



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

PROYECTO DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE
BIOMETANO E INYECCIÓN A RED DE GAS

Autor: Santiago Rodríguez-Noriega Nava

Director: Francisco Sarti Fernández

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Proyecto de planta de producción de biometano e inyección a red de gas
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Santiago Rodríguez-Noriega Nava

Fecha: 07/ 08/2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Francisco Sarti Fernández

Fecha://



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

PROYECTO DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE
BIOMETANO E INYECCIÓN A RED DE GAS

Autor: Santiago Rodríguez-Noriega Nava

Director: Francisco Sarti Fernández

Madrid

PROYECTO DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOMETANO PARA INYECCIÓN A RED DE GAS

Autor: Rodríguez-Noriega Nava, Santiago.

Director: Sarti Fernández, Francisco.

Entidad Colaboradora: CT3 Ingeniería

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto pretende diseñar una planta de biometano que se acople a la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda. El diseño incluye todas las etapas necesarias para el enriquecimiento y purificación del biogás producido en la E.D.A.R. El objetivo final es inyectar el biometano obtenido a la red de gas de la zona. El diseño consiste en un diagrama de flujos de proceso (PFD), partiendo de los datos reales de producción de biogás de la E.D.A.R.

Palabras clave: E.D.A.R., biometano, biogás, inyección a red de gas, upgrading.

1. Introducción

Actualmente hay una creciente necesidad de búsqueda de nuevas fuentes de energía renovables debido a la escasez y la contaminación de los combustibles fósiles. Además, seguir utilizando sistemas basados en la economía lineal conllevará un gran impacto negativo en la sociedad, donde ya se están viendo problemas respecto a los gases emitidos y la acumulación de residuos tanto agrícolas, como ganaderos, de aguas residuales o de vertederos.

Es por ello por lo que hay que buscar nuevas tecnologías basadas en la economía circular y productoras de energías renovables. Una de estas soluciones es la conversión del biogás en biometano.

El biogás es una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono) que se produce en una digestión anaerobia de la biomasa. Esta biomasa puede tener distintas procedencias como plantas depuradoras de agua, residuos agrícolas, ganaderos, o vertederos. El biogás en sí ya puede servir como fuente de energía, transformándose en energía térmica o eléctrica. Sin embargo, si este biogás se trata correctamente se puede obtener el biometano, el cual tiene unas características casi idénticas al gas natural, con lo que podría ser inyectado a la red de gas y, además, tiene un mejor rendimiento energético y aprovechamiento que el biogás.

Esta tecnología tiene numerosas ventajas, ya que potencia la economía circular, como resultado se consigue una menor emisión de gases nocivos al medio ambiente, se consigue tanto metano como dióxido de carbono para múltiples aplicaciones, y el producto obtenido es capaz de distribuirse a distintas regiones gracias a su inyección a la red de gas.

2. Definición del Proyecto

Para la realización de este proyecto se va a diseñar un diagrama de flujos de proceso (PFD) de lo que sería la planta de biometano acoplada a la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda. Para ello se utilizarán los datos de producción reales de biogás de la planta y se diseñarán todas las etapas con los equipos que se necesiten.

Como herramienta se utiliza AutoCad para el diseño, y Excel para la realización de los cálculos, ya que se tiene como objetivo obtener una aproximación real de la presión, temperatura y caudales obtenidos en el proceso.

3. Descripción del modelo

Para tratar el biogás y convertirlo en biometano, es necesario enriquecerlo y purificarlo. Este proceso se lleva a cabo en 3 etapas que son: pretratamiento, acondicionamiento y purificación. A estas etapas se añadirá una final denominada inyección y calidad, ya que una vez se obtiene el biometano, este debe ser inyectado a la red de gas bajo unas condiciones y requisitos específicos. En la Figura 1 se puede ver un esquema de la planta de biometano que se diseña en este proyecto.

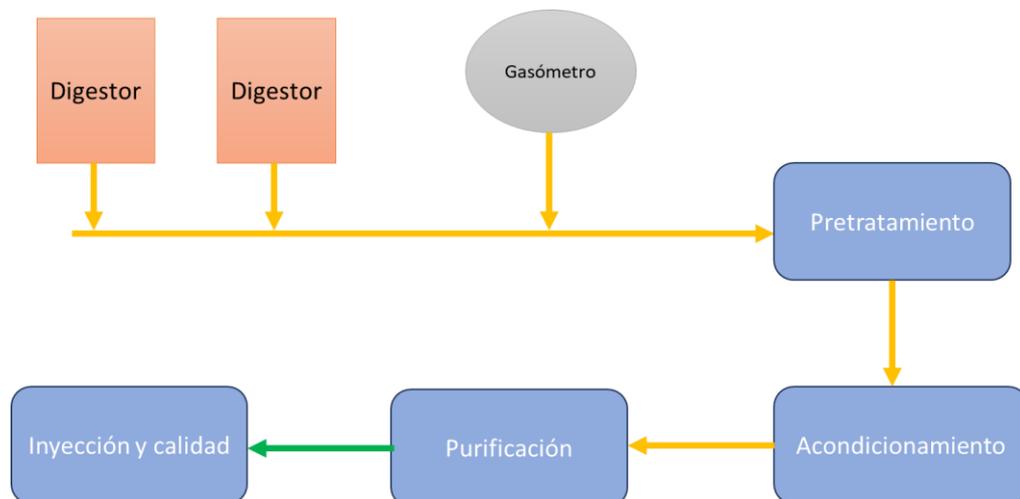


Figura 1. Etapas de la planta de biometano

El proceso que sigue el diseño de la planta es el siguiente. Los fangos digeridos en la digestión anaerobia provienen de los lodos resultantes de la depuración de agua de la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda. Estos lodos digeridos producen un biogás, el cual, para convertirse en biometano, primero debe ser secado y deshumidificado. Este proceso ocurre en el pretratamiento mediante condensación, y también en el acondicionamiento del gas por el mismo método. Además, el biogás debe tener las cantidades mínimas exigidas tanto de H_2S como de compuestos orgánicos volátiles, los cuales se eliminan en el pretratamiento mediante una filtración de carbón activo.

Para llegar a la purificación, el biogás debe ser acondicionado a la presión adecuada y no puede contener vapor de agua, cuyas modificaciones ocurren en el acondicionamiento gracias a un compresor y a un condensador.

En la purificación se separan los gases, obteniendo por un lado dióxido de carbono, y por otro lado el biometano. Ambos productos son prácticamente puros y dicha separación se consigue gracias a una triple etapa de separación de membranas.

El biometano obtenido pasa a continuación a la última fase donde será medido y regulado para cumplir los requisitos de inyección a la red de gas, incluyendo la característica odorización del mismo.

4. Resultados

Como resultado se obtiene un diagrama de flujos de proceso de todos los equipos y etapas necesarias para llevar a cabo la conversión del biogás al biometano.

Además, se han realizado unos cálculos aproximados de los caudales de biometano y dióxido de carbono conseguidos en el procesamiento de 165,97 Nm³/h de biogás, el cual corresponde con el caudal producido por la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda. En la Tabla 1 se pueden ver los resultados.

Gas	Caudal (Nm ³ /h)
Biogás	165,97
Biometano	61,83
Dióxido de carbono	79,10

Tabla 1. Resultados del diseño

5. Conclusiones

Tras la realización del proyecto, se puede concluir que se han logrado con éxito los objetivos planteados. Se ha diseñado una planta de biometano para tratar el biogás producido en una E.D.A.R. real e inyectar el biometano conseguido a la red de gas de la zona. Además, los resultados numéricos cuadran con una aproximación a lo que se obtendría en una simulación con los datos reales de la planta.

Hasta ahora esta tecnología no ha tenido un desarrollo importante, y, analizando el proyecto, se puede encontrar alguna de las razones. En primer lugar, el alto coste de producción de biometano en comparación con el precio histórico del gas natural dificulta la rentabilidad del proyecto. Hoy en día el precio del biometano es cerca de un 30% menor que el del gas natural. Con lo cual, aunque las ventajas centradas en la economía circular y la obtención de energía renovable son notables, el coste de mantenimiento y adquisición de este tipo de plantas es costoso. Eso, sumado a la continua fluctuación del precio del gas, hace que la rentabilidad del proyecto disminuya.

DESIGN OF A BIOMETHANE PRODUCTION PLANT FOR INJECTION INTO THE GAS NETWORK

Author: Rodríguez-Noriega Nava, Santiago.

Supervisor: Sarti Fernández, Francisco.

Collaborating Entity: CTR3 Engineering.

ABSTRACT

This project aims to design a biomethane plant to be coupled to the sewage treatment plant located in the Plantío de Majadahonda. The design includes all the necessary stages for the upgrading and purification of the biogas produced in the sewage treatment plant. The final objective is to inject the biomethane to the gas network. The design consists of a process flow diagram (PFD), based on the actual biogas production data of the sewage treatment plant.

Keywords: Sewage treatment plant, biogas, biomethane, gas network injection, upgrading.

1. Introduction

There is currently a growing need to look for new renewable energy sources due to the scarcity and pollution of fossil fuels. In addition, the continuance of using systems based on the linear economy will have a great negative impact on society, where consequences are already being seen such as the gases emitted and the accumulation of waste from agriculture, livestock, sewage and landfills.

This is why new technologies based on the circular economy and producers of renewable energies must be sought. One of these solutions, is the conversion of biogas into biomethane.

Biogas is a mixture of gases (mainly methane and carbon dioxide) produced in the anaerobic digestion of biomass. This biomass can come from different sources such as water treatment plants, agricultural and livestock waste, or landfills. The biogas itself can already be used as a source of energy, being transformed into thermal or electrical energy. However, if this biogas is treated correctly, biomethane can be obtained, which has almost identical characteristics to natural gas, so it can be injected into the gas network and has a better energy yield and use than biogas.

This technology has numerous advantages, since it boosts the circular economy (because of which less harmful gas emissions into the environment are achieved), both methane and carbon dioxide are obtained for multiple applications, and the product obtained is capable of being distributed to different regions thanks to its injection into the gas network.

2. Project definition

For the realization of this project a process flow diagram (PFD) of what would be the biomethane plant coupled to the sewage treatment plant from the Plantío de

Majadahonda will be designed. For this purpose, the actual biogas production data of the plant will be used, and all the stages will be designed with the necessary equipment. AutoCAD is the tool used for the design of the plant, and Excel for the calculations, since the objective is to obtain a real approximation of the pressure, temperature and flow rates obtained in the process.

3. Model description

To treat biogas and convert it into biomethane, it is necessary to upgrade and purify it. This process is carried out in 3 stages: pretreatment, conditioning, and purification. A final stage, called injection and quality, is added to these stages, since once the biomethane is obtained, it must be injected into the gas network under specific conditions and requirements. Figure 2 shows a scheme of the biomethane plant designed in this project.

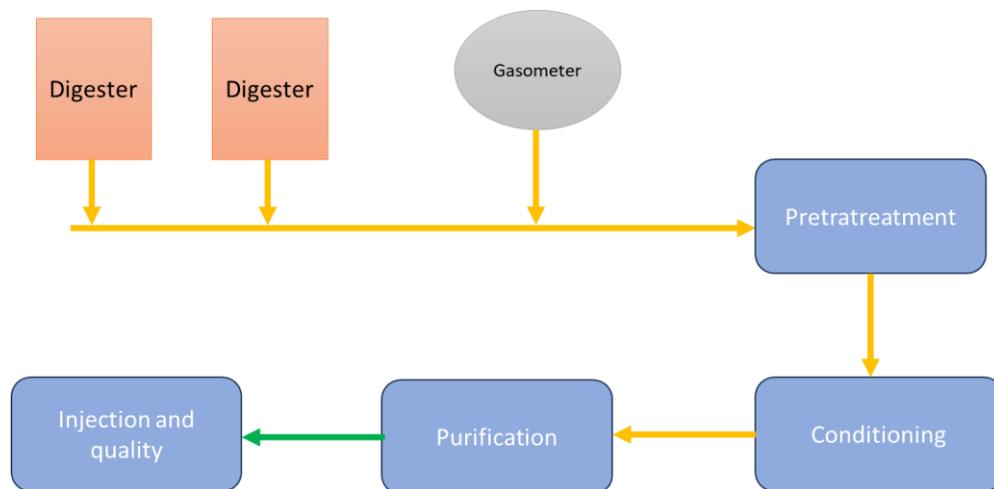


Figure 2. Stages of the biomethane plant

The process that follows the plant design is as follows. The sludge digested in the anaerobic digestion process comes from the sludge resulting from the water treatment process at the Plantío sewage treatment plant in Majadahonda. This digested sludge produces a biogas, which, to be converted into biomethane, must first be dried and dehumidified. This process occurs in pretreatment by condensation, and in gas conditioning by the same method. In addition, the biogas must have the required minimum amounts of both H_2S and volatile organic compounds, which are removed in the pretreatment by activated carbon filtration.

To reach to the purification stage, the biogas must be conditioned at the right pressure and be free of water vapor, whose modifications occur during conditioning thanks to a compressor and a condenser.

In the purification process, the gases are separated, obtaining carbon dioxide and biomethane separately. Both products are practically pure, and this separation is achieved thanks to a triple membrane separation stage.

The biomethane obtained then passes to the last stage where it will be measured and regulated to meet the requirements for injection into the gas network, including its characteristic odorization.

4. Results

As a result, a process flow diagram of all the equipment and stages necessary to carry out the conversion of biogas to biomethane is obtained.

In addition, approximate calculations have been made of the flow rates of biomethane and carbon dioxide obtained in the processing of 165.97 Nm³/h of biogas, which corresponds to the flow rate produced by the Plantío de Majadahonda sewage treatment plant. Table 2 shows the results of the gases flows obtained.

Gas	Flow rates (Nm ³ /h)
Biogas	165,97
Biomethane	61,83
Carbon dioxide	79,10

Table 2. Results of the design

5. Conclusions

After the completion of the project, it can be concluded that the objectives have been successfully achieved. A biomethane plant has been designed to treat the biogas produced in a real sewage treatment plant, and to inject the biomethane obtained into the gas network of the area. Furthermore, the numerical results are close to what would be obtained in a simulation with real plant data.

To date, this technology has not had a significant development, and, analyzing the project, some of the reasons can be found. First of all, the high cost of biomethane production compared to the historical price of natural gas hinders the profitability of the project. Today the price of biomethane is about 30% lower than that of natural gas. Therefore, although the advantages focused on the circular economy and the obtaining of renewable energy are remarkable, the cost of maintenance and acquisition of this type of plants is expensive. This, added to the continuous fluctuation of gas prices, reduces the profitability of the project.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	5
1.1 Motivación del proyecto.....	5
1.2 Objetivos	7
1.3 Metodología y recursos a emplear.....	8
1.3.1 Metodología.....	8
1.3.2 Recursos a emplear	9
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	10
Capítulo 3. Definición del Trabajo	12
3.1 Justificación.....	12
3.2 Composición y usos del biogás	13
3.2.1 Composición del biogás	13
3.2.2 Usos y alternativas del biogás.....	16
3.3 Descripción de la E.D.A.R	19
3.3.1 Línea de agua	21
3.3.2 Línea de fangos.....	22
Capítulo 4. Análisis del Sistema.....	30
4.1 Diseño del plano	30
4.2 Etapas de la planta.....	32
4.2.1 Línea de fangos.....	32
4.2.2 Línea de gas.....	34
4.2.3 Pretratamiento.....	36
4.2.4 Acondicionamiento.....	40
4.2.5 Purificación.....	42
4.2.6 Inyección y calidad.....	46
4.3 Cálculos	49
4.3.1 Caudales.....	49
4.3.2 Diámetros de tuberías	51
4.3.3 Presión y temperatura	53
Capítulo 5. Análisis de Resultados.....	55

<i>Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</i>	<i>57</i>
<i>Capítulo 7. Bibliografía.....</i>	<i>59</i>
<i>ANEXO I: Diagrama de flujos de proceso (PFD).....</i>	<i>62</i>

Índice de figuras

Figura 1. Etapas de la planta de biometano	7
Figure 2. Stages of the biomethane plant	10
Figura 3. Tratamientos del agua residual de una E.D.A.R	21
Figura 4. Etapas de la digestión anaerobia	24
Figura 5. Funcionamiento de filtros banda [12]	27
Figura 6. Funcionamiento de filtros prensa [12]	28
Figura 7. Funcionamiento de la deshidratación por centrifugación [12].....	29
Figura 8. Esquema de la planta de biometano	30
Figura 9. Intercambiador de calor de tipo espiral [10]	33
Figura 10. Caldera de agua de tipo pirotubular	34
Figura 11: Ciclo de vida del biogás hasta convertirse en biometano	35
Figura 12. Datos del soplante [23].....	39
Figura 13. Unidad de filtración VALOPACK.....	40
Figura 14. Datos del compresor [3]	41
Figura 15. Etapas de membranas en la purificación del biogás.....	43
Figura 16. Rendimientos y configuración de las membranas [22]	44
Figura 17. Diseño, material y dimensiones de las membranas [22]	45
Figura 18. Esquema de las corrientes en la etapa de purificación.....	49

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados del diseño	8
Table 2. Results of the design.....	11
Tabla 3. Composición del biogás de procedente de aguas residuales	14
Tabla 4. Características de la contaminación del agua.....	19
Tabla 5. Resultados previstos	20
Tabla 6. Requisitos del biometano para su inyección a la red de gas.....	47
Tabla 7. Caudales en la etapa de purificación	50
Tabla 8. Diámetros nominales de las tuberías	53
Tabla 9. Resultados del proceso	55

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El continuo uso y crecimiento de los combustibles fósiles está destruyendo nuestro planeta poco a poco. El uso de estos combustibles para satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad es insostenible debido al impacto negativo tanto al medio ambiente como a la salud humana. Ya se ven cambios y consecuencias en la actualidad, como la destrucción de la capa de ozono, o el cambio climático. Tal es la contaminación en algunos países como China, que es necesario ponerse mascarilla para salir a la calle.

El cambio climático, la contaminación del aire y la escasez de recursos fósiles son algunos de los desafíos más importantes que enfrentamos en el siglo XXI. Es por ello por lo que, entre la necesidad de descarbonización y el incremento en el precio de los combustibles fósiles, se haya producido un aumento en la búsqueda de nuevas fuentes energéticas.

Las únicas fuentes de energía que nos aseguran un futuro sostenible y capaz de sostener las crecientes necesidades energéticas de la sociedad son las energías renovables. La razón de esto es que son las únicas energías de fuente inagotable y con ningún tipo de gas que contamine o de efecto invernadero que dañe la atmósfera o el medio ambiente. Además, las tecnologías para capturar y poder convertir estas energías en calor o electricidad se han desarrollado de forma notable en los últimos años. Con lo que su precio se ha visto reducido y su eficiencia incrementada.

Sin embargo, las desventajas de estas energías presentan desafíos hoy en día que todavía deben ser afrontados. Entre ellos destacan el bajo poder de densidad energética, la variación de disponibilidad, su intermitencia, ... Es por ello por lo que es necesario seguir investigando y desarrollando estas tecnologías, para maximizar su potencial y superar estos desafíos.

Entre todas las fuentes de energía renovables que existen, este proyecto se centra en la conocida como el biometano. A grandes rasgos, esta fuente de energía es un biocombustible que procede de enriquecer y purificar el biogás obtenido en la digestión anaerobia de compuestos orgánicos.

Otra importante razón para la realizar este proyecto es por la alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). En concreto, este proyecto se alinea principalmente con 4 objetivos:

- **Energía asequible y no contaminante (7):** el biometano es una fuente de energía sostenible y no contaminante, que da una salida a ese biogás que se desaprovecha. Además, otros gases producidos como el dióxido de carbono pueden ser aprovechados también y así no son emitidos al medio ambiente. No solo soluciona este problema, sino que es una excelente salida a la biomasa generada en digestiones anaerobias, potenciando la economía circular.
- **Trabajo decente y crecimiento económico (8):** otra de las ventajas de las plantas de biometano, es que las plantas típicas donde se produce la biomasa se sitúan habitualmente en las afueras de las ciudades, en zonas despobladas. Por ello, se produciría un incremento económico de la zona, así como la posibilidad de asistir energéticamente.
- **Industria, innovación e infraestructura (9):** las plantas de biometano no son comunes hoy en día, es un concepto innovador y que todavía no está siendo muy utilizado. Sin embargo, es la opción ideal para crear una industria más productiva y menos contaminante.
- **Ciudades y comunidades sostenibles (11):** aunque este tipo de proyectos se lleven a cabo en zonas alejadas de la ciudad, España cuenta con una de las mejores redes de gas del mundo, con lo que se puede transportar el biometano producido a las grandes ciudades con mayor facilidad que en otros países. Consiguiendo así ciudades más sostenibles.

1.2 OBJETIVOS

Este proyecto tiene 3 objetivos principales:

- Diseñar un plano PFD del proceso general de una planta de biometano

El primer paso para llevar a cabo el proyecto es diseñar un PFD (diagrama de flujos del proceso) que incluya todas las etapas del proceso de convertir el biogás en biometano, así como los equipos involucrados. En concreto, las etapas incluidas son la línea de fangos, línea de gas, pretratamiento, purificación, acondicionamiento e inyección y calidad. Se incluirán todos los equipos necesarios y tratando de que la planta de biometano acoplada a la E.D.A.R. del Plantío tenga el máximo aprovechamiento de la misma.

- Realizar los cálculos necesarios y la selección de los equipos

Con este segundo objetivo se busca hacer “real” el proyecto. Es decir, hacer los cálculos necesarios dentro de la planta de las corrientes y las etapas, así como la adecuada selección de los equipos que se usarían. Estos cálculos se harán de acuerdo con los datos de caudal de producción reales de biogás que posee la E.D.A.R., y usando los datos de emplazamiento y del canal de gas que haya en la zona. Con esto, se consigue un cálculo aproximado de la emisión y obtención de los distintos gases, para ver la viabilidad de la planta de biometano.

- Inyección a red

Este último objetivo es el más importante, ya que el objetivo último de implantar esta planta de biometano es para poder inyectar el biometano a la red de gas y así poder distribuirlo. Para ello el biometano tiene que llegar a este punto con unas características y requerimientos específicos que se logran a lo largo del proceso.

1.3 METODOLOGÍA Y RECURSOS A EMPLEAR

1.3.1 METODOLOGÍA

El primer paso para llevar a cabo el proyecto es hacer una profunda investigación sobre los conceptos relacionados con el biogás y el biometano. Esto incluye entender desde cómo funciona una digestión anaerobia (de donde se obtiene el biogás), hasta comprender qué tecnologías existen para conseguir una adecuada conversión del biogás en biometano.

Antes de realizar el plano, se hará un esquema del proceso que incluya todas las etapas necesarias. El siguiente paso es aprender a utilizar el programa AutoCAD, ya que es el escogido para realizar el diagrama de flujos del proceso. Con esta herramienta se dibujará un plano normalizado de la planta con los equipos y etapas necesarios. Deberá hacerse un análisis y una justificación para el uso de cada equipo y etapa. Además, se tratará de optimizar el diseño para un mayor aprovechamiento de la planta que incida directamente en un menor costo de la instalación.

Una vez dibujado el plano, gracias a las bases de partida proporcionados por CT3 Ingeniería, se analizarán dichos datos para extraer los más relevantes al proyecto, incluirlos y discutirlos. Además, con estos datos de partida se podrán realizar los cálculos aproximados de la obtención y condiciones de los flujos obtenidos a lo largo de la planta. Dichos cálculos incluirán las temperaturas, caudales, diámetros y presiones de cada corriente del plano. Para ello, se investigarán las propiedades del biogás y se elegirán las leyes adecuadas que lleven a la consecución de los cálculos. Dichos cálculos se realizarán en el programa Excel y se incluirán las ecuaciones en la memoria.

A su vez, cuando se vayan consiguiendo los cálculos, se contactará con suministradores para conseguir los equipos que corresponderían a cada etapa del proceso, con sus características.

1.3.2 RECURSOS A EMPLEAR

Como se ha comentado en el apartado anterior, los recursos a utilizar en este proyecto son:

1. Datos de partida del Canal de Isabel II de la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda
2. AutoCAD
3. Excel

Los datos de partida servirán para iniciar el proyecto y poder realizar posteriores cálculos con los datos reales de la planta. De esta forma se puede hacer un análisis aproximado a lo que estaría pasando en la planta de forma real.

El programa de diseño AutoCAD servirá para diseñar el plano de la planta de biometano. Dicho plano será un plano normalizado en formato DIN A3, que representará el diagrama de flujos del proceso (PFD). El plano, además incluirá una tabla de Excel con las temperaturas, caudales y presiones de las distintas corrientes de la planta, así como el diámetro mínimo necesario de las tuberías.

Por último, Excel se utilizará para realizar los cálculos correspondientes que sirvan para obtener el caudal, presión, temperatura y diámetro necesario de las corrientes. Con estos cálculos se podrá contactar con suministradores de los equipos necesarios y se obtendrán unos resultados aproximados a la realidad.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Las alternativas al uso de combustibles fósiles ya existen, son las fuentes de energía renovables. Entre ellas destacan la solar, la eólica, la hidráulica, ... Sin embargo, este proyecto se centra en los biocombustibles. En concreto, en el biometano.

Los biocombustibles son combustibles líquidos o gaseosos que derivan de la biomasa, como los residuos agrícolas o la materia orgánica de deshecho. Esta biomasa, cuando se degrada en ausencia de oxígeno (digestión anaerobia), produce un biogás que puede ser utilizado como fuente de energía. Este biogás consiste en una composición de gases que contiene: metano (50-70%); dióxido de carbono (30-40%); hidrógeno (<5%), ácido sulfhídrico; y otros gases como nitrógeno u oxígeno. No obstante, el uso de esta tecnología como fuente de energía no presenta un 100% de eficacia actualmente, y además se desperdicia parte de los gases.

Existe otra forma de aprovechar el biogás y aumentar tanto su eficacia como su aprovechamiento, que es convertirlo en biometano. Esta tecnología ya existe y consiste en purificar, enriquecer y acondicionar el biogás para que esté compuesto únicamente por biometano. Tras las distintas etapas en que consiste el proceso, se consigue la separación de todos los gases, con lo que ya se puede aprovechar el biometano para ser inyectado a la red de gas natural. Además, gases abundantes en el biogás como el dióxido de carbono también puede ser aprovechado para distintos usos.

Las ventajas de esta tecnología son varias. Además de tener una mayor eficacia que utilizar únicamente el biogás para generar electricidad, el biometano puede ser transportado a lo largo de la red de gas hasta casi cualquier punto de España. Esta es una de las mayores ventajas, ya que el biogás solo puede ser utilizado en la misma planta en la que se origine, o en zonas cercanas. Pero, gracias a que España posee una de las mejores redes de gas de Europa, su transporte y uso en distintos sitios es mucho más fácil que en otros países, con lo que es necesario potenciar esta tecnología ya que tenemos mayor facilidad para ello.

No solo eso, si no que los datos de España frente a Europa de esta tecnología son muy bajos. Solo constituimos apenas un 0.3% del total de plantas de biogás y biometano que existen en Europa. No superamos las 100 plantas frente a las 20.000 que ya existen. España es el país número 22 de 28 países que ya han desarrollado esta tecnología en la Unión Europea.

Todo esto ya es sabido y está siendo estudiado, por lo que se ha creado un plan de actuación y una hoja de ruta con visión a 2030, en la que se espera que se estén produciendo hasta 10,41 TWh de biogás, muy lejos de las cifras de producción que hay actualmente.

Este biocombustible, como ya se ha mencionado, procede de la biomasa, y en España las plantas son principalmente de depuradoras de agua y residuos de vertederos. La incorporación de estas plantas en macro granjas prácticamente no existe, y es otra gran fuente de residuos para la generación de biogás. Con lo que existe un gran potencial para desarrollar esta tecnología en España; y, además, esta tecnología presenta un gran futuro gracias a su gran eficacia y su ayuda a la hora de eliminar residuos y detener la emisión de gases nocivos para la atmósfera y la salud humana.

Es por ello por lo que, aunque esta pionera tecnología ya esté desarrollada, este proyecto se hace con el objetivo de acoplar la planta de biometano a la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda (Madrid), la cual no tiene plan todavía para desarrollar una planta de biometano. Además, estando a las afueras de la capital, tiene gran potencial para acumular residuos y mayor facilidad para la inyección de biometano a la red de gas de la zona.

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 JUSTIFICACIÓN

El mundo necesita soluciones para abordar problemas como la contaminación y la escasez de combustibles fósiles. El impacto que tiene este problema es preocupante y ya se pueden ver sus consecuencias en la sociedad, con lo que hay que abordarlo cuanto antes. Una de las mejores soluciones ya la tenemos, pero no la usamos; y sirve tanto para generar energía, como para potenciar la economía circular, el biometano.

Además, otro desafío que afrontamos es la necesidad de pasar de una economía lineal a una circular. Esto es porque el adquirir, consumir y desechar sin control alguno los recursos limitados que posee el planeta va a llevar tanto a una crisis mundial como a la destrucción del mismo. Necesitamos una economía circular basada en la reutilización y el reciclaje de los residuos, limitando así la adquisición de nuevos recursos.

Una de las soluciones, ya dicha es el biometano. Sin embargo, el fluctuante y alto precio del gas hace que esta tecnología no se utilice mucho. Es por ello por lo que hay que desarrollar y potenciar esta tecnología, es el futuro. Y, además, ya que España posee una de las mejores redes de gas natural de Europa, debería encabezar la lista de los países con mayor desarrollo de plantas de biometano.

Es por todo esto por lo que el biogás tiene el mayor potencial en Europa entre las energías renovables. Sus ventajas son numerosas:

- Juega un importante papel en la gestión de los residuos, el cual es un gran desafío que enfrentamos actualmente, y potencia enormemente la economía circular.
- Ayuda a cuidar el medio ambiente, ayuda a mejorar la calidad del aire del planeta y contribuye a una importante reducción de gases que favorecen el cambio climático.

- Tiene aplicaciones en casi cualquier industria, desde la agrícola, hasta la automovilística.
- Es un importante paso hacia la descarbonización y una menor dependencia de los combustibles fósiles.
- Es una oportunidad para explotar las zonas rurales más despobladas y crecer económicamente.
- Tiene una mayor eficiencia energética que otras energías renovables, como la fotovoltaica.

Por eso este proyecto se centra en esto mismo, la implantación de una planta de biometano a la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda. El proceso consiste en diseñar la planta, y puede servir como inspiración y base para que se realice en los cientos de plantas que tenemos con generación de biomasa. Tanto las depuradoras de agua, como de residuos agrícolas o las macro granjas.

3.2 COMPOSICIÓN Y USOS DEL BIOGÁS

3.2.1 COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

El biogás, como bien se ha mencionado anteriormente, puede tener distintas procedencias, como residuos agrícolas y ganaderos, depuradoras de agua, residuos industriales y residuos sólidos urbanos (RSU). La composición de dichos biogases varía ligeramente dependiendo de su procedencia, pero en esencia, la diferencia es casi insignificante.

En general, el biogás está compuesto principalmente por: metano, dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno, oxígeno, sulfuro de hidrógeno, compuestos volátiles y siloxanos. En la Tabla 3 se puede ver la composición del biogás producido en una E.D.A.R.

Gas	Lodos depuradora (%mol)
CH ₄	50-80

CO ₂	20-50
Vapor H ₂ O	Saturación
H ₂	0-5
H ₂ S	0-1
NH ₃	Trazas
CO	0-1
N ₂	0-3
O ₂	0-1
Siloxanos	0-100 mg/m ³
HCH	Trazas

Tabla 3. Composición del biogás de procedente de aguas residuales

Puesto que el objetivo de este proyecto es transformar el biogás en biometano y poder ser inyectado en la red de gas, a continuación, se explica la composición de este y qué elementos deben ser eliminados. Y cuáles pueden ser aprovechados.

- Metano

La obtención de este gas es el objetivo del proyecto. Para ello el biogás sufrirá un proceso de purificación y acondicionamiento para poder obtener metano puro. Este metano tiene propiedades casi idénticas al gas natural, por lo que se puede inyectar a la red de gas natural, el cual es el objetivo final.

Una de las ventajas de inyectar el metano en la red de gas para ser reutilizado, es que el metano posee 21 veces mayor potencial de calentamiento global que el CO₂. Esto supone un gran beneficio a la hora de reducir las emisiones de gases invernadero.

- Dióxido de carbono

El dióxido de carbono es el segundo mayor componente que tiene el biogás. No solo eso, sino que es el principal gas de efecto invernadero. Su liberación a la atmósfera debe ser reducida drásticamente, con lo que este proceso es una ventaja en ese sentido. No solo se consigue no emitirlo a la atmósfera, si no que, tras el proceso de acondicionamiento y pretratamiento, se obtiene dióxido de carbono puro que tiene distintas aplicaciones en diferentes sectores.

En la planta de biometano esta separación se consigue gracias a una triple etapa de separación de membranas, la cual es la responsable de separar eficientemente aproximadamente el 99% del dióxido de carbono presente.

- Sulfuro de hidrógeno

Aunque no es uno de los elementos que mayor peso tenga en la composición del biogás, el sulfuro de hidrógeno debe ser eliminado. Es un gas contaminante y tóxico tanto para el medio ambiente como para la salud humana, y puede corroer los equipos y tuberías por los que pasa a lo largo del proceso. Además, si el sulfuro de hidrógeno se quema, se forman óxidos de azufre que son todavía más tóxicos que el inicial.

La forma de eliminar este compuesto es mediante filtro de carbón activo, que se verá más adelante.

- Vapor de agua

Puesto que los lodos de la depuradora contienen agua, el biogás producido en el digestor anaerobio sale de él saturado de vapor de agua. El vapor de agua es fundamental eliminarlo, puesto que disminuye notablemente el PCI (Poder calorífico inferior) del biogás, influyendo directamente en su rendimiento energético. Además, no puede ser inyectado a la red de gas natural una vez enriquecido y purificado. También es peligroso porque con los cambios de temperatura, puede condensar y dejar agua líquida en los equipos o tuberías del proceso.

Para eliminarlo en su totalidad, la planta tiene 2 etapas de secado y deshumidificación. Una antes del pretratamiento, y otra antes de la purificación. Además, hay botes de purga para ayudar a remover el líquido en la línea de gas.

- Siloxanos y COVs

Los siloxanos son compuestos que contienen sílice y al igual que el vapor de agua, son de los componentes que más afectan al rendimiento energético del biogás. Además, en las plantas depuradoras de aguas residuales tienen mayor presencia que en el biogás de otras industrias. Similar al sulfuro de hidrógeno, el efecto de los siloxanos es abrasivo en los equipos, deteriorando daños y reduciendo su vida útil.

Los COVs son compuestos orgánicos volátiles procedentes de la digestión anaerobia. Estos compuestos presentes en el biogás son contaminantes, pueden afectar al rendimiento de los equipos y deben ser eliminados antes de la inyección del biometano a la red de gas.

Para reducir ambos compuestos, hay un filtro de carbón activo en la etapa de pretratamiento, además de distintos hiperfiltros a lo largo de la planta.

- Otros gases

Otros gases como el oxígeno y el nitrógeno también deben ser eliminados antes de inyectar el biometano a la red de gas. El oxígeno puede provocar el crecimiento de microorganismos, y tanto este como el nitrógeno son fundamentales que se eliminen para cumplir con los requisitos de calidad del gas.

3.2.2 USOS Y ALTERNATIVAS DEL BIOGÁS

El biogás tiene múltiples usos, dependiendo de las necesidades y la capacidad que tenga la instalación donde se produzca. También depende de los objetivos y del tipo de industria, un uso puede ser más útil que otro. No siempre la conversión al biometano es la forma más eficaz de aprovechar el biogás. La razón de mayor peso a la hora de elegir el uso es la proximidad entre el aprovechamiento y la generación del biogás. Todas las opciones utilizan tecnologías con el gas como combustible.

Los principales usos son la generación de calor, de electricidad, la conversión a biometano para inyectarlo a la red de gas, y usarlo como combustible para vehículos.

3.2.2.1 Generación de calor

La opción más económica y simple de utilizar el biogás es para la generación de energía térmica. Los requisitos y equipos para quemar el biogás son relativamente sencillos, con lo que hace que sea fácil y simple. Un quemador de gas adaptado se puede utilizar para quemar el biogás. Sin embargo, este calor debe ser utilizado en instalaciones próximas a donde se encuentre el quemador, con lo que es una desventaja a la hora de querer aprovechar el biogás con máxima eficacia.

No obstante, es una buena solución para instalaciones que generen una cantidad pequeña de biogás, ya que otros usos requieren una mayor cantidad de producción. Pequeñas granjas ganaderas o alguna industria del sector agroalimentario son ejemplos donde se puede implementar esta tecnología para el biogás.

3.2.2.2 Generación de electricidad

La generación de electricidad es la opción más elegida en las plantas de producción de biogás de España. Plantas de depuración de aguas residuales o a partir de residuos orgánicos son ejemplos de donde se implementa esta tecnología. Además, el calor generado residual se puede aprovechar también, que es lo que ocurre con los motores de cogeneración. De hecho, los sistemas combinados de electricidad y calor son muy comunes, ya que implican un mayor aprovechamiento del biogás.

Sin embargo, al igual que con el calor, el uso de esta tecnología debe priorizar si el consumo de la electricidad y el calor son próximos a las instalaciones donde se produzca el biogás. Otra desventaja es que este sistema tiene una eficiencia no demasiado alta. Los motores de combustión interna tienen alrededor de un 40% de eficacia, mientras que los motores de cogeneración rondan el 80%. Debido a esto, esta solución está bien en caso de necesitar electricidad próxima a la instalación, pero no supone el mayor aprovechamiento del biogás.

3.2.2.3 Combustible para transporte

Utilizar el biogás como combustible para transporte ya implica unas tecnologías más elaboradas y costosas. Hoy en día el biometano ya está siendo estudiado y utilizado en mayor medida con esta finalidad. De esta forma, se da un paso más a favor de la descarbonización, uno de los mayores factores de contaminación del planeta. Básicamente, es una opción muy eficaz y con numerosas ventajas tanto con el medio ambiente como con la economía circular.

Sin embargo, hay muchas limitaciones y desafíos a los que se enfrenta todavía. La necesidad de vehículos adaptados a esta tecnología, de una mejor red de repostaje, y la energía que se necesita para comprimir a gran escala el biometano son desafíos que todavía deben ser afrontados para una mayor rentabilidad y eficacia.

3.2.2.4 Biometano para inyección a red

Finalmente, el biogás puede ser inyectado a la red de gas. Esta opción, al igual que el combustible para vehículos, requiere un proceso de purificación y acondicionamiento del biogás para poder ser convertido a biometano. Una vez convertido, este ya posee unas características muy similares al gas natural, con lo que adaptándolo a las condiciones necesarias se puede inyectar a la red de gas de España.

Esta tecnología es más costosa que usar directamente el biogás producido y quemarlo, pero tiene más ventajas. La obtención del biometano tiene una eficacia del 99%, y, además, se obtiene casi toda la porción de CO₂ contenido en el biogás, que como se puede ver en la composición de este, es el segundo subproducto más presente.

El CO₂ normalmente no se puede utilizar directamente, pero el obtenido del biometano, como ha pasado etapas de acondicionamiento y purificación, es dióxido de carbono puro, el cual sí puede ser utilizado en distintas industrias. Algunas aplicaciones son en invernaderos y agricultura, la producción de e-combustibles, la industria alimentaria, como la carbonatación de bebidas, la industria farmacéutica, para extintores de incendios, ...

Como se puede ver, el uso de esta tecnología presenta un gran aprovechamiento del biogás, así como eficacia. Además, el introducir el gas en la red de transporte nacional, hace que se

pueda distribuir hasta casi cualquier punto para ser utilizado, no tiene que ser inmediatamente próximo. Y no solo eso, si no que España tiene una de las mejores redes de gas de Europa, con lo que es más fácil que en otros países.

3.3 DESCRIPCIÓN DE LA E.D.A.R

Una E.D.A.R. es una Estación Depuradora de Aguas Residuales, que sirve para tratar aguas residuales bien de origen urbano o industrial. El agua que llega a la E.D.A.R. tiene unas características y contaminantes que deben ser eliminados para el consumo humano. En concreto, en la Tabla 4 se puede ver la composición del agua que llega a la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda.

Compuesto	Concentración (mg/l)
DBO5	300
SS	400
DQO	600
NTK	60
P	11

Tabla 4. Características de la contaminación del agua

La E.D.A.R se encarga de que el agua sea tratada mediante distintos procesos con el objetivo de que tenga las cantidades mínimas requeridas para que el agua sea consumible. En la Tabla 5 se pueden ver los resultados previstos que tiene la E.D.A.R del Plantío tras la depuración del agua.

Compuesto	Concentración (mg/l)
DBO5	≤ 25
SS	≤ 35
DQO	≤ 125
NTK	≤ 10
P	≤ 1

Tabla 5. Resultados previstos

Como ya se ha mencionado, el agua de la E.D.A.R. debe ser tratada mediante una serie de procesos químicos, físicos y biológicos. Además, llega un punto en el proceso en el que se separan los lodos residuales del agua que se pretende restaurar, por lo que hay una línea de agua, y otra línea de fangos. En la Figura 3 se ven los distintos procesos mencionados por los que debe pasar el agua residual para finalmente ser apta para consumo, así como en qué punto de la planta se obtiene el biogás.

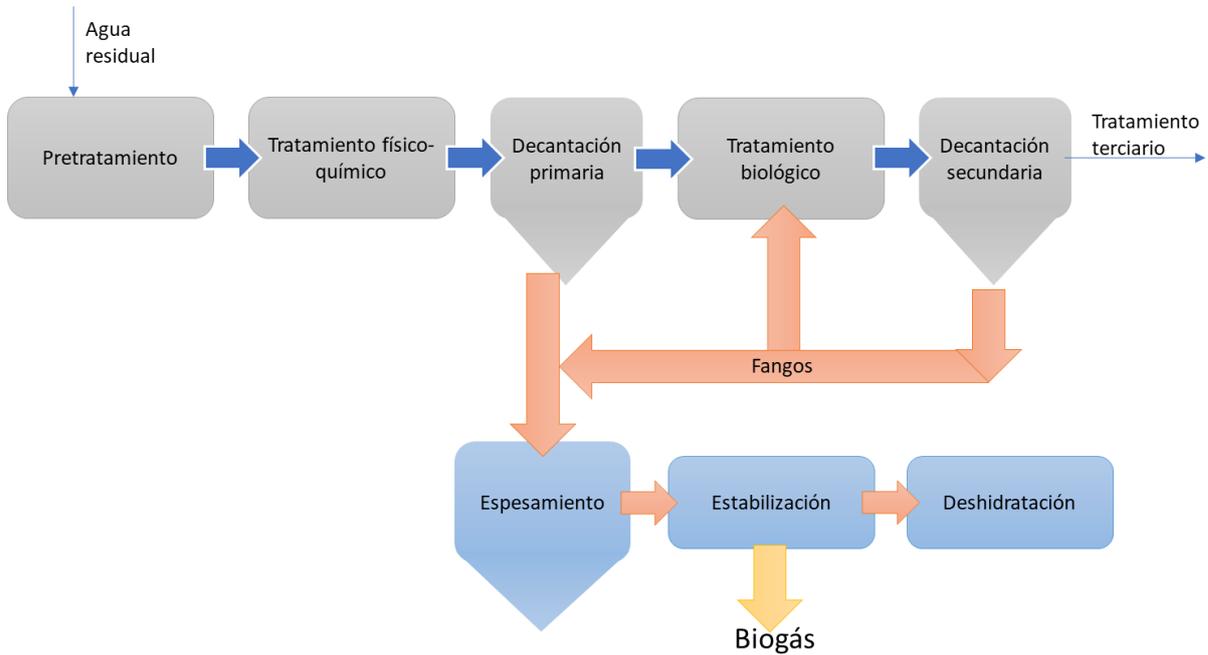


Figura 3. Tratamientos del agua residual de una E.D.A.R

3.3.1 LÍNEA DE AGUA

Esta línea de agua no tiene implicación en este proyecto, pero, para poner en contexto, los procesos que tratan el agua en la E.D.A.R. de Majadahonda son los siguientes:

- Obra de llegada
- Pretratamiento
- Decantación de caudales aliviados
- Elevación de agua bruta
- Tratamiento primario
- Reactor biológico
- Decantación secundaria
- Tratamiento terciario
- Depósito de agua regenerada

Una vez el agua pasa por el ciclo completo, ya tiene las características y la contaminación mínima para ser apta para consumo.

3.3.2 LÍNEA DE FANGOS

Esta línea sí es de interés para el proyecto, por lo que a continuación se va a explicar brevemente el proceso que se lleva a cabo en la E.D.A.R. para tratar los fangos, ya que aquí se produce el biogás que se quiere tratar.

Los fangos son una mezcla de agua y sólidos consecuencia de la depuración del agua. En concreto, los fangos primarios vienen de la decantación primaria del agua, y los fangos secundarios de la decantación secundaria. Estos fangos deben pasar por 3 etapas: espesamiento, estabilización y deshidratación o secado, como se puede ver en la Figura 3.

3.3.2.1 Espesamiento

Los fangos primarios son los sólidos y materiales en suspensión que se generan en el tratamiento primario del agua, en este caso, la decantación primaria. Esta etapa consiste en un acondicionamiento de los fangos antes de poder ser estabilizados. El espesamiento es un proceso físico que pretende aumentar la concentración del fango, es decir, reducir su volumen para un mejor manejo en las siguientes etapas.

- Tamizado y espesado por gravedad

El objetivo del tamizado es eliminar los sólidos de tamaño considerable que contengan los fangos ya que, si estos pasan a las siguientes etapas, llegarán a acumularse en el digestor anaerobio.

El espesamiento puede realizarse de 2 formas distintas. Por gravedad, o por flotación. Los fangos primarios utilizan espesamiento por gravedad, que consiste en eliminar el agua que contengan los fangos. Estos se dejan en reposo en unas estructuras en las cuales los sólidos más densos van sedimentando al fondo del depósito por efecto de la gravedad. El agua resultante en esta etapa vuelve a la línea de agua para seguir siendo tratada.

La cantidad de fangos que llega a esta etapa en la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda es de 519,03 kg/h, con una concentración de 14,40 kg/m³.

- Espesamiento por flotación

El espesado por flotación se utiliza para los fangos secundarios. El funcionamiento es el siguiente: el fango se introduce en un tanque, en el cual se inyecta aire a presión desde la parte inferior del mismo. Este aire sube hasta la superficie en forma de burbujas, que hacen flotar los flóculos formados y acumularse en la superficie del tanque.

El caudal de fangos secundarios que llega al espesado de flotación en esta planta es de 32,91 kg/h.

3.3.2.2 Estabilización

Los objetivos de la estabilización de los fangos son reducir la cantidad de patógenos, reducir el volumen de fangos (aumentar su concentración), estabilizarlos para una mejor manipulación en posteriores usos y etapas, neutralizar las bacterias y virus, y disminuir la materia volátil. Hay 3 tipos principales de estabilización:

- Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico que se da cuando la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno. Esto puede ocurrir de forma natural, por ejemplo, en el fondo de los lagos. Los objetivos de la digestión son: reducir el contenido de materia orgánica, estabilizar el fango y como consecuencia, se produce el biogás. La materia orgánica es degradada mediante procesos microbiológicos, y da lugar a una mezcla de gases. Principalmente metano y dióxido de carbono, entre otros, lo que se conoce como biogás.

Los digestores se pueden distinguir por el tipo de carga, alta y baja. Un digestor de baja carga no tiene ni mezcla, ni calentamiento; mientras que un digestor de alta carga tiene mezclado, calentamiento del fango y tanto alimentación como extracción de fangos continua. El digestor anaerobio de la E.D.A.R. del Plantío es de alta carga. Más adelante se explicará el proceso de circulación de fangos y calentamiento del digestor.

El proceso de degradación de la materia orgánica se da lugar en distintas etapas, como se puede ver en la Figura 4, que consisten en hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

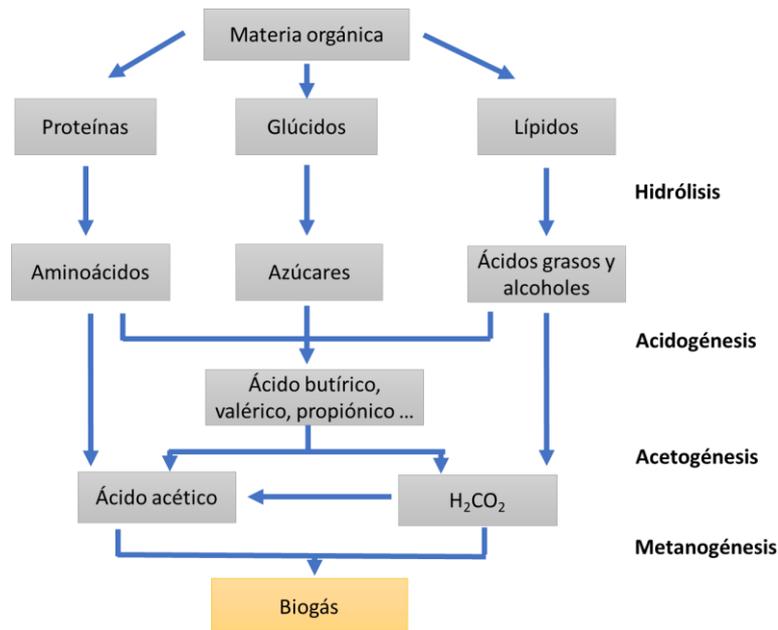


Figura 4. Etapas de la digestión anaerobia

Al descomponerse la materia orgánica, primero ocurre la **hidrólisis**, donde dicha materia se descomponen en alcoholes, ácidos de cadena larga y azúcares. Tras esta etapa se consigue una mejor solubilidad de la biomasa que facilita la degradación.

La segunda etapa es la **acidogénesis**, donde los ácidos de cadena larga se transforman en otros de cadena más corta como el butírico, valérico, o propiónico. Esto ocurre al actuar las bacterias acidogénicas. Posteriormente, actúan las bacterias acetogénicas en la etapa de **acetogénesis**, convirtiendo estos compuestos en H_2 , CO_2 y ácido acético.

Por último, las bacterias metanogénicas actúan en la última etapa (**metanogénesis**) para formar principalmente una mezcla de dióxido de carbono y metano, lo que se conoce como biogás. Este biogás producido es el que se utiliza en este proyecto para obtener biometano.

Esta digestión es la utilizada en la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda. A la digestión anaerobia llega un caudal de fangos de 11,18 m³/h, que produce un caudal de biogás de 165,87 Nm³/h, que es el dato de interés para este proyecto.

- Digestión aerobia

Otro proceso para la estabilización de fangos es la digestión aerobia. Esta, al igual que la anaerobia, consiste en un proceso biológico de degradación de la materia orgánica. En este caso, en presencia de oxígeno. La aireación de los fangos se lleva a cabo en un tanque abierto, que usa difusores de aire o algún equipo de aireación. Se puede dar de forma intermitente o continua. La digestión anaerobia tiene las siguientes ventajas y desventajas frente a la digestión anaerobia:

- Es un proceso más rápido que una digestión anaerobia, pero requiere un mayor consumo energético.
- Los digestores aerobios son más simples que los anaerobios, por lo que son menos costosos.
- Los lodos producidos en una digestión aerobia generalmente resultan en una deshidratación más difícil.
- La eficiencia del proceso varía con la fluctuación de la temperatura.
- La digestión aerobia no produce olores, mientras que el biogás de la digestión anaerobia tiene mal olor.

- Estabilización química

La estabilización química suele realizarse para casos muy puntuales, generalmente cuando los lodos tienen procedencia industrial y contienen metales. El proceso consiste en eliminar los microorganismos y virus patógenos con una variación brusca y extrema del pH. Esta variación se puede hacer añadiendo cloro, ácidos, o cal.

- Cal

Se añade la dosis que haga que se mantenga el pH en torno a 12 durante un mínimo de 2 horas. Esto consigue que se eliminen los microorganismos patógenos y los malos olores. Se suele usar en depuradoras pequeñas, depuradoras que necesiten un estabilizado adicional, o como sistema complementario de estabilización.

- Cloro

El proceso consiste en añadir cloro a los lodos en recintos cerrados y tiempos de retención cortos (en torno a los 90 minutos). Este sistema no es muy utilizado.

3.3.2.3 Línea de gas

La línea de gas es simplemente el camino que lleva el biogás en la E.D.A.R. del Plantío. En este caso el biogás se conduce a unos motores de cogeneración para generar electricidad. En este proyecto se cambia esta línea de gas para incorporar una planta de tratamiento adecuado del biogás para convertirlo a biometano.

3.3.2.4 Deshidratación de fangos

La deshidratación consiste en un proceso físico que se utiliza para reducir la humedad y el volumen de los fangos una vez estabilizados. Una vez se produce la deshidratación, los fangos tienen características sólidas que lo hacen más manejables y transportables. Además, se evitan olores y el poder calorífico aumenta al eliminar la humedad.

Hay 3 formas de realizar este proceso: natural, térmica o mecánica.

- Natural

La deshidratación de los fangos de forma natural puede ocurrir en eras de secado o en tanques de lodos o lechos de carrizo. Las eras de secado consisten en tanques rellenos de arena, los cuales actúan como filtro separador. La deshidratación se produce mediante evaporación. El tiempo de recuperación es de aproximadamente 15 días, tiene un alto coste de mano de obra y necesita reponerse la arena cada cierto tiempo. Además, necesita una gran superficie de terreno para llevarlo a cabo.

Los estanques de lodos, por otro lado, tienen tiempos de retención inviabilizables y se suele utilizar en producciones pequeñas u ocasionales de lodos.

- Mecánica

La deshidratación mecánica está más extendida que la natural, ya que es utilizada para poblaciones grandes. Los principales métodos son:

- Filtración al vacío

Este es uno de los métodos más utilizados para la deshidratación de fangos. La separación del agua se consigue mediante un medio poroso que deja pasar el líquido y retiene los sólidos. En la parte interior del cilindro se aplica el vacío mediante succión, dejando pasar el agua y formando una capa de lodo deshidratado. Requiere un gran consumo energético

- Filtros banda

El funcionamiento de este proceso consiste en hacer pasar el lodo entre 2 telas, que son prensadas por unos tornillos. Generalmente se floccula el fango al inicio para mejorar el filtrado. De esta manera el agua se separa del lodo mediante un drenaje. En la Figura 5 se puede ver mejor este método.

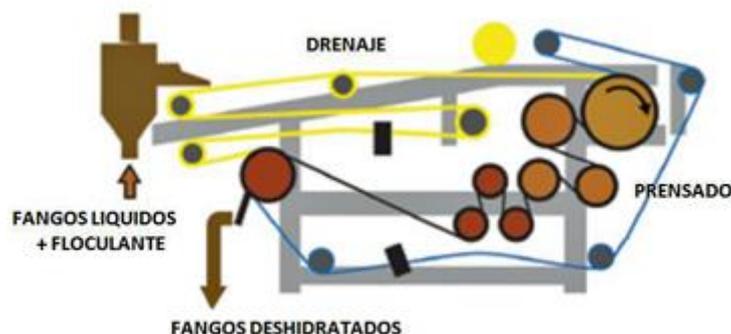


Figura 5. Funcionamiento de filtros banda [12]

○ Filtros prensa

Este método utiliza unas prensas a modo de acordeón. Como se puede ver en la Figura 6, una serie de placas verticales son las encargadas de comprimir los lodos mediante un gato hidráulico en la cabeza del equipo. El lodo se hace pasar a través de estas placas verticales, de forma que se forman tortas de fango secos entre cada placa vertical. La tela y las ranuras donde se evacúa el filtrado deben ser limpiadas periódicamente.

Este proceso es más costoso que otros.

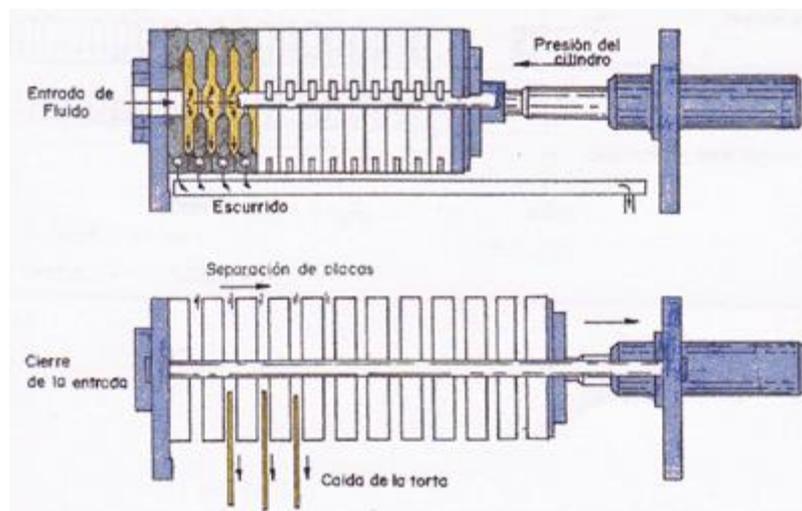


Figura 6. Funcionamiento de filtros prensa [12]

○ Centrifugación

Para iniciar este proceso es necesario acondicionar el fango. Para ello se le añade un polímero que consigue una mejor separación entre el líquido y el fango. El fango se introduce en un cilindro cónico, de forma que este va siendo impulsado por un tornillo giratorio. Por la acción de la fuerza centrífuga, las partículas de mayor peso se depositan en el interior de la pared. El tornillo lleva estas partículas a la parte cónica. Los sedimentos son descargados y recogidos, y el líquido se recoge en el otro extremo por efecto de la gravedad por colectores. Este líquido

se consigue que llegue al otro extremo gracias a la continua inyección del fango. En la Figura 7 se puede ver mejor la explicación de este proceso.

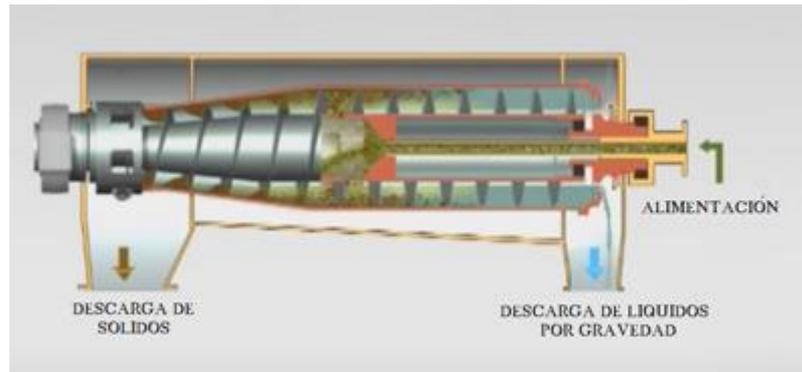


Figura 7. Funcionamiento de la deshidratación por centrifugación [12]

La deshidratación que se lleva a cabo en la E.D.A.R. del plantío es por centrifugación mecánica. En cuanto a los números de esta etapa, entran a deshidratar 16,45 m³/h de fangos, y se obtienen 1,97 m³/h de fangos secos.

- Secado térmico

Este proceso se suele incluir para eliminar el agua que permanece en los fangos tras una deshidratación mecánica. La deshidratación térmica se produce a altas temperaturas (350-600 °C). Como consecuencia se consiguen lodos secos y sin patógenos.

Capítulo 4. ANÁLISIS DEL SISTEMA

4.1 DISEÑO DEL PLANO

Como diseño de la planta se ha elaborado un plano de flujos de proceso, lo que se conoce como PFD. Para llevar a cabo el diseño, hay que saber cuáles son las etapas y equipos involucrados en el proceso. En un apartado más adelante se explicarán con detalle las etapas y los equipos. En la en la Figura 8 se puede ver un esquema de la planta con las fases que involucra.

En concreto las fases necesarias para purificar y enriquecer el biogás son el pretratamiento, acondicionamiento, purificación e inyección y calidad.

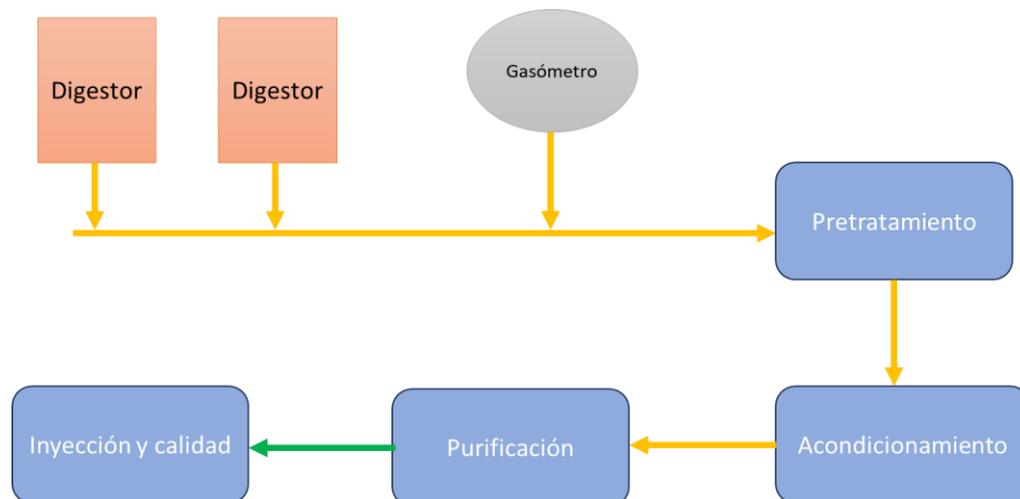


Figura 8. Esquema de la planta de biometano

4.2 ETAPAS DE LA PLANTA

Como ya se ha visto en capítulos anteriores, el objetivo de este proyecto es diseñar una planta de purificación y enriquecimiento del biogás. Con el biogás convertido en biometano, se pretende inyectarlo a la red de gas natural de la zona. Para ello, el biogás debe pasar las siguientes etapas: pretratamiento, acondicionamiento, purificación e inyección y calidad.

El biogás que se usa en este proyecto es el obtenido en la digestión anaerobia de la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda, con los datos de emplazamiento y los datos de producción que tiene.

4.2.1 LÍNEA DE FANGOS

El ciclo del biogás comienza aquí. Como ya se ha visto en el capítulo anterior, el biogás se genera al degradarse la materia orgánica presente en los fangos, en ausencia de oxígeno. Para ello, se introducen fangos fríos en el digestor después de haberse tratado correctamente para ser estabilizados. Estos fangos se mezclan con los calientes que ya están presentes en el digestor y generan biogás, el cual es extraído y conducido a lo largo de la línea de gas para su tratamiento.

Por otro lado, hay una parte de los fangos que se extraen del digestor para calentarlos y así mantener una temperatura de digestión constante. En el caso del digestor del Plantío, de 35°C. Estos fangos se llevan a un intercambiador de calor para ser calentados, el cual funciona con una caldera de agua caliente. La caldera funciona con una porción del biogás obtenido, para un mejor aprovechamiento y rendimiento de este. Como valor medio se toma un caudal de 25 Nm³/h de biogás para quemar en la caldera. Al quemar el biogás, se genera calor y se calienta el agua que se utiliza en el intercambiador de calor. El agua caliente que llega al intercambiador tiene 70°C, y el agua fría que vuelve a la caldera 60,8°C.

Por último, los fangos salen del intercambiador a una temperatura de 35°C y se vuelven a introducir en el digestor anaerobio para que repitan el proceso y se mezclen con la nueva

biomasa introducida y así seguir obteniendo biogás. A continuación, se explican los equipos utilizados y su función en la línea de fangos:

- Digestor anaerobio

El digestor anaerobio es un tanque cerrado herméticamente de 20 m de diámetro y altura cilíndrica útil de 13 m, un volumen útil de 4188,8 m³ y dispone de un agitador vertical con una potencia de 5 Kw. Aquí es donde ocurre todo el proceso de descomposición de la materia orgánica para la generación del biogás como se ha mencionado anteriormente. Hay distintos tipos de digestor, este en concreto es de alta carga. Hay 2 digestores anaerobios en la planta. Los fangos entran a digestión a razón de 5,59m³/h a cada digestor y una temperatura de 10°C. La recirculación de los fangos tiene un caudal de 22,5 m³/h por digestor, salen a 30°C de ellos y se calientan en el intercambiador a 35°C, para volver a ser introducidos y calentar el digestor.

- Intercambiador de calor

Este intercambiador es de tipo espiral, se puede ver en la Figura 9 y es el encargado de calentar los fangos que le llegan con agua caliente. El funcionamiento es el mencionado anteriormente. El salto térmico en el intercambiador es de 9,2°C.

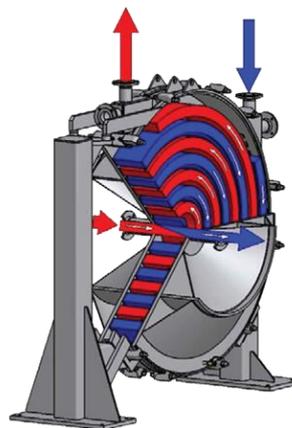


Figura 9. Intercambiador de calor de tipo espiral [10]

- Caldera de agua caliente

La caldera es de tipo pirotubular, como se puede ver en la Figura 10. Se encarga de quemar el caudal de biogás que le llega. Con el calor generado al quemarlo calienta el agua fría que le llega del intercambiador para devolverla caliente. Tiene una potencia térmica útil adoptada de 429.975 Kcal/h. Quema de valor medio 25 Nm³/h de biogás y aporta 9,2°C de temperatura al agua fría.

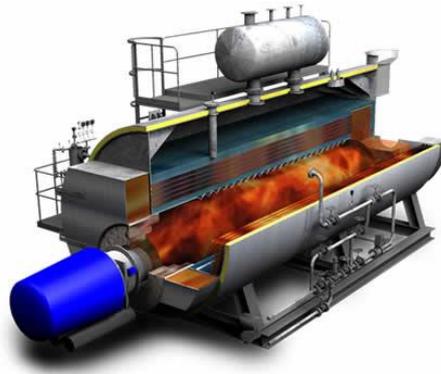


Figura 10. Caldera de agua de tipo pirotubular

4.2.2 LÍNEA DE GAS

Una vez el biogás alcanza una sobrepresión dentro del digestor anaerobio, este sale del digestor mediante la línea de gas y se dirige a la primera etapa, el pretratamiento. El objetivo de esta etapa es mantener el biogás en condiciones de presión constantes para poder tratarlo y conseguir finalmente el biometano. Los equipos que incluyen esta etapa son un gasómetro, un quemador de gases en exceso y botes de purga.

No obstante, hay que hacer un inciso para entender mejor la diferencia entre biogás y el biometano. El biogás es un conjunto de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), que tiene múltiples usos y aplicaciones vistos anteriormente. Y el biometano no es más que el biogás purificado y enriquecido. Este biometano se compone casi en su totalidad del metano que contenía el biogás, con lo que tiene unas propiedades casi idénticas al gas natural.

Para entender la vida del biogás a lo largo de todo el proceso, en la Figura 11 se puede ver un esquema de las etapas y los nombres que adquiere el biogás desde que sale del gasómetro, hasta que se convierte en biometano y CO₂ puro.

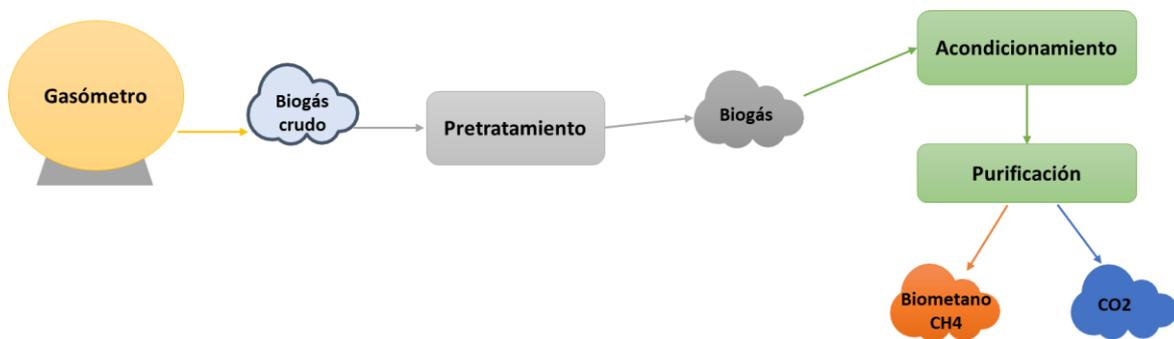


Figura 11: Ciclo de vida del biogás hasta convertirse en biometano

Los equipos involucrados en esta etapa son los siguientes:

- Gasómetro

Es un gasómetro de membrana con 17,20 m de diámetro y 13,5 m de altura, y una presión de almacenamiento de 250 mm.c.a. Tiene un volumen útil de 2000 m³. El digestor anaerobio produce aproximadamente 165,97 Nm³/h de biogás. Este es conducido hacia las siguientes etapas y puede tener una presión fluctuante. Para mantener constante la presión a lo largo de la línea está el gasómetro. A parte de almacenar, un gasómetro cumple con las funciones de equilibrar los cambios de volumen y fluctuaciones producidos por el consumo, la producción o las variaciones de la temperatura. Con esto se consigue una presión constante de 25 mbar a lo largo de la línea de gas.

- Bote de purga

Uno de los factores fundamentales en la obtención de biometano, es la deshumidificación del biogás. Este equipo ayuda a hacer un filtro inicial y a purgar algo de líquido. Hay 4 botes de purga que se sitúan después de los digestores, del gasómetro, y antes del quemador de

gases en exceso. Su principal función es purgar el vapor de agua que puede contener el biogás, pero de esta función se habla en el pretratamiento.

- Quemador de gases en exceso

La finalidad de este equipo es quemar los gases en exceso que se puedan dar en algún momento. Si un equipo falla y no se puede tratar el biogás, el quemador de gases se encargaría de quemar la producción, ya que este se seguiría produciendo en la digestión aunque haya un fallo en algún punto de la planta. Tiene una antorcha instalada y un caudal unitario adoptado de 600 Nm³/h, que es más que suficiente para cubrir los 165,97 Nm³/h de biogás que se producen.

4.2.3 PRETRATAMIENTO

A este punto de la planta, el biogás que llega se conoce como biogás crudo. Es necesario realizar una serie de operaciones en el pretratamiento para poder pasarlo a biogás y seguir mejorándolo hasta conseguir el biometano requerido.

Esta etapa tiene 3 objetivos principales: filtración de partículas y secado del biogás, es decir, eliminación de la humedad; desulfuración y la eliminación de compuestos orgánicos volátiles.

Como se ha visto en el apartado de los componentes del biogás el vapor de agua es fundamental eliminarlo, ya que este podría condensar a lo largo del proceso con los cambios de temperatura que ocurren. La presencia de líquidos en las tuberías y equipos puede ser dañino, y además el biometano no puede contener vapor de agua si se quiere inyectar a la red de gas. Para ello, se obliga a una condensación del gas.

Otro elemento importante de eliminar en este proceso es el sulfuro de hidrógeno. No solo es un gas corrosivo para los equipos y tuberías, si no que su liberación al medio ambiente también es dañina. Además, el biogás contiene compuestos orgánicos volátiles procedentes de la digestión anaerobia que deben ser eliminados.

El proceso que sigue el pretratamiento es el siguiente. Primero se sitúa un hiperfiltro para tratar de filtrar todo tipo de partícula que pueda contener el biogás crudo. Luego, este llega a la etapa de deshumidificación. Esta etapa se encarga de una primera condensación de los gases que puedan condensar. El equipo encargado de esto es un condensador de carcasa y serpentín con un enfriador.

La deshumidificación tiene las siguientes características. Puesto que el biogás condensa a una temperatura aproximada de 13°C, es necesario llevarlo a una temperatura inferior, que ronde los 5°C para asegurarse de que condense lo máximo posible. No obstante, esta temperatura no debe ser inferior a los 4°C ya que entonces corre peligro de que el líquido condensado se solidifique. Una vez el biogás es enfriado y condensado, el líquido se recoge en el condensador y se dirige a un tanque de agua bruta, mientras que el biogás sale del condensador hacia la siguiente fase a la temperatura de enfriamiento.

El siguiente paso es la eliminación de H₂S. A parte de ser un requisito para la calidad de entrada a la red de gas (debe ser <100ppm), este compuesto es corrosivo para los equipos y por lo tanto, es vital que se elimine. Además, es tóxico para el medio ambiente y la salud humana.

Hay distintas tecnologías para llevar a cabo la desulfuración del biogás. Principalmente se puede realizar mediante un sistema químico-biológico, vía química o vía biológica. La tecnología escogida para este proyecto es mediante adsorción (carbón activo), un sistema químico.

El último paso de esta etapa es la eliminación de compuestos volátiles o siloxanos. Es necesario eliminar el 100% de estos compuestos para proceder al enriquecimiento del biogás y su conversión a biometano. Se realiza, al igual que con la desulfuración, mediante adsorción (carbón activo). A continuación, se explican los equipos que habría que implementar en esta etapa y sus funciones:

- Hiperfiltro

Se coloca al principio y su función es eliminar las partículas sólidas y materiales gruesos que puedan estar presentes en el biogás al salir del gasómetro. Estas partículas pueden ser restos de la descomposición de la materia orgánica.

- Enfriador

El enfriador funciona parecido a un intercambiador de calor. Su función es enfriar el agua que posteriormente enfriará el biogás en el condensador. La temperatura del agua será próxima a los 5°C como se ha comentado en la descripción de la etapa, temperatura suficiente para hacer condensar el biogás.

- Condensador de carcasa y serpentín

Este es un tipo de condensador enfriado por agua. El sistema de funcionamiento es el siguiente: El biogás fluye por el serpentín, que son tubos concéntricos dentro de la carcasa; y por la carcasa fluye el líquido refrigerante, el agua. El biogás caliente entra a 35°C (la temperatura de digestión) y se enfría a medida que avanza hasta llegar a los 5°C. Los componentes condensables se transforman en líquido y salen por la parte inferior de la carcasa hacia un tanque de agua bruta. El biogás deshumidificado y enfriado sale del serpentín hacia el siguiente equipo.

- Soplante

El biogás que sale del condensador de carcasa y serpentín tiene una temperatura de 5°C y una presión de 25 mbar. Las siguientes etapas son filtros de carbón activo tanto para la desulfuración como para los compuestos orgánicos volátiles. En estos filtros habrá una pérdida de carga aproximadamente de -400 mbar, con lo que este soplante se encarga de aportar la presión suficiente para que al terminar el pretratamiento tenga una presión parecida a la inicial.

El soplante se coloca en la salida del condensador, que comprimirá el biogás a aproximadamente 425 mbar. Esta compresión hará que suba la temperatura del biogás. El soplante elegido es el fabricado por la empresa AERZEN, en concreto el modelo DELTA BLOWER GM 3S. En la Figura 12 se pueden ver los datos de dicho soplante, que tiene

capacidad de sobra tanto para el caudal entrante (140,97 Nm³/h), como para la presión manométrica que se necesita (425 mbar).

RESUMEN	DATOS TÉCNICOS	APLICACIONES
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	SOPLANTES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO	
CAUDAL VOLUMÉTRICO	30 a 2.700 m ³ /h	
MEDIO	GAS DE RELLENO Y BIOGÁS , NATURAL , TOWN	
TRANSPORTE	EXENTO DE ACEITE	
OPERACIÓN DE PRESIÓN	1.000 mbar DE PRESIÓN MANOMÉTRICA	

Figura 12. Datos del soplante [23]

- Filtro de Carbón Activo (Desulfuración)

Como se ha comentado en la descripción de la etapa, el método escogido en este proyecto para la desulfuración es la adsorción mediante filtro de carbón activo. Este método es muy simple y tiene una eficacia máxima e inmediata para la eliminación del H₂S, fundamental para la obtención de biometano. A medida que el biogás fluye a través del filtro, las moléculas de sulfuro de hidrógeno se adhieren a la superficie porosa del carbón activo.

Sin embargo, entre sus desventajas se encuentra que el carbón activo tiene un límite de adsorción y debe ser regenerado periódicamente; y es un sistema sensible a la humedad, con lo que el biogás que le llega debe ser seco.

- Filtro de Carbón Activo (Compuestos orgánicos volátiles)

Este es el método más común para la eliminación de los compuestos orgánicos volátiles. Funciona de igual manera que la desulfuración. El biogás pasa a través de un lecho y los compuestos se van adhiriendo al carbón activo hasta que este satura. Una vez saturados, estos deben ser sustituidos o regenerados.

Tanto para la filtración de carbón activo como de los compuestos orgánicos volátiles se ha contactado con la empresa PROVEDAL, y se ha seleccionado la unidad de filtración VALOPACK que se puede ver en la Figura 13.



Figura 13. Unidad de filtración VALOPACK

Una vez el biogás sale del último filtro de carbón activo, su presión ronda la inicial (25 mbar) y su temperatura será algo parecido a la de ambiente. Además, el caudal de biogás que llega hasta este punto permanece constante, sin pérdidas apreciables, $140,97 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

4.2.4 ACONDICIONAMIENTO

El gas que llega a este punto ya no es biogás crudo, si no biogás como se puede ver en la Figura 11, y debe ser acondicionado y purificado para llegar a ser biometano. Esta etapa se encarga principalmente de comprimir y secar el biogás procedente del pretratamiento y prepararlo para la siguiente etapa, la purificación.

El primer equipo involucrado en esta etapa es un compresor. Esto se debe a que la presión de funcionamiento de las membranas de la siguiente etapa funcionan con una presión de 12 bares, muy superior a la que tiene el biogás en ese punto. Por ello este compresor se encarga de comprimir el biogás a esa presión.

Luego, el biogás volverá a circular por un condensador de carcasa y serpentín para volver a ser condensado. Este condensador funciona igual que el del pretratamiento y bajará la temperatura del biogás a los 5°C .

En esta etapa hay unos cambios de temperatura significantes. El gas después de ser comprimido tendrá una temperatura muy alta, mientras que, a la salida del condensador, tendrá una temperatura muy baja. Para regular esta temperatura, se conduce el biogás saliente del compresor a un intercambiador situado a la salida del condensador. Con esto, se consigue reducir la temperatura de entrada al condensador y aumentar la temperatura de salida del mismo. Esto se puede ver en el PFD. Los equipos involucrados son los siguientes:

- Compresor

El biogás que llega a este punto tiene una presión muy inferior a la de funcionamiento de las membranas, con lo que el compresor comprimirá el biogás hasta los 12 bares. El efecto de esta compresión implica una subida significativa de la temperatura del biogás.

El compresor escogido es el compresor para biogás – Serie VMX, fabricado por AERZEN. Las principales características de este compresor se pueden ver en la Figura 14, donde la presión manométrica es de 15.000 mbar, capacidad suficiente para los 12.000 mbar a los que se quiere comprimir el biogás.

RESUMEN	DATOS TÉCNICOS	APLICACIONES
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	COMPRESORES DE TORNILLO	
CAUDAL VOLUMÉTRICO	100 a 2.500 m ³ /h	
MEDIO	MIXED , GASES DE PROCESO , BIOGAS , BIOMETHANE	
COMPRESIÓN	CON INYECCIÓN DE ACEITE	
OPERACIÓN DE PRESIÓN	15.000 mbar DE PRESIÓN MANOMÉTRICA	

Figura 14. Datos del compresor [3]

- Condensador

Se usa para eliminar posibles restos de humedad, tanto de compuestos volátiles como de vapor de agua. El biogás caliente entra al equipo donde se enfría, se condensan los residuos que no se hayan eliminado y se transforman en líquido. Este líquido se elimina. Es un condensador de carcasa y serpentín con el mismo funcionamiento que el del pretratamiento.

- Hiperfiltro

Este filtro se utiliza para eliminar todo tipo de partícula residual que pueda llegar de etapas anteriores y que se pueden haber formado en la última condensación.

- Intercambiador de calor

Como se ha explicado en la descripción de la etapa, el intercambiador funciona con el mismo fluido, el biogás. Como refrigerante se utiliza el biogás procedente del condensador, mientras que el fluido que cede calor es el biogás saliente del compresor. Para mayor aclaración ver el diagrama de flujos del proceso.

Llegado a este punto el biogás debe tener una presión de 12 bares para entrar a la siguiente etapa, y una temperatura medianamente elevada.

4.2.5 PURIFICACIÓN

En esta etapa se produce la conversión del biogás en biometano. Esta conversión no es más que la separación entre el metano y el dióxido de carbono del biogás, que son los 2 subproductos mayoritarios. Para llevar a cabo este proceso, se realiza una triple etapa de separación de membranas. De estas membranas sale una corriente de CO₂ puro, y otra de biometano. Este proceso tiene sus ventajas frente a otros, ya que no supone un alto consumo energético, es fácil de operar y no requiere aditivos químicos.

Los requisitos del biogás para esta etapa es que llegue acondicionado con una presión de 12 bares, deshumidificado y con las cantidades mínimas exigidas de los demás compuestos.

Los equipos involucrados en esta etapa son:

- Membranas

Las membranas se utilizan para separar las componentes de una mezcla de gases, en este caso entre el metano y el dióxido de carbono. Para realizar la separación de forma efectiva, se utilizan 3 etapas de membranas. En la Figura 15 se puede ver las entradas y salidas de las corrientes de las membranas que se va a explicar a continuación.

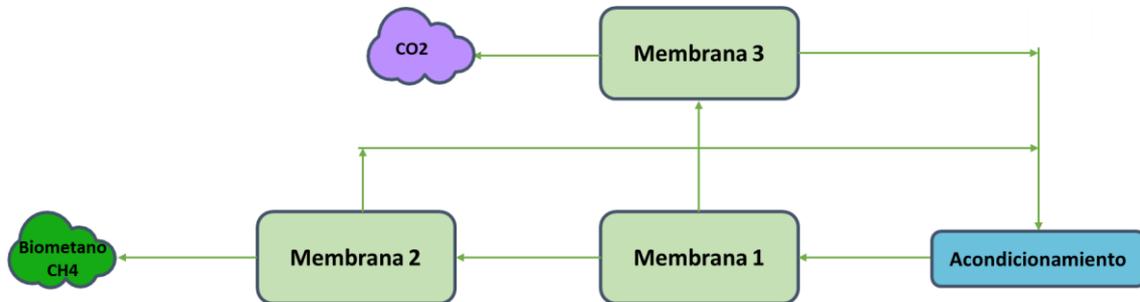


Figura 15: Etapas de membranas en la purificación del biogás

El biogás entra a la primera membrana después del adecuado pretratamiento y acondicionamiento. Aquí se produce la primera separación significativa de CO_2 , el cual será reconducido directamente a la tercera membrana para mayor efectividad y una segunda pasada, mientras que el metano obtenido va a la segunda etapa. Ambas separaciones todavía pueden tener una mínima traza de mezcla, por lo que se mandan a una segunda separación.

El biogás ya enriquecido pasa a la segunda membrana para una separación más fina. De aquí salen 2 corrientes, una con el biogás enriquecido, conocido como biometano, que pasa a la etapa de odorización y control de calidad. Y la otra corriente que contiene todavía algo de mezcla de metano y CO_2 , se une a la saliente de la tercera membrana y se conduce al compresor, al principio del acondicionamiento. Esto ocurre para que vuelva a adecuarse la presión y acondicionar el biogás para volver a filtrar y seguir obteniendo los restos de metano que pueda haber.

De la tercera membrana salen 2 corrientes. Una que es prácticamente CO_2 puro, el cual puede ser emitido a la atmósfera o ser aprovechado para distintos usos; y la otra se une a la saliente de la membrana 2 para volver a empezar el proceso y así seguir obteniendo el biometano restante.

El proceso de separación de las membranas ocurre por el fenómeno de la difusividad. Cada membrana está compuesta por cientos de filamentos huecos no porosos, hechos de polímeros. La molécula del dióxido de carbono tiene mayor difusividad que la del metano,

por lo que pasa antes a través del material polimérico. Como consecuencia, la separación da lugar a una corriente rica en CH₄ como producto retenido en la membrana y otra corriente rica en CO₂ del lado del permeado de la membrana.

Las membranas escogidas para esta etapa son las PRISM® PB6050, fabricadas por Air Products. El rendimiento y la configuración de las membranas se puede ver en la Figura 16, y su diseño en la Figura 17.

Performance Specifications*

High Methane Recovery Configuration

		Raw biogas	Biomethane	Vent
Composition				
Methane	mol%	55.0	98.0	0.3
Carbon Dioxide	mol%	45.0	2.0	99.7
Flow PB6050-P3	nm ³ /hr	60.0	33.6	26.4
Pressure	barg	12.0	11.8	0.0

Power = 0.22 kW/nm³/hr raw biogas
Methane recovery = 99.8%

Low Power Configuration

		Raw biogas	Biomethane	Vent
Composition				
Methane	mol%	55.0	98.0	0.3
Carbon Dioxide	mol%	45.0	2.0	93.0
Flow PB6050-P3	nm ³ /hr	120.0	63.3	56.7
Pressure	barg	12.0	11.8	0.0

Power = 0.15 kW/nm³/hr raw biogas
Methane recovery = 94%

Figura 16. Rendimientos y configuración de las membranas [22]

Mechanical Design Limits

Design pressure (cap)	18.0 BARG
Design temperature	82.2°C
MDMT	-15°C

Operating Limits

Temperature (feed gas)	82.2°C
Pressure	18.0 BARG

Materials

Shell tube	6061-T6 Aluminum
Shell ends	6061-T6 Aluminum
End caps	6061-T6 Aluminum

Weight | Dimensions

Length	1629.9 mm
Width	170.7 mm
Height	214.1 mm
Weight	27.4 kg

Figura 17. Diseño, material y dimensiones de las membranas [22]

Como se puede ver en la Figura 16, la presión de funcionamiento de las membranas es de 12 bares, con lo que el compresor de la etapa de acondicionamiento debe comprimir el biogás a esta etapa antes de empezar la etapa de purificación.

Por otro lado, si se observa la capacidad de una etapa de membranas es de 60,00 Nm³/h, mientras que el caudal de biogás a purificar es cerca de los 200 Nm³/h, con lo que cada etapa de membranas se construirá como un rack de membranas, el mínimo necesario son 4 membranas por etapa.

- Filtro microbiológico

Debido a que el biometano procede de la digestión anaerobia, este puede contener trazas de microorganismos que pueden dañar la red de gas. Este filtro microbiológico se utiliza como precaución para terminar de eliminar posibles trazas que puedan quedar y también para cumplir los estándares de calidad que debe cumplir el biometano para su inyección a la red de gas.

De esta etapa se producen 3 corrientes distintas. La primera sale del rack de la etapa de membranas 2, que contiene el biometano y se dirige a la siguiente etapa con una presión de 12 bares.

La segunda corriente sale del rack de la etapa de membranas 3 y contiene el dióxido de carbono. Por último, la tercera corriente sale tanto de la etapa 2 como la 3. Ambas se juntan y se dirigen al inicio del acondicionamiento, ya que es una porción del biogás que no ha podido separarse del todo.

4.2.6 INYECCIÓN Y CALIDAD

Esta etapa tiene 2 objetivos: la regulación y medida de calidad del biometano; y odorizar el gas.

La primera sirve para que el biometano cumpla los estándares de calidad que se requieren para poder ser inyectado a la red de gas. Entre ellos destaca medir el índice de Wobbe; la presión; la densidad de energía y el poder calorífico. Así como la cantidad de sus componentes.

En la Tabla 6 se pueden ver los requisitos que debe cumplir el biometano para poder ser inyectado a la red de gas:

Parámetro	Unidades	Cantidad
Metano (CH ₄)	% mol	>90
O ₂	% mol	<0,3
CO ₂	% mol	<2
Índice de Wobbe	kWh/m ³	13,403-16,058
PCS	kWh/m ³	10,26-13,26

Densidad relativa		0,55-0,7
Punto de rocío	°C	<-8
S total	mg/m ³	0-50
H ₂ S + COS	mg/m ³	0-15
H ₂	% mol	0-5
NH ₃	mg/m ³	0-3
Siloxanos	mg/m ³	0-10
Microorganismos		Técnicamente puro

PCS: Poder Calorífico Superior; COS: Sulfuro de Carbonilo

Tabla 6. Requisitos del biometano para su inyección a la red de gas

La unidad de odorización es el último paso para poder inyectar el biometano a la red de gas natural. Su principal objetivo es mezclar el biometano inodoro con tetrahidrotiofeno (THT), para asegurarse de que tenga un olor característico y constante. Los equipos involucrados en esta etapa son los siguientes.

- Filtro de medida y regulación

La E.R.M o estación de medida y regulación es la que se encarga de controlar la calidad y los componentes del biometano. Se coloca al principio de la etapa. La E.R.M. se encarga principalmente de la regulación de la presión, la seguridad y el cumplimiento de la normativa, la medición del flujo, ...

Gracias a esta estación el biometano se inyecta de manera segura, controlada y cumpliendo con los requisitos y la normativa. El caudal que llega a este punto es aproximadamente 61,83 Nm³/h a una presión de 12 bares. Una vez medida y comprobada la calidad del gas, este debe

ser comprimido a los 3 bares para poder ser inyectado a la red de gas. Esta presión es la perteneciente a la red de distribución de la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda.

- Tanque de recarga de odorización

La función de este equipo es almacenar de forma concentrada el olorizante líquido que se vaya a inyectar. Permite almacenar una cantidad suficiente que se irá inyectando al biometano para que adquiera su olor característico. Este tanque debe recargarse periódicamente.

- Tanque de odorización

En este tanque es donde ocurre la odorización del biometano. El olorizante se mezcla con el biometano de forma controlada para crear una mezcla homogénea y poder ser inyectado a la red de gas.

- Panel de inyección de odorización

El panel de inyección es el conjunto de sistemas y controles que se aseguran de que la odorización del biometano sea correcta. Está compuesto por un sistema de medición y control que permite ajustar la cantidad de olorizante necesaria para la cantidad de biometano presente.

4.3 CÁLCULOS

4.3.1 CAUDALES

Los caudales iniciales vienen dados en las bases de partida de la E.D.A.R. del Plantío. La producción de biogás es de $3.984,24 \text{ Nm}^3/\text{d}$, el cual son $165,97 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Este caudal proviene de la digestión de ambos digestores, con lo que las corrientes que salen de cada uno tienen un caudal de $82,98 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Estos 2 caudales se juntan y son regularizados por el gasómetro. Por la corriente número 6 circula un caudal de $25 \text{ Nm}^3/\text{h}$ para la caldera de agua caliente, con lo que al pretratamiento llega un caudal de biogás de $140,97 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Este caudal atraviesa la etapa de pretratamiento y llega constante al acondicionamiento, donde varía. Para entender esta etapa, la Figura 18 representa la etapa de membranas de forma simplificada del diagrama de flujos de proceso.

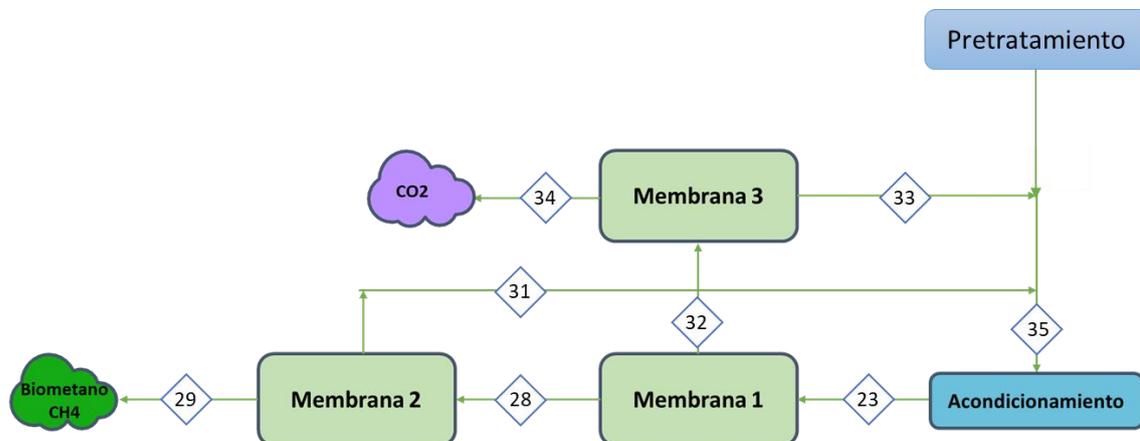


Figura 18. Esquema de las corrientes en la etapa de purificación

Para el caudal en la corriente 23 se ha estimado según el fabricante un aumento de caudal del 45% como valor medio, que viene de caudal residual de una anterior separación. Con lo que en la corriente 23 hay un caudal inicial de $204,40 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Este caudal se dirige al rack de la primera etapa de membranas, donde filtra un 55% de biogás a la corriente 28, lo que es un caudal de $112,42 \text{ Nm}^3/\text{h}$. De la corriente 23 a la corriente 32 pasa el resto del caudal, $91,98 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de biogás, que circula directamente a la etapa de membranas 3, de donde se obtendrá el CO₂.

Al segundo rack de etapa de membranas llega un caudal de 112,42 Nm³/h, del cual un 55% es filtrado como biometano y el resto se devuelve al inicio del acondicionamiento por tener trazas de dióxido de carbono. Con lo cual, la corriente de biometano producida es de 61,83 Nm³/h, y por la corriente 31 circula un caudal de 50,59 Nm³/h.

A la tercera etapa llega un caudal de 91,98 Nm³/h, del cual se extrae un 86% de dióxido de carbono, lo que supone un caudal de 79,10 Nm³/h por la corriente 34. El resto del biogás vuelve al acondicionamiento por tener todavía mezcla de gases, por la corriente 33 circula un caudal de 12,88 Nm³/h. Finalmente, por la corriente 35 circula la combinación de la 33 y la 31, lo que hace un caudal de 63,47 Nm³/h. Este caudal, si se suma al procedente del pretratamiento (140,97 Nm³/h), produce un caudal de 204,40 Nm³/h en la corriente 23.

En la Tabla 7 se puede ver un resumen de los caudales en la etapa de purificación.

Número de corriente	Caudal (Nm ³ /h)
23	204,40
28	112,42
29 (Biometano)	61,83
31	50,59
32	91,98
33	12,88
34 (CO ₂)	79,10
35	63,47

Tabla 7. Caudales en la etapa de purificación

Observando el PFD, las corrientes 23-27 tienen un caudal constante.

Los datos de los porcentajes de las membranas son aportados por el fabricante de estas y son valores aproximados, ya que el biogás no siempre tiene la misma composición y los resultados pueden variar.

4.3.2 DIÁMETROS DE TUBERÍAS

Los diámetros de las tuberías se han calculado mediante la ecuación E1, que representa la relación entre el caudal, la velocidad del fluido y la sección de la tubería.

$$E1 \quad Q = v * A$$

Los caudales son datos conocidos, con lo que las incógnitas son la velocidad y la sección de la tubería. Sin embargo, la velocidad de un fluido en estado líquido en una tubería no debe sobrepasar los 3 m/s, mientras que un fluido en estado gaseoso debe circular entre 15 y 20 m/s. Con lo cual, por precaución para realizar estos cálculos se han adoptado las velocidades de 1,5 m/s para los líquidos, y de 15 m/s para el gas.

Las unidades de medida del caudal son Nm³/s para el gas y m³/s para el líquido. La unidad de medida de la sección de la tubería es metro cuadrado. Puesto que los datos de los caudales son en horas, hay que dividir cada uno entre 3600 para pasarlo a segundos.

No obstante, el diámetro de una tubería corresponde con la ecuación E2, donde D es el diámetro y A la sección.

$$E2 \quad A = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

Con lo cual, combinando ambas ecuaciones se encuentra el diámetro de una tubería, como se puede ver en la ecuación E3.

$$E3 \quad D = \sqrt{\frac{Q*4}{v*\pi}}$$

Aplicando esta fórmula a cada corriente, se obtienen los diámetros de las tuberías en metros, hay que dividirlos entre 1000 para pasarlos a milímetros. Una vez obtenidos, se han escogido los diámetros inmediatamente superiores según los diámetros normalizados.

No obstante, las corrientes que involucran la línea de fangos y la línea de gas ya tienen sus diámetros impuestos en la E.D.A.R. del Plantío, los cuales se puede observar que son notablemente mayores, ya que están diseñados para un supuesto flujo de corriente mayor. Estos diámetros se han dejado con los datos reales.

A continuación, se realiza un ejemplo con la corriente número 7. Puesto que es estado gaseoso, la velocidad es de 15 m/s. El caudal es de 140,97 m³/h, que son 0,0391 m³/s.

$$D = \sqrt{\frac{0,0391 * 4}{15 * \pi}} = 0,058 \text{ m}$$

Multiplicando por 1000, se obtiene un diámetro de 58 mm. El diámetro nominal inmediatamente superior es DN65, que es el que se elige.

En la Tabla 8 se ven los diámetros nominales de las tuberías escogidos. Las corrientes 1-14 incluidas tienen los diámetros reales de las tuberías de la instalación, a excepción de la 7, que es calculada. Los diámetros de las corrientes 15-35 son calculados.

Número de corriente	Diámetro nominal	Número de corriente	Diámetro nominal
1	150	19	65
2	150	20	50
3	250	21	50
4	250	22	65
5	150	23	80

6	32	24	80
7	65	25	80
8	150	26	80
9	100	27	80
10	100	28	65
11	250	29	40
12	150	30	40
13	150	31	40
14	150	32	50
15	65	33	20
16	65	34	50
17	50	35	40
18	50		

Tabla 8. Diámetros nominales de las tuberías

4.3.3 PRESIÓN Y TEMPERATURA

Las presiones y las temperaturas obtenidas en el proceso han sido realizadas en una simulación ajena a este proyecto. No obstante, las presiones se conocen y están impuestas para el correcto funcionamiento de la planta, así como algunas de las temperaturas. La presión y temperaturas previas al pretratamiento vienen dadas por los datos del Canal de Isabel II de la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda. Estas son 35°C y 25 mbar en la línea de gas.

Para la etapa de pretratamiento, hay que imponer una temperatura en el enfriador de 5°C aproximadamente. Como ya se ha explicado anteriormente esta temperatura se impone para condensar el biogás, que condensa a los 13°C. Posteriormente se pone un soplante que debe aportar una presión 0,4 bares veces mayor a la inicial. Esto supone elevar la presión a 425 mbar. La razón de esto es para compensar la pérdida de carga que supone el pasar por los filtros de carbono activo (se ha estimado una pérdida de carga de -0,2 bar por filtración, datos del fabricante). Además, la temperatura tras el soplante deberá aumentar, pues se está comprimiendo el gas.

Llegando a la corriente 22 el biogás debería de tener una presión parecida a la inicial y una temperatura que ronde la ambiental. A continuación, el biogás debe comprimirse para adaptarse a las características de funcionamiento de las membranas. La presión de funcionamiento es de 12 bares, con lo que, al comprimir, la temperatura se elevará notablemente. Este aumento de temperatura servirá para proporcionar calor a la corriente de biogás que sale del siguiente punto, el condensador. Nuevamente, el condensador debe imponer una temperatura de 5°C para su correcta condensación. Las presiones de funcionamiento de las membranas las da el fabricante.

Por último, la presión de inyección a la red de gas debe ser de 3 bares.

Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como resultados del proyecto, se ha diseñado el plano adjunto en el Anexo 1. Dicho plano contiene la ingeniería básica y conceptual de los equipos requeridos en el tratamiento del biogás. Además, se ha optimizado el diseño del plano de forma que el aprovechamiento de la planta sea el máximo, para una mayor rentabilidad de la misma.

El diseño del plano y la búsqueda de los equipos se ha realizado tras hacer unos cálculos aproximados del proceso que ocurre en la planta diseñada. Dichos cálculos se han llevado a cabo con las bases de partida de la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda, con lo que se puede aproximar a una simulación real.

Tras obtener las condiciones de temperatura, presión y caudal de los distintos puntos del proceso, se han contactado con suministradores y seleccionado los principales equipos con sus respectivas fuentes, que se encargarían de llevar a cabo el proceso. Dichos equipos cuentan con las características requeridas y adaptadas a las condiciones de la planta.

En cuanto a la producción de biometano, como se puede ver en la Tabla 9, con un caudal inicial de 165,97 Nm³/h de biogás, se obtiene un caudal de 61,83Nm³/h de biometano. Además, en otra rama y que daría pie a futuros trabajos se obtiene 79,10 Nm³/h de dióxido de carbono.

Gas	Caudal (Nm ³ /h)
Biogás	165,97
Biometano	61,83
Dióxido de carbono	79,10

Tabla 9. Resultados del proceso

La finalidad del biometano obtenido tiene como función inyectarse a la red de distribución de la zona, y debe hacerse a 3 bares. Además, el dióxido de carbono tiene múltiples

aplicaciones como se ha comentado en el trabajo, con lo que su tratamiento y distribución aumentaría la rentabilidad del proyecto.

Los resultados obtenidos parecen coherentes, con lo que se puede decir que se ha realizado con éxito el presente proyecto, el diseño de una planta de biometano acoplada a la E.D.A.R. del Plantío de Majadahonda.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El principal objetivo de este proyecto es el diseño de una planta de biometano para su inyección a la red de gas. Este objetivo se ha cumplido utilizando la herramienta AutoCAD. Además, se han realizado los cálculos pertinentes para tener una aproximación a lo que ocurriría en la planta y también se han seleccionado los equipos necesarios para llevar a cabo la conversión del biogás en biometano.

Las ventajas de este tipo de plantas son numerosas: potencia la economía circular, es una energía renovable que se aprovecha de residuos, disminuye la emisión de gases tanto de efecto invernadero como tóxicos para la salud humana, es un gran paso hacia la descarbonización, ... Sin embargo, hasta ahora esta tecnología no ha tenido un importante desarrollo.

Económicamente el coste de los equipos e instalaciones necesarias para esta planta son costosos. Y no solo es costosa la adquisición, si no que tanto los filtros de carbón activo como las membranas en la etapa de purificación tienen que ser cambiados o regenerados periódicamente, aumentando el coste de mantenimiento.

Además, el precio del gas está en continua fluctuación. En concreto, en la tarifa que se ha regulado el 1 de julio del 2023, el precio es de 0,04305 €/kWh, un 3,73% menos que la última tarifa en abril de 2023. Y también, hoy en día el biometano cuesta alrededor de un 30% menos que el gas natural.

Las principales razones para construir estas plantas hoy en día son, o por la reducción obligatoria de emisiones, o porque el precio del gas aumente notablemente, como se ha visto consecuencia de la guerra de Ucrania. De hecho, esta guerra ha aumentado la necesidad de buscar otras fuentes de gas, ya que Rusia es el mayor proveedor de gas natural de Europa. La producción de biometano es una excelente salida a este problema. Sin embargo, esta

fluctuación es constante y no suele mantenerse a un precio muy alto, con lo que es necesario un fuerte apoyo político para dar confianza a los inversores.

Esta tecnología es una excelente salida para afrontar los principales desafíos del siglo XXI, con lo que en España es necesario potenciarla con más investigación o inversiones, ya que tenemos mayor facilidad gracias a la buena red de distribución de gas y las ventajas que aporta a la sociedad son significantes.

Como trabajos futuros, se puede hacer un diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID); realizar una simulación real con las dimensiones y datos de la planta; y también se puede hacer un análisis de la rentabilidad del proyecto. Además, se puede añadir la rentabilidad y usos del dióxido de carbono, así como una comparativa de todas las aplicaciones posibles que tiene este proyecto.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bomboí, A. “Pretratamiento del biogás procedente de la digestión anaerobia y/o vertederos de RSU para su posterior valorización energética”. Ategrus. Mayo 2014. STA-Biogas-RSU-AB (ategrus.org)

- [2] “Biogás”. Idae. Biogás | Idae

- [3] “Compresor para biogás – Serie VMX”. AERZEN. Compresor de tornillo para biogás - Serie VMX - AE (aerzen.com)

- [4] “Descubre el Upgrading. El paso entre del biogás y el biometano”. Genia Bioenergy. Descubre el Upgrading. El paso entre el biogás y el biometano | Genia Bioenergy

- [5] “Eliminación de gases COV con carbón activado”. ChiemiVall. Diciembre 2022. Eliminación de gases COV con carbón activado • Chiemivall (carbonactivo.com)

- [6] “Evaporadores”. Scalofrios. Apuntes de Maquinas (Evaporadores y Condensadores).pdf (scalofrios.es)

- [7] “Gasómetro para biogás de doble membrana”.Environment systems & Projects. MSP, Gasómetro para biogás de doble membrana (mspesp.com)

- [8] Hachec, R. “Digestión aerobia de lodos activados de desecho”. Escuela superior de ingeniería química e industrias. Noviembre 1983. 25-1-9427.pdf (ipn.mx)

- [9] “Instalación de upgrading de biogás e inyección de biometano a red de gas”. Retema. Enero 2023. Instalación de upgrading de biogás e inyección de biometano a red de gas (retema.es)

- [10] “Intercambiadores de calor SPIRAL”. Aic. 2019. Spiral Heat Exchangers - AIC (aicheatexchangers.com)
- [11] “Marco normativo del biometano”. 2020. Fundación Naturgy. B4-marco-normativo.pdf (naturgy.com)
- [12] Nuevo, D. “La deshidratación de fangos: el último proceso en una EDAR”. TECPA. Febrero 2020. [La deshidratación de fangos | Formación de ingenieros \(tecpa.es\)](#)
- [13] Ortega, L. “Purificación de biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural cubana”. Universidad Internacional de Andalucía. Abril 2018. 978-84-7993-339-5_pdf_web.pdf (unia.es)
- [14] Palau, C. “Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás”. Universidad Politécnica de Valencia. Microsoft Word - Codigestión anaerobia _v2 (upv.es)
- [15] “Procesos y tecnologías para el tratamiento de lodos”. Condorchem envitech. Procesos y tecnologías para el tratamiento de lodos (condorchem.com)
- [16] Saorín, J. “Línea de fangos de una EDAR”. Universidad Católica de Murcia. TRATAMIENTOS DE FANGOS_UCAM_2014_rev1 [Modo de compatibilidad] (intecsa-inarsa.com)
- [17] Secretaría de Estado de Energía. “Hoja de ruta del biogás”. Marzo 2022. Hoja de Ruta del Biogás V6 (energia.gob.es)
- [18] “Sistemas de inyección de biogás en la red”. Genia Bioenergy. Sistemas de inyección de biogás en la red | Genia Bioenergy

- [19] “Sistemas de saneamiento y depuración”. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Línea de fangos (miteco.gob.es)
- [20] Teruel, F. “Tratamiento conjunto de las aguas residuales urbanas y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos: Optimización por simulación de la tecnología de membranas anaerobias”. Universitat Politecnica de Valencia. Junio 2015. [Microsoft Word - TFM Fran Teruel Borrador2.docx \(upv.es\)](#)
- [21] “Tratamiento del biogás en EDAR”. BGasTech. Marzo 2022. [TRATAMIENTO DEL BIOGÁS EN EDAR - BGasTech Biogás & Gases Technologies](#)
- [22] “Tratamiento del biogás, uso de separadores de membrana PRISM®”. Carbueros metálicos. Tratamiento del biogás (carbueros.com)
- [23] “Unidad compacta para biogás - DELTA BLOWER GM 3S... 50 L”. AERZEN. Equipo para biogás Delta Blower GM 3S ... 50 L - AER (aerzen.com)
- [24] Varnero, M. “Manual de biogás”. Ministerio de Energía de Chile. 2011. Manual de biogás (fao.org)
- [25] “Ventajas del biogás frente a otras energías renovables”. Genia Bioenergy. Ventajas del biogás frente otras energías renovables | Genia Bioenergy

ANEXO I: DIAGRAMA DE FLUJOS DE PROCESO

(PFD)

