cdot X \cdot V_r \quad (9)$$

Dividendo la ecuación (9) entre el volumen de reactor se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{X}{\theta} + \mu \cdot X \quad (10)$$

Donde:

θ : tiempo de retención hidráulico [días].

En régimen estacionario se cumple que $\frac{dX}{dt} = 0$. Por tanto, la ecuación (10) quedaría de la siguiente forma:

$$\mu = \frac{1}{\theta} \quad (11)$$



Balance de microorganismos en el sustrato:

$$\frac{d(S \cdot Vr)}{dt} = Q \cdot (S_0 - S) - r_s \cdot V_r \quad (12)$$

r_s : velocidad de utilización del sustrato [kg sustrato/m³día].

Dividendo la ecuación (12) entre el volumen de reactor se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{(S_0 - S)}{\theta} - r_s \quad (13)$$

En régimen estacionario se cumple que $\frac{dS}{dt} = 0$. Por tanto, la ecuación (13) quedaría de la siguiente forma:

$$r_s = \frac{(S_0 - S)}{\theta} \quad (14)$$

El rendimiento de biomasa por sustrato consumido se define como:

$$Y_{X,S} = \frac{r_x}{r_s} \quad (15)$$

Despejando r_s e igualándolo con la ecuación (14) se obtiene:

$$r_s = \frac{(S_0 - S)}{\theta} = \frac{r_x}{Y_{X,S}} \rightarrow \frac{\mu \cdot X}{Y_{X,S}} = \frac{X}{\theta \cdot Y_{X,S}} \quad (16)$$

$$X = Y_{X,S} \cdot (S_0 - S)$$



La ecuación de Contois define la velocidad específica de crecimiento de los microorganismos de la siguiente forma:

$$\mu = \frac{\mu_{m\acute{a}x} \cdot S}{\beta \cdot X + S} \quad (17)$$

Donde:

β : parámetro cinético [adimensional].

$\mu_{m\acute{a}x}$: tasa máxima de crecimiento [días⁻¹]. Se define como:

$$\mu_{m\acute{a}x} = 0,013 \cdot T - 0,129 \quad (18)$$

T: temperatura de operación [°C].

Sustituyendo la ecuación (16) en la ecuación (17) se obtiene:

$$\mu = \frac{\mu_{m\acute{a}x} \cdot S}{\beta \cdot Y_{X,S} \cdot (S_0 - S) + S} \quad (19)$$

Donde:

$\beta \cdot Y_{X,S} = K$: constante de inhibición de Chen-Hashimoto. También se puede definir como:

$$K = 0,6 + 0,021 \cdot e^{0,05SV_0} \quad (20)$$



Despejando la concentración del sustrato en el digestor (S) en la ecuación (19) se obtiene:

$$S = \frac{K}{(\theta \cdot \mu_{m\acute{a}x} - 1 + K)} \cdot S_0 \quad (21)$$

Conociendo la concentración del sustrato a la entrada y a la salida del digestor se puede determinar la eficacia en la eliminación del sustrato de la siguiente forma:

$$E = 1 - \frac{S}{S_0} \quad (22)$$

Sustituyendo la ecuación (21) en la ecuación (22):

$$E = 1 - \frac{K}{(\theta \cdot \mu_{m\acute{a}x} - 1 + K)} \quad (23)$$

La producción de metano o biogás, en función de la materia orgánica que se degradada, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P_c = G_0 \cdot E = G_0 \cdot \left(1 - \frac{K}{(\theta \cdot \mu_{m\acute{a}x} - 1 + K)}\right) \quad (24)$$

Donde:

G_0 : producción de metano o biogás por unidad de materia orgánica degradada
[Nm³CH₄/kg SV]

Se trata de un valor teórico obtenido de forma experimental en el que se considera que todo el sustrato introducido en el reactor es degradado lo que implica un tiempo infinito. El autor Hill (1982) estableció un coeficiente de producción de CH₄ para el residuo de origen bovino de 0,35 Nm³CH₄/kg SV y un coeficiente de producción de biogás (con un 60% en metano) igual a 0,56 Nm³biogás/kg SV (Hill, 1982).



La producción de metano y biogás por unidad de tiempo y volumen del reactor, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} P_v &= G_0 \cdot \frac{(S_0 - S)}{\theta} = \frac{G_0 \cdot S_0}{\theta} \cdot \left(1 - \frac{K}{(\theta \cdot \mu_{m\acute{a}x} - 1 + K)}\right) = \frac{G_0 \cdot S_0}{\theta} \cdot E \\ &= \frac{Q}{V} \cdot G_0 \cdot S_0 \cdot E \end{aligned} \quad (25)$$

Donde:

P_v : producción de biogás o metano [m^3CH_4 o biogás/ m^3 reactor·día].

La producción máxima de biogás se obtiene derivado la ecuación (25) respecto al tiempo de retención hidráulico. Se obtiene un valor de producción máxima de biogás cuando:

$$\theta = \left(\frac{1}{\mu_{m\acute{a}x}}\right) \cdot (1 + K^{\frac{1}{2}}) \quad (26)$$



3. Aplicación del modelo

Para este proyecto se aplicará el modelo con el objetivo de obtener la mayor productividad de biogás posible a partir del residuo disponible. En la Tabla 8 se recogen los datos de partida para la aplicación del modelo:

Tabla 8 Parámetros de partida para el cálculo del digestor. (Elaboración propia).

Parámetro	Valor
T [°C]	35
Q [m ³ /día]	15,63
SV ₀ [kg/m ³]	42,33
(G ₀) _{CH₄} [m ³ CH ₄ /kg SV]	0,35
(G ₀) _{biogás} [m ³ biogás/kg SV]	0,56

Aplicando la ecuación (18) se obtiene la tasa máxima de crecimiento:

$$\begin{aligned}\mu_{m\acute{a}x} &= 0,013 \cdot T - 0,129 = 0,013 \cdot 35 - 0,129 \\ \mu_{m\acute{a}x} &= 0,326 \text{ d\acute{a}ias}^{-1}\end{aligned}$$

Aplicando la ecuación (20) se obtiene la constante de inhibición:

$$\begin{aligned}K &= 0,6 + 0,021 \cdot e^{0,05SV_0} = 0,6 + 0,021 \cdot e^{0,05 \cdot 42,33} \\ K &= 0,774\end{aligned}$$

En la Figura 17 se representa gráficamente el porcentaje de eliminación de sustrato (E) y la producción volumétrica de gas (Pv) respecto al tiempo de retención hidráulico (θ).

El punto de corte de ambas gráficas representa el tiempo de retención hidráulico para el cual existe un equilibrio entre la producción de biogás y el porcentaje de eliminación del sustrato.

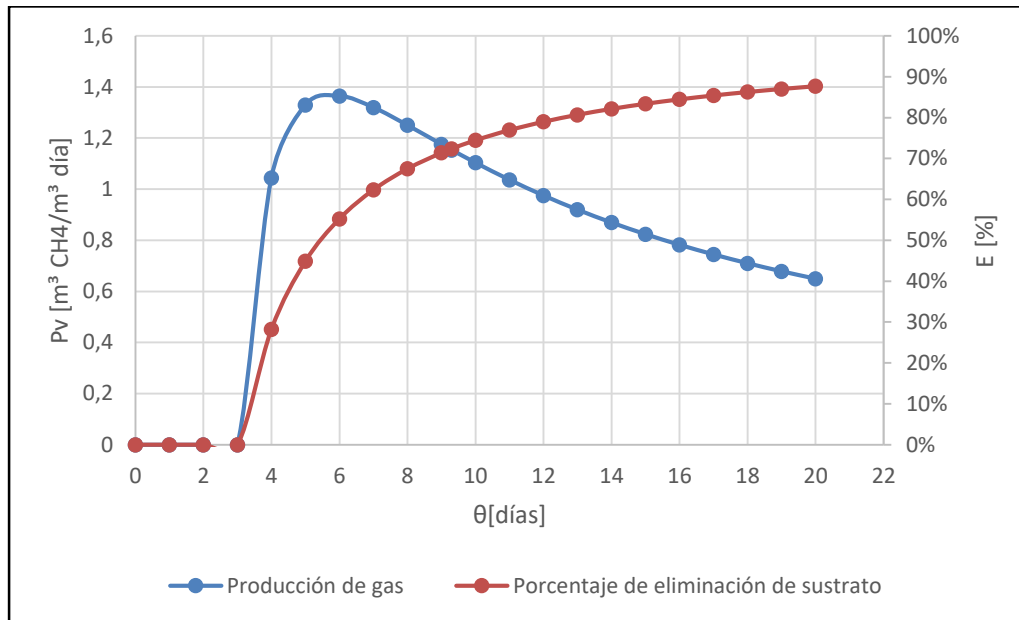


Figura 17 Producción volumétrica de gas y porcentaje de depuración respecto al tiempo de retención hidráulico. (Elaboración propia).

Por tanto, el tiempo de retención hidráulico teórico obtenido es de 9,3 días, para el cual se obtiene una producción de gas de $1,154 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3\text{reactor} \cdot \text{día}$ y un porcentaje de eliminación del sustrato del 72%. En la práctica se empleará un tiempo de retención igual a 10 días para el que corresponde un rendimiento de eliminación de 74%.

Una vez definido el porcentaje de eliminación, se pueden calcular los diferentes parámetros de diseño del proceso de digestión anaerobia.

Concentración de sólidos volátiles a la salida del digestor (S_0):

$$E = 1 - \frac{S}{S_0} \rightarrow S = S_0 \cdot (1 - E) = 42,33 \cdot (1 - 0,74) = 11,00 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3}$$

Volumen útil del digestor:

$$V_{\text{teórico}} = Q \cdot \theta = 15,63 \cdot 10 = 156,36 \text{m}^3$$



Volumen real del digestor: se tendrá en cuenta un coeficiente de seguridad del 20%.

$$V_{real} = V_{teórico} \cdot (1 + 0,2) = 187,63 \text{ m}^3$$

Dimensiones del reactor:

Se ha fijado un diámetro comercial de 6m por lo que la altura del digestor será:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \rightarrow H = \frac{4 \cdot V_{real}}{\pi \cdot D^2} = 6,64 \text{ m}$$

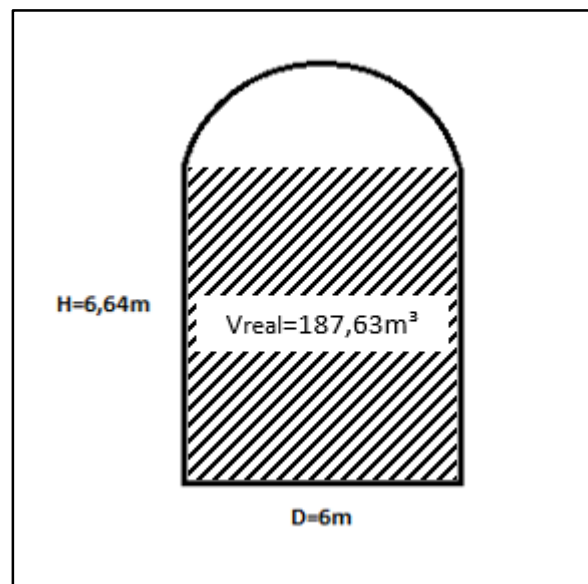


Figura 18 Dimensiones del reactor biológico. (Elaboración propia)

Velocidad de carga orgánica:

$$VCO = \frac{Q \times S_0}{V_r} = \frac{15,63 \cdot 42,33}{156,36} = 4,23 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \times \text{día}}$$



Producción volumétrica de metano ($P_{v_{CH_4}}$):

$$P_{v_{CH_4}} = \frac{G_0 \cdot S_0}{\theta} \cdot E = \frac{0,35 \cdot 42,33}{10} \cdot 0,74 = 1,096 \frac{Nm^3 CH_4}{m^3 \cdot día}$$

Producción volumétrica de biogás ($P_{v_{biogás}}$):

$$P_{v_{biogás}} = \frac{G_0 \cdot S_0}{\theta} \cdot E = \frac{0,56 \cdot 42,33}{10} \cdot 0,74 = 2,963 \frac{Nm^3 biogás}{m^3 \cdot día}$$

Producción de metano referida al sustrato (P_c):

$$P_{c_{CH_4}} = G_0 \cdot E = 0,35 \cdot 0,74 = 0,259 \frac{Nm^3 CH_4}{kgSV}$$

Producción de metano referida al sustrato (P_c):

$$P_{c_{biogás}} = G_0 \cdot E = 0,56 \cdot 0,74 = 0,4144 \frac{Nm^3 biogás}{kgSV}$$

Producción diaria de CH_4 :

$$Q_{CH_4} = Q \cdot S_0 \cdot P_c = 15,63 \cdot 42,33 \cdot 0,259 = 171,36 \frac{Nm^3 CH_4}{día}$$

Producción diaria de biogás:

$$Q_{biogás} = Q \cdot S_0 \cdot P_c = 15,63 \cdot 42,33 \cdot 0,4144 = 274,17 \frac{Nm^3 biogás}{día}$$



Teniendo en cuenta, los factores de emisión (1,369kg CO₂-eq/kg/CH₄) establecidos por el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO, 2023) y la densidad del metano en condiciones normales (0,737 kg/m³) se puede calcular las emisiones de CO₂ equivalente al año:

$$171,36 \frac{m^3 CH_4}{día} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \times \frac{0,737 \text{ kg } CH_4}{1 m^3} \times \frac{1,369 \text{ kg } CO_{2eq}}{1 \text{ kg } CH_4} \times \frac{1 \text{ t } CO_{2eq}}{1000 \text{ kg } CO_{2eq}}$$

$$= 63,11 \frac{t \text{ } CO_{2eq}}{\text{año}}$$

En la Tabla 9 se recogen de forma conjunta los parámetros de diseño calculados:

Tabla 9 Tabla resumen con los parámetros de diseño obtenidos (Elaboración propia)

Caudal de purines	15,63 m ³ purín/día
Concentración de sustrato a la entrada (S₀)	42,33 kg/m ³
Tiempo de retención hidráulico (θ)	10 días
Eficiencia de eliminación del sustrato (E)	74 %
Producción volumétrica de metano (P_v)_{CH₄}	1,096 m ³ CH ₄ /m ³ día
Producción volumétrica de biogás (P_v)_{biogás}	2,963 m ³ biogás/m ³ día
Producción de metano referida al sustrato (P_c)_{CH₄}	0,259 Nm ³ CH ₄ /kg SV
Producción de biogás referida al sustrato (P_c)_{biogás}	0,4144 Nm ³ biogás/kg SV
Producción diaria de metano	171,36 Nm ³ CH ₄ /día
Producción diaria de biogás	274,17 Nm ³ biogás/día
Ahorro de emisiones de CO₂eq	63,11 t CO ₂ -eq/año
Volumen útil del digester (V_{útil})	156,36m ³



Volumen real del digestor (V_{real})	187,63 m ³
Diámetro del digestor (m)	6 m
Altura del digestor (m)	6,64 m
Velocidad de carga orgánica (VCO)	4,23 kg SV/m ³ día



4. Cálculo de las necesidades energéticas de la instalación

Cálculo del consumo eléctrico

En la Tabla 10 se recoge la potencia total instalada en la explotación ganadera:

Tabla 10 Potencia total instalada en la explotación ganadera. (Elaboración propia).

	Número	Potencia unitaria (kW)	Potencia total [kW]
Pantalla Estanca LED con dos Tubos LED 120 cm	12	0,036	0,432
Termo eléctrico para ACS de 100L	1	2,4	2,4
Bomba sumergible para purines, 300m ³ /h	5,5	1	5,5
Ventilador de pared con rejilla, 30 Pa, 3245m ³ /h	6	0,22	1,32
Hidrolimpiadora, 20 bar, 500l/h	1	2,1	2,1
			11,75

Por tanto, la mínima potencia eléctrica requerida por la instalación será de:

$$P_e = 11,75 \text{ kW}_e$$

Cálculo del consumo térmico

El consumo térmico de la instalación se centra en el sistema de calefacción necesario para elevar la temperatura del sustrato y mantenerla a 35°C.

Los requerimientos serán dos, por un lado elevar la temperatura del sustrato que entra en el digestor y por otro lado compensar las pérdidas de calor debidas a la diferencia de temperatura con el exterior.

Para calcular el aporte de calor al sustrato se emplea la ecuación (27) la cual tiene en cuenta el calor específico del purín, es decir, el calor que es necesario aplicar para elevar 1°C la



temperatura de 1 kilogramo de purín. Se considera que el calor específico del purín es igual al del agua (4,18 KJ/kg°C) y que su densidad también es igual a la del agua (1000kg/m³).

$$Q = \dot{m} \cdot C_e \cdot \Delta T \quad (27)$$

Donde:

Q: calor [KW].

\dot{m} : flujo másico del sustrato [kg/s].

C_e: calor específico del sustrato [KJ/kg°C].

ΔT : incremento de temperatura. Se define como:

$$\Delta T = (T_{operación} - T_{purín})$$

Se considera que T_{purín} es igual a la temperatura media de Asturias en el 2022, es decir, T_{purín}=15,6°C (AEMET, 2022).

Por tanto, aplicando la ecuación (27) se obtiene:

$$Q = \dot{m} \cdot C_e \cdot \Delta T$$
$$= \left(15,63 \frac{m^3}{día} \times \frac{1000kg}{1m^3} \times \frac{1día}{24h} \times \frac{1h}{3600s} \right) \times 4,18 \frac{kJ}{kg°C} \times (35 - 15,6)°C$$

$$Q = 14,67 \frac{kJ}{s} = 14,67 kW$$

Para la estimación de las pérdidas térmicas del digestor se han considerado únicamente la transferencia de calor entre las paredes laterales del digestor y la cubierta.

La sección de la pared del reactor y los diferentes espesores de las capas que la componen aparecen representados en la Figura 19 :

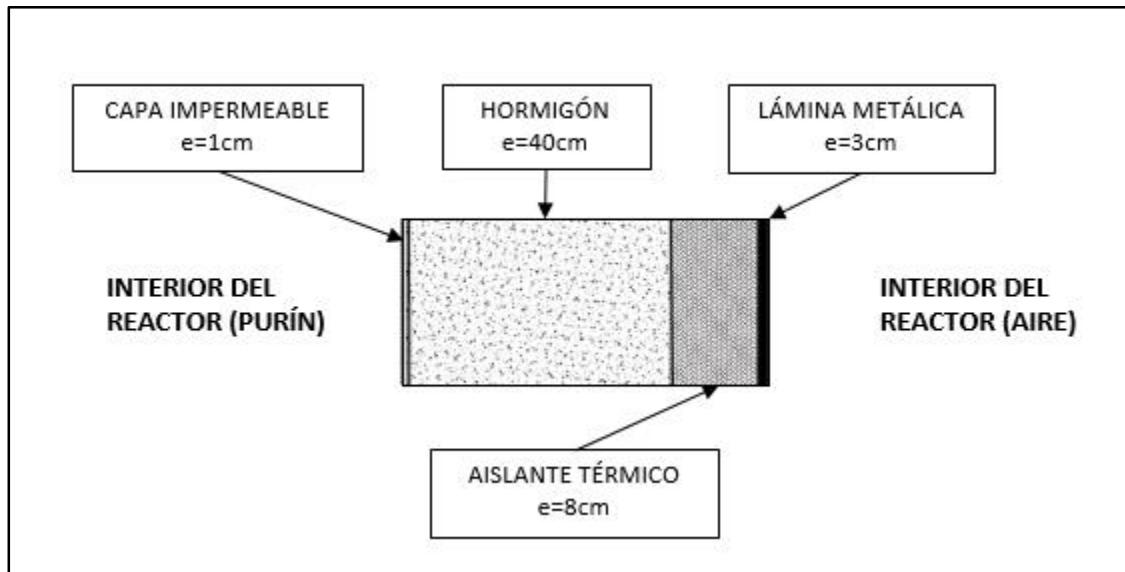


Figura 19 Sección de la pared del reactor. (Elaboración propia)

Las pérdidas totales en una pared con diferentes capas se mediante la ecuación (28):

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = \frac{\Delta T}{\sum R_i} \quad (28)$$

Donde:

ΔT : salto térmico entre el exterior del reactor y el interior [°C]. Se define como:

$$\Delta T = (T_{ext} - T_{int})$$

Se considera como T_{ext} la temperatura media de Asturias en el 2022, es decir, $T_{ext}=15,6^{\circ}\text{C}$ (AEMET, 2022). La T_{int} será la temperatura de operación del reactor, es decir 35°C .

$\sum R_i$: es el sumatorio de todas las resistividades que se oponen al paso del calor. Para la sección de pared indicada en la Figura 19 se deduce la ecuación (29).



$$\sum R_i = \frac{1}{A} \times \left(\frac{1}{h_{interior}} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{1}{h_{exterior}} \right) \quad (29)$$

Donde:

A: área de transferencia de calor [m²]. A partir de las dimensiones del digestor (H=6,64m; D=6m) se puede obtener el área de las paredes y de la cubierta:

$$A = \pi \cdot D \cdot H + \frac{\pi \cdot D^2}{2} = 181,71 \text{ m}^2$$

e: espesor de la capa [m].

k: conductividad térmica [W/m K]. En la Tabla 11 se recogen el valor de las diferentes conductividades térmicas:

Tabla 11 Conductividades térmicas de las capas del reactor. (García, E. 2017)

Capa	Espesor [m]	Conductividad térmica [W/mK]
Capa impermeable	0,01	0,6
Hormigón	0,4	2,33
Aislamiento térmico	0,08	0,04
Lámina metálica	0,03	110

h: coeficiente de convección [W/ m² K]. En la Tabla 12 se recoge el valor del coeficiente de convección en el interior y exterior del reactor:



Tabla 12 Coeficiente de convección de calor. (García, E. 2017)

	Coeficiente de convección [W/m ² K]
Coeficiente de convección forzada en el interior del reactor	4000
Coeficiente de convección natural en el exterior	400

Aplicando la ecuación (29) se obtiene:

$$\begin{aligned}\sum R_i &= \frac{1}{A} \times \left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{1}{h_{ext}} \right) \\ &= \frac{1}{181,71} \times \left(\frac{1}{4000} + \frac{0,01}{0,6} + \frac{0,4}{2,33} + \frac{0,08}{0,04} + \frac{0,03}{110} + \frac{1}{400} \right) = 0,0121 \frac{K}{W}\end{aligned}$$

Finalmente, las pérdidas de calor por la pared del reactor se obtienen aplicando la ecuación (28):

$$Q_{pérdidas} = -\frac{\Delta T}{\sum R_i} = \frac{((15,6 + 273,15) - (35 + 273,15))}{0,0121} = -1603,31W = -1,60kW$$

Por tanto, la potencia térmica requerida para mantener el digestor a una temperatura constante de 35°C será de:

$$P_t = 14,67 + 1,60 = 16,27kW_t$$



5. Selección del grupo de cogeneración

A partir de la producción diaria de biogás ($Q_{\text{biogás}}=274,1417 \text{ Nm}^3/\text{día}$) y su poder calorífico inferior para un contenido en metano del 60% ($PCI=5500 \text{ kcal/m}^3$ según epígrafe 2.1) se puede obtener la energía y la potencia aportada por el mismo.

En primer lugar, se pasa el poder calorífico inferior a kWh/m³:

$$5500 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3} \times \frac{1000\text{cal}}{1 \text{ kcal}} \times \frac{4,18\text{J}}{1\text{cal}} \times \frac{1\text{kWh}}{3,6 \times 10^6\text{J}} = 6,39 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3}$$

$$E_{\text{biogás}} = Q_{\text{biogás}} \cdot PCI = 274,17 \cdot 6,39 = 1751,95 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

$$P_{\text{biogás}} = \frac{E_{\text{biogás}}}{24 \frac{\text{h}}{\text{día}}} = \frac{1751,95}{24} = 73,00 \text{ kW}$$

Por tanto, los requerimientos que ha de cumplir el grupo de cogeneración y que condicionará la elección de este son:

- Debe tener un consumo de energía menor que 73kW puesto que es la máxima energía que puede suministrar el biogás.
- El motor debe proporcionar una potencia eléctrica mínima de 11,75 kWe.
- El motor debe proporcionar una potencia térmica mínima de 16,27 kWt.

A partir de los requerimientos indicados, se ha seleccionado el grupo de cogeneración MC 30-60 de la marca Crasli Energy.



Las principales características técnicas del grupo de cogeneración se muestran en la Tabla 13. En el ANEXO II se adjunta la ficha técnica.

Tabla 13 Características técnicas del grupo de cogeneración MC 30-60. (Elaboración propia)

Potencia eléctrica	30kW
Potencia térmica	62 kW
Rendimiento total	89 %
Rendimiento eléctrico del motor	29 %
Rendimiento térmico del motor	60 %
Consumo	65 kW

6. Cálculo de la inversión inicial de la planta

Para el cálculo de la inversión inicial que requiere la instalación de la planta de biogás en la explotación ganadera, se ha tenido en cuenta un estudio realizado por la Universidad Politécnica de Cataluña y la compañía eléctrica Naturgy.

En la Figura 20 se representa los costes según la potencia eléctrica que producen. Estos costes dependen de la producción específica de la materia prima. La línea negra representada en la Figura 20 corresponde a las deyecciones de origen ganadero y la línea discontinua a cultivos energéticos.

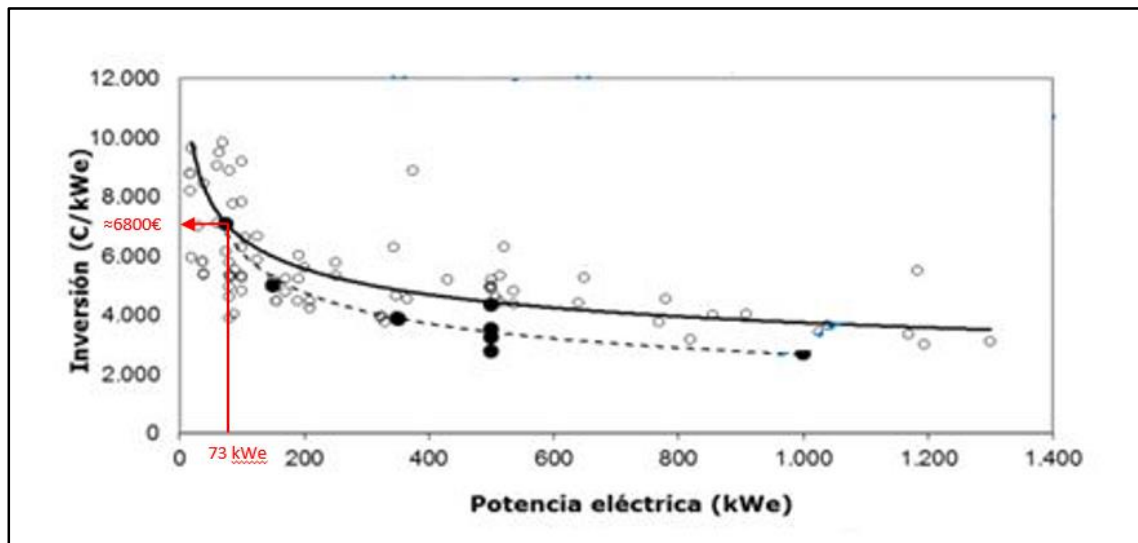


Figura 20 Inversión inicial de una planta de biogás. (Universidad de Cataluña y Naturgy, 2019)

Según la Figura 20, para una producción de 73kWe el coste por kWe es de aproximadamente 6.800€. Esto supone una inversión inicial de 496.400€.



ANEXO II

Fichas técnicas



1. Ficha técnica del grupo de cogeneración



EQUIPOS DE COGENERACIÓN CO-ENERGY "La caldera inteligente"

FICHA TÉCNICA DEL EQUIPO

MC 30-60 GN

C.H.P (Combined heat and power)		ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y CONEXIONES	
Potencia eléctrica (kW)	30	Índice sonoro aproximado dB(A)	70
Potencia térmica (kW)	62	Peso aproximado (Kg)	-
Rendimiento eléctrico	29%	Conexión combustible (")	1" 1/4
Rendimiento térmico	60%	Conexión agua caliente	Brida PN 10/16 de 35 mm.
Rendimiento total	89%	Diametro salida gases (mm)	82
Caudal agua l/m	50	Temperatura gases escape (°C)	120
Temperatura máxima de salida ° C	85		
Salto de temperatura ° C	15		

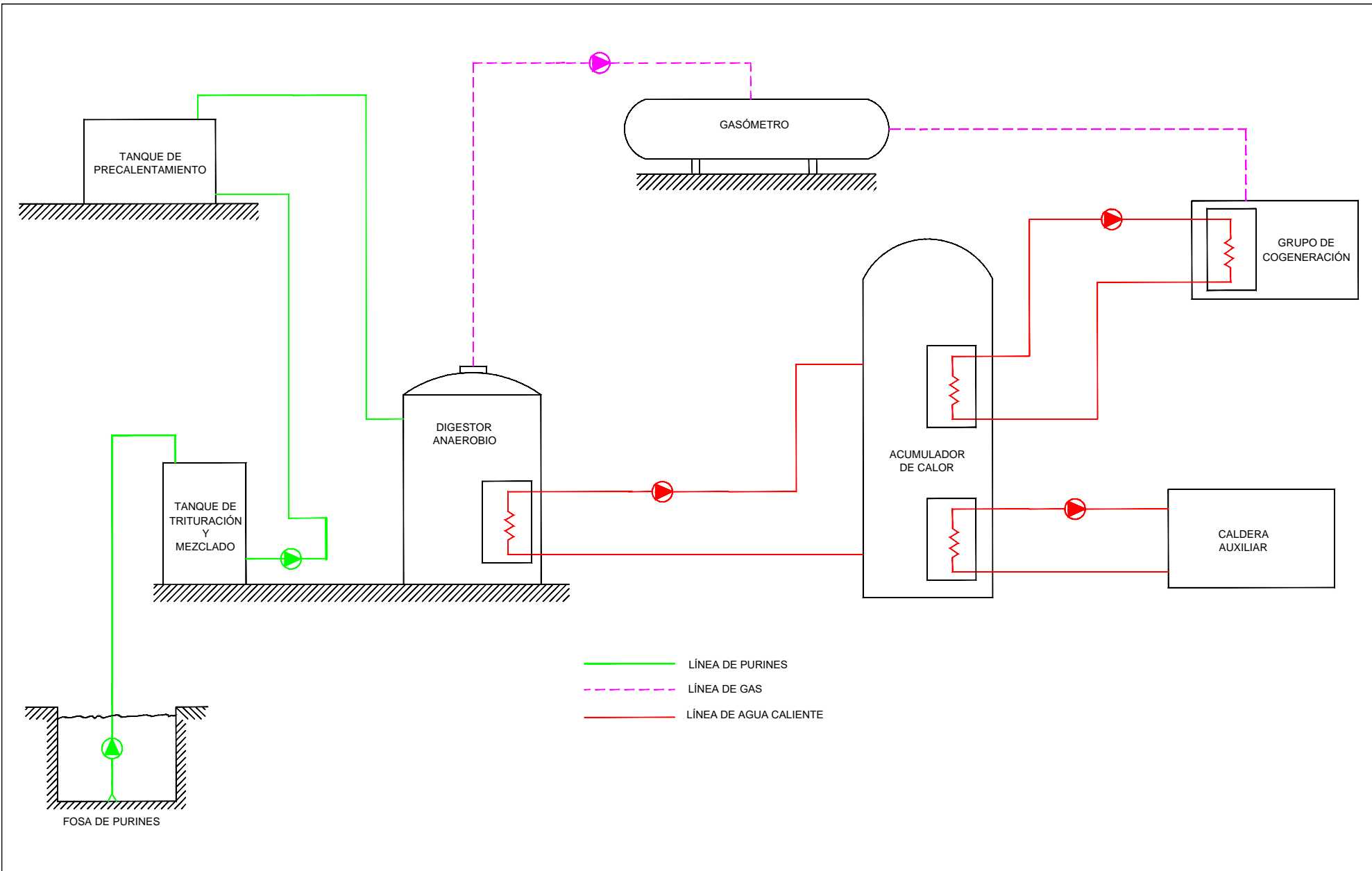
ELEMENTOS PRINCIPALES

MOTOR		GENERADOR	
Marca y modelo	PSI GM 4.3 L	Marca	LEROY SOMER
Velocidad de trabajo rpm	1500	Modelo	42.3 S5
Nº Cilindros	6 en V	Sistema	Sincrono
Cilindrada Cm3	4294	Potencia (kW)	32
Tipo arranque	Eléctrico a 12V	Tensión (V)	400
Combustible	Gas Natural	Fases	3
Compresión	9,4:1	Factor de potencia	0,90
Avance chispa	Electrónico	Nº de polos	4
Aire admisión	Aspiración natural	Frecuencia (Hz)	50
Tipo aceite	15W40 Low Ash API CD	Aislamiento	CLASE H
Consumo kg/h	8,30	Protección	IP23
Consumo kW	65,00		



ANEXO III

Planos



UNIVERSIDAD DE OVIEDO ESCUELA DE INGENIERÍA DE MINAS, ENERGÍA Y MATERIALES DE OVIEDO	TRABAJO FIN DE MÁSTER	DIBUJADO	COMPROBADO	ESCALA	TÍTULO DEL PROYECTO Aprovechamiento energético del biogás generado en una explotación de ganado bovino en el Principado de Asturias	FECHA 09/07/2023	DESIGNACIÓN DEL PLANO ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA
	MÁSTER EN INGENIERÍA DE MINAS	Victor Garcia	Laura Faba	Varias		Nº DE PLANO 1	