



universidad
de león



PRODUCCIÓN DE BIOMETANO

BIOMETHANE PRODUCTION

Ixabel Begiristain Igoa

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Julio, 2021

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO.....	7
3. METODOLOGÍA	8
4. PROCESO DE OBTENCION DEL BIOGÁS	9
4.1 La importancia de los parámetros en las características del biogás.....	11
5. TRATAMIENTOS DE LIMPIEZA Y PURIFICACIÓN DEL BIOGAS (UPGRADING).....	13
5.1. Eliminación del vapor de agua.....	14
5.2 Eliminación de sulfuros de hidrogeno	15
5.2.1 <i>Eliminación de H₂S durante la digestión anaerobia:</i>	15
5.2.2 <i>Eliminación de H₂S tras la digestión anaerobia</i>	15
5.3 Eliminación de los siloxanos	16
5.4 Eliminación del dióxido de carbono	16
5.4.1 <i>Absorción de CO₂ con agua</i>	17
5.4.2 <i>Absorción de CO₂ con polietilenglicol</i>	18
5.4.3 <i>Absorción de CO₂ con aminoalcoholes</i>	18
5.4.4 <i>Adsorción de CO₂ con sistemas PSA (Pressure Swing Adsorption)</i>	19
6. BIORREFINERIAS	20
7. APLICACIONES TÍPICAS DEL BIOMETANO, SITUACION ACTUAL Y EJEMPLOS DE PROYECTOS.....	22
7.1 Evolución del biometano y situación actual	22
7.2 Potencial de España para la producción de biometano.....	26
7.3 Proyectos y perspectivas futuras	26
8. CONCLUSIONES	27
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	29

Resumen

El biometano, es un combustible de origen renovable, que proporciona grandes beneficios medioambientales y socioeconómicos reduciendo al mismo tiempo las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, en la generación de dicho combustible se utilizan diversos desechos orgánicos como materia prima (residuos de agricultura, ganadería, EDAR etc.), mejorando la gestión y el aprovechamiento de algunos residuos. Dicho proceso está basado principalmente en la digestión anaerobia y una posterior purificación del gas, consiguiendo cualidades similares a las del gas natural.

En los últimos años, la construcción de plantas de generación de biometano ha aumentado de manera significativa en Europa, sin embargo, España es uno de los países con menor producción y consumo de Europa a pesar ser uno de los países con mayor potencial.

Abstract

Biomethane is a fuel of renewable origin that provides great environmental and socio-economic benefits while reducing greenhouse gas emissions. Furthermore, in the generation of this fuel, different types of organic wastes (waste from agriculture, livestock, WWTP, etc.) are used as raw material, improving the management and use of some wastes. This process is mainly based on anaerobic digestion and subsequent purification of the gas, achieving similar qualities to those of natural gas.

In the last few years, the construction of biomethane generation plants has increased considerably in Europe, however, Spain is one of the countries with the lowest production and consumption in Europe despite being one of the countries with the greatest potential.

Palabras clave: Biometano, biogas, digestión anaerobia, energía renovable, gases de efecto invernadero (GEI), upgrading

Keywords: Biomethane, biogas, anaerobic digestion, renewable energy, greenhouse gases (GG), upgrading

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático supone el principal problema ambiental al que se enfrenta el planeta tierra en el siglo XXI y la influencia de los seres humanos es cada vez mayor. Este aumento, está relacionado principalmente con la emisión de gases que se producen mediante procesos como la quema de combustibles fósiles, la deforestación o tala de las selvas tropicales, las explotaciones ganaderas, los fertilizantes con nitrógenos etc. (Unión Europea, 2019)

Las principales emisiones de gases que se generan como consecuencia de la actividad humana son principalmente; Dióxido de carbono (responsable del 63% del calentamiento global), Metano (responsable del 19%), Óxido nitroso (responsable del 6%) y otros gases. Dichos gases generados de manera antrópica, junto con los que se liberan de forma natural a la atmosfera, agravan el efecto invernadero y el calentamiento global.

Desde finales del siglo XIX hasta la actualidad, la temperatura mundial es 0,85°C superior (La Unión Europea, 2016), esto se debe principalmente a la continua emisión de algunos de los antes mencionados gases de efecto invernadero, que disponen de la capacidad de retener el calor del sol dentro de la atmosfera, aumentando así la temperatura del planeta. Como consecuencia del aumento de la temperatura, se han multiplicado los fenómenos climáticos extremos (inundaciones y sequias, olas de calor y frio) y se han agravado los procesos de desertificación y erosión.

España representa uno de los países europeos más vulnerables y castigado por el cambio climático, donde las sequias cada vez son más extremas, donde los recursos hídricos se reducen, la cantidad de incendios anuales aumenta etc. Todos estos fenómenos climáticos extremos afectan directamente a la agricultura, a la salud, a la economía y a los sectores productivos en general. (ISTAS, sin fecha)

Hasta ahora, han sido visibles algunas de las consecuencias del aumento de la temperatura que ha sufrido el planeta (0,85°C), pero los científicos consideran que un aumento mayor de 2°C respecto a la temperatura de la era preindustrial sería crítico. Si se llegara a superar el límite de 2°C que establecen los científicos, se temen cambios peligrosos y catastróficos para el medio ambiente. (La Unión Europea, 2016)

Con relación al peligro que suponen dichas emisiones de gases de efecto invernadero, España ha adquirido el compromiso de reducir y/o limitar sus emisiones mediante varios acuerdos europeos e internacionales.

Así pues, como consecuencia del riesgo que supone el aumento de la temperatura del planeta desde la era preindustrial, comenzaron las negociaciones internacionales sobre el cambio climático. Por consiguiente, comenzaron a realizar cumbres y conferencias con el objetivo de adoptar diferentes acuerdos para enfrentarse al cambio climático. Han sido varias las cumbres que se han realizado hasta el día de hoy. (European Commission, 2015)

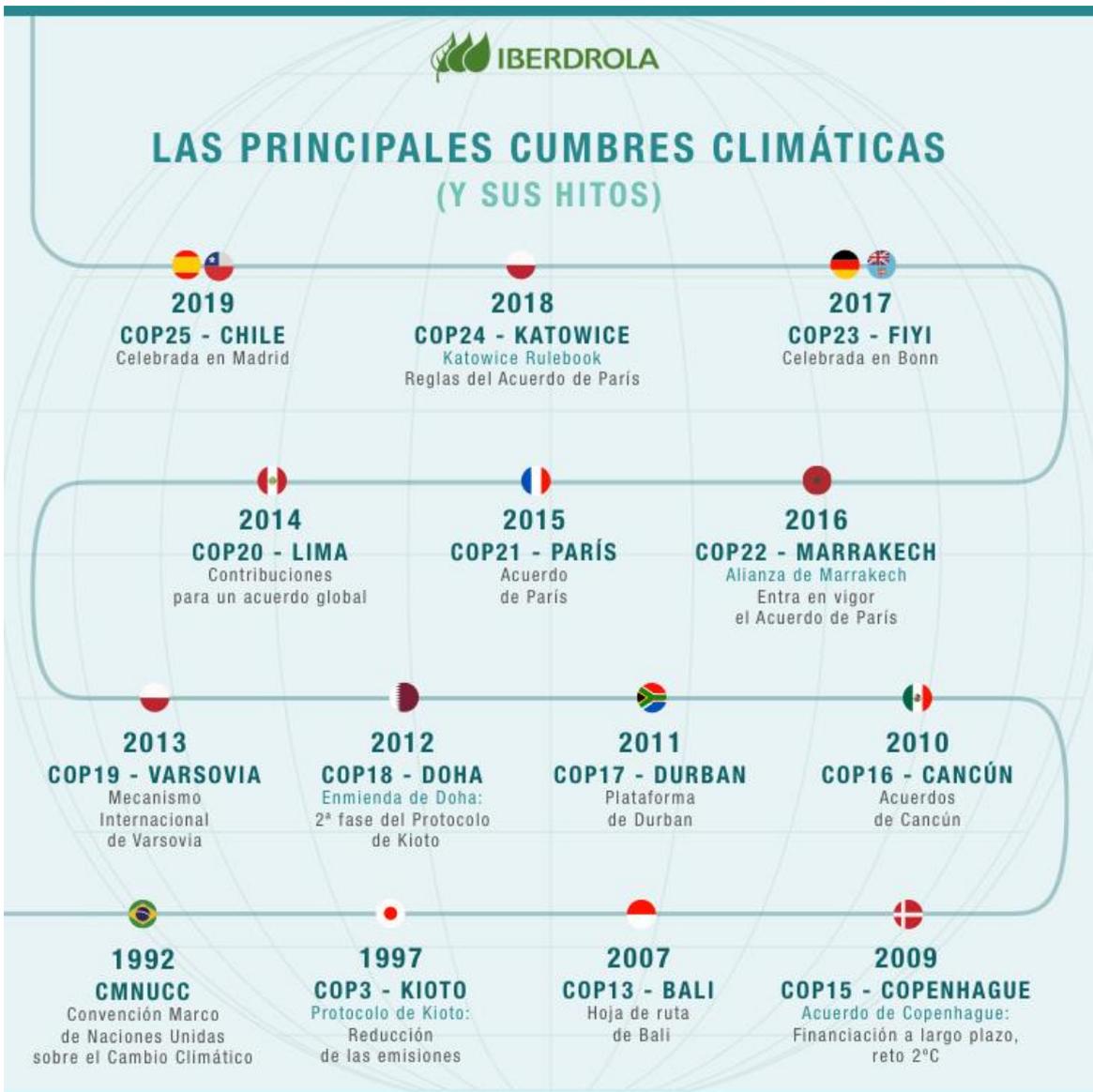


Figura 1: Principales cumbres climáticas (Fuente: Iberdrola, 2020)

Entre las principales cumbres que se muestran en la Figura 1, destaca la cumbre que se celebró el 12 de diciembre de 2015, en el que se aprobó el texto del acuerdo de París, un acuerdo donde se establecieron los elementos necesarios para construir una estrategia mundial de lucha contra el cambio climático para el periodo post 2020. (Iberdrola, 2020). Dicho acuerdo supuso el primer acuerdo universal vinculado al cambio climático, donde se establece un marco global, cuyo objetivo principal fue evitar el incremento de la temperatura media global del planeta a los 2°C y promover esfuerzos adicionales que posibiliten limitar el aumento a 1,5°C. Además del objetivo, el acuerdo de París incluye los elementos necesarios para poder cumplir con el objetivo establecido. (Gobierno de España, 2015)

La Comisión Europea realizó una propuesta en materia de clima y energía, que serviría para dar continuidad y establecer nuevos objetivos de reducción de emisiones y de energías renovables. Dicho paquete europeo, se denominó Marco sobre el clima y energía 2030. Así pues, se establecieron una serie de metas y objetivos políticos para toda la Unión Europea que entrarían en juego en el año 2021 hasta el 2030 (European Commission, 2020).

Uno de los últimos objetivos de reducción de emisiones que estableció la Comisión Europea en el año 2018, es la nombrada hoja de ruta 2050 o también llamada horizonte 2050 (Comisión Europea, 2020). En él, se establece una hoja de ruta hacia una economía baja en carbono y competitiva de aquí al 2050, estableciendo como objetivo principal la reducción de las emisiones de la Unión Europea un 80% por debajo de los niveles de 1990. (Ministerio para la transición ecológica, 2019).

Poco a poco, los riesgos del cambio climático y del calentamiento global se hacen más visibles entre la población, junto con las medidas que se están tomando para intentar frenar este proceso. Todas las medidas que se quieren tomar requieren sacrificios tanto industriales como sociales. Estos cambios intervienen en la rutina de la sociedad actual, como puede ser, por ejemplo; el consumo innecesario, el llamado ‘extraer, producir y desperdicia’ o ‘la obsolescencia programada’. Estos hábitos de consumo aumentan la generación de residuos, la fabricación de otros nuevos que durante el proceso de producción generan gases de efecto invernadero. Por lo que dichos hábitos, no solo conllevan un impacto en la emisión de gases de efecto invernadero, sino que también afectan de manera significativa a la generación de residuos.

Algunas de las conductas que la unión europea prevé cambiar, se apoyan en el sistema económico denominado Economía circular. La economía circular se define como “un nuevo sistema económico y social que tiene como objetivo la producción de bienes y servicios al tiempo que reduce el consumo y el desperdicio de materias primas, agua y fuentes de energía”. (Junta de Castilla y León, 2019)



Figura 2: Pasos que dan forma a una economía circular (Fuente: Infobae, 2020)

Este sistema apoya la optimización de los materiales y residuos, alargando la vida útil de los productos mediante la reintroducción de los residuos en la cadena de producción. Para establecer esta filosofía en la sociedad, se creó el concepto de las 7R-s que hacen referencia las siete palabras: Rediseñar, Reducir, Reutilizar, Reparar, Recuperar, Renovar, Reciclar. (Parlamento Europeo, 2015)

Son varias las razones por las que se debería cambiar el sistema económico actual (sistema económico lineal). Los principales motivos del cambio son:

- La extracción y el uso de materias primas tienen un importante impacto sobre el clima. Estas actividades aumentan el consumo energético y las emisiones de CO₂.
- El aumento en la demanda de materias primas y la escasez de recursos. Como sabemos, algunas de las materias primas son limitadas y el consumo de estas en los últimos años ha ido en aumento junto con la población mundial.
- La interdependencia de países. En el caso de Europa, algunos países dependen de otros para obtener materia prima.



Figura 3: Esquema de un sistema económico lineal (Fuente: Mercado y empresas para los servicios públicos, 2020)

Si se realiza una breve comparación entre el sistema económico lineal (actual) y el sistema circular, se observan grandes diferencias. La economía circular aportaría:

- Una disminución considerable de la presión sobre el medio ambiente. Disminuirían las emisiones de gases de efecto invernadero, los impactos en medio ambiente tanto visuales como territoriales etc.
- Una mejora de la gestión de suministros de materias primas
- Productos más duraderos
- Una mayor competitividad e innovación debida a rediseño que se debe de establecer a la hora de insertar un residuo como materia prima en la economía circular.
- Crecimiento del empleo. La gestión de residuo por sí solo es un campo que genera una gran cantidad de empleo y al reciclar y rediseñar nuevos elementos tanto la innovación como nuevos campos de trabajo se ven beneficiados.

Junto con el objetivo de disminuir la extracción y el uso de materias primas, la producción de las energías renovables incrementa de manera considerable. Por lo que el uso de fuentes renovables para la generación de energía supone uno de los pilares básicos para la economía circular.

Dicho sistema económico, por su filosofía promueve una producción de energía limpia haciendo hincapié en los beneficios que aportan al medio ambiente. Estas son algunos de los beneficios que aportan:

- Se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero en los procesos de generación de energía, describiéndolas como energías limpias siendo una solución imprescindible en la lucha del cambio climático.
- Reducen la dependencia energética que puede existir entre territorios, supone una ventaja diferencial para las economías locales.
- Tienen un crecimiento competitivo. Estos últimos años, especialmente las tecnologías renovables eólicas y fotovoltaicas han reducido drásticamente sus costes.

En el acuerdo de París, en 2015 se exigió duplicar la cuota de renovables en la generación eléctrica hasta situarla en el 57% a nivel mundial en 2030.

Como anteriormente se ha mencionado, hay varios tipos de energías renovables, que en función de distintas variables (la temperatura, la altitud, latitud etc.) se adaptan mejor unas que otras a cada situación. Podemos encontrarnos los siguientes tipos de energías renovables: E. eólica, E. solar (fotovoltaica y solar térmica), E. hidráulica, Biomasa y biogás, E. geotérmica, E. mareomotriz, E. undimotriz u olamotriz, Bioetanol y el Biodiesel. (Acciona, 2020)

Entre todos estos tipos de energías renovables, este trabajo se va a centrar en los fundamentos del biogás. Mas concretamente, sobre la obtención de biometano, un biocombustible renovable cuya obtención esta basado en la valorización energética de residuos obtenida mediante la digestión anaerobia. Gracias a la digestión anaerobia, la materia orgánica (desechos biológicos, cultivos energéticos, lodos de aguas residuales, residuos orgánicos) se degrada en ausencia de oxígeno, produciendo así el biogás.

El biogás que se obtiene representa una mezcla de gases combustibles como; metano (50-70% CH₄), dióxido de carbono (30-50% CO₂), ácido sulfhídrico (<2% SH₂) y otros gases (NH₃, N₂, H₂...). Entre dichos gases, el metano es el más abundante, con un poder calorífico de 3300 kcal/m³ metano. (Palau, 2012)

Gracias al metano presente en el biogás, este puede ser utilizado como biocombustible por su alto poder calorífico, pero para ello debe pasar por un proceso de depuración y ser transformado en biometano. El proceso de depuración a biometano se caracteriza principalmente por la eliminación del dióxido de carbono, aumentando la concentración total del metano en el gas hasta un 96%. Dicho porcentaje indica el cumplimiento de los

estándares de calidad del gas natural. Por lo tanto, son dos los usos principales del biometano. (European Biogas Association, sin fecha)

- Inyección en la red de gas, siendo sustituto del gas natural.
- Combustible para vehículos.

2. OBJETIVO

En el presente trabajo de tipo revisión bibliográfica, se define el concepto de biometano, un biocombustible que permite cumplir con los compromisos adquiridos en los planes establecidos para la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero y los planes de prevención de residuos (S. Arjandas et al., 2019).

Se plantean los siguientes objetivos:

- Definir el proceso de la digestión anaerobia y las principales ventajas que supone con relación a la producción de energía renovable.
- Revisión de las principales características de las plantas de producción de biometano e identificación de las principales fuentes de producción y aplicaciones.
- Descripción de la situación actual y perspectivas futura de producción y aplicación de biometano. Los principales proyectos o plantas en funcionamiento en España y Europa hasta ahora.
- Demostrar la eficiencia del biometano frente a otros combustibles como el biogás, comparar las características y capacidades de esta.

3. METODOLOGÍA

Durante la elaboración de este trabajo se han empleado diversas bases de datos como son Google Scholar (<https://scholar.google.es/>), ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>), el boletín oficial de estado (<https://boe.es/>) o EUR - Lex (<https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>) para la consulta de textos legislativos de la Unión Europea.

Las palabras clave introducidas inicialmente en las bases de datos fueron: “Biometano”, “Biogas”, “Upgrading”, “Gas de efecto invernadero” “Digestión anaerobia”, y “Energía renovable”.

Además de las bases de datos, también se han consultado las páginas web de diferentes organismos u organizaciones como AEBIG – Asociación Española de Biogas (<https://www.aebig.org/>), IDAE – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (<https://sede.idae.gob.es/lang/>), ISTAS - Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (<https://istas.net/>) y MITECO – Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (<https://www.miteco.gob.es/es/>).

Asimismo, también se ha consultado la revista técnica de Medio Ambiente RETEMA (<https://www.retema.es/>) y la información disponible en las páginas web de compañías como ACCIONA (<https://www.acciona.com/es/soluciones/energia/>) y IBERDROLA (<https://www.iberdrola.es/>).

Las imágenes mostradas en el trabajo han sido tomadas de varias fuentes bibliográficas, cada una de ellas aparece mencionada en los pies de foto.

La búsqueda de información se realizó en español y en inglés con la intención de ampliar el campo de búsqueda. Los documentos recopilados están datados entre los años 2015-2021, siendo los documentos recientes los prioritarios con la intención de obtener la información más actualizada posible.

El programa empleado para gestionar la bibliografía ha sido “Mendeley”, debido a que es un gestor bibliográfico gratuito que permite incorporar en el texto de forma automática las citas y fuentes bibliográficas utilizadas de manera rápida. El estilo que se ha utilizado a la hora de redactar las citas y el listado final de referencias ha sido “Harvard-ULE”.

4. PROCESO DE OBTENCION DEL BIOGÁS

El proceso de obtención de biogás se basa en la digestión anaerobia, un proceso biológico, donde una amplia variedad de sustratos es degradada por algunos microorganismos en condiciones anaerobias (ausencia de oxígeno). Las principales fuentes de materia prima que se utilizan para la producción de biogás son los residuos ganaderos y agroindustriales, los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) y la fracción orgánica de los residuos domésticos industriales respectivamente. (European Biogas Association, sin fecha)

El proceso de la digestión anaerobia incluye 4 etapas consecutivas en las que intervienen diversas poblaciones de bacterias. (Figura 4)

- La primera etapa comienza con la **hidrolisis**, donde los compuestos orgánicos más complejos (proteínas, carbohidratos y lípidos) son transformados en moléculas solubles y degradables (azúcares, aminoácidos y ácidos) por bacterias fermentativas hidrolíticas.
- A continuación, en la segunda etapa denominada **acidogénesis**, las bacterias fermentativas acidogénicas transforman los compuestos orgánicos simples producidos en la hidrolisis, en productos orgánicos volátiles (alcoholes y cetonas).
- En la tercera etapa denominada **acetogénesis**, los ácidos orgánicos volátiles son convertidos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Por último, en la etapa de la **metanogénesis** participan las bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias. Aquí se dividen las bacterias metanogénicas en dos categorías;
 - Bacterias metanógenas hidrogenotróficas (producen metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno y representa el 1/3 de la producción total de metano)
 - Bacterias metanogénicas acetoclasticas (producen metano a partir de acetato y representa el 2/3 de la producción total de metano).

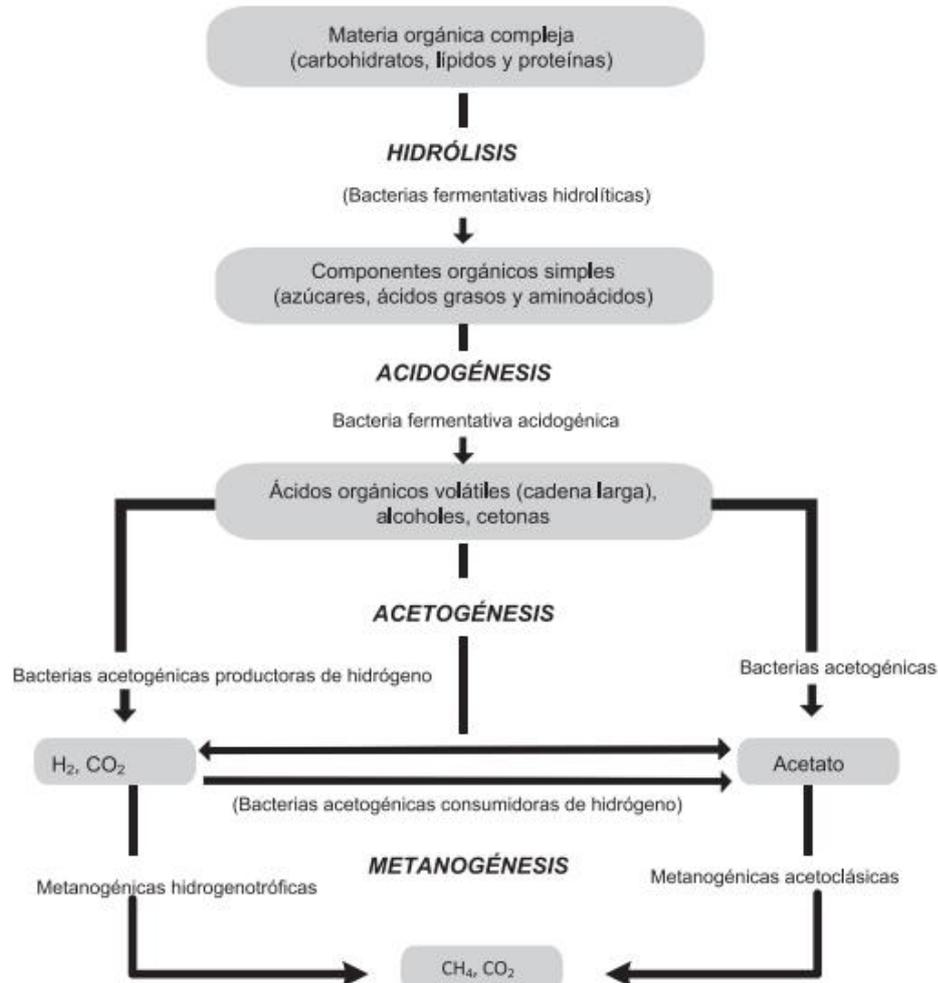


Figura 4: Etapas y microorganismos que intervienen en el proceso de digestión anaerobia. (Fuente: Parra Huertas R.A., 2015)

Como resultado del proceso de digestión, el sustrato inicial se descompone, dando lugar a una serie de gases que forman el biogás y a un subproducto denominado digestato. El biogás se caracteriza por estar constituido principalmente por metano (50% - 70%) y dióxido de carbono (30% - 50%). El biogás tiene una potencia calorífica en torno a 5500 kcal/m³, siendo esta una mezcla de gases, donde el metano destaca como principal gas combustible. Por otro lado, el digestato está formado por compuestos inorgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, pudiendo ser aprovechado como abono o como fertilizante. (Biogas Fue Cell, 2017)

La composición final del biogás y del digestato dependerá del material introducido en el digestor y del funcionamiento del proceso.

4.1 La importancia de los parámetros en las características del biogás.

Gracias a las propiedades caloríficas y a la procedencia de origen natural de la materia prima, el biogás se ha convertido en una fuente de energía natural importante y, por consiguiente, una fuente de energía renovable.

Durante el proceso de digestión, la cantidad de metano que se obtiene del residuo dependerá de algunos parámetros que se deben tener en cuenta.

- La **temperatura** abarca un papel importante en la degradación de la materia orgánica, ya que influye en la velocidad de degradación del sustrato. El digester puede operar en un ambiente psicrófilo (temperatura ambiente), mesófilo (alrededor de 35 °C) o termófilo (en torno a los 55°C), pero cuanto mayor sea la temperatura del digester, más rápida será la degradación del sustrato. Cabe destacar que, además, a partir de las temperaturas termófilas se asegura la destrucción de algunos patógenos asociados a los residuos.
- El **tiempo de retención**, es el tiempo medio de persistencia del sustrato en el reactor bajo la acción de los microorganismos. Cuanto más largo es el tiempo de retención, más alto es el contenido en metano y con ello el poder calorífico.
- El **pH**, este parámetro debe permanecer entorno a los valores de 6,6-7,5, siendo el valor pH = 7 (neutro) el valor ideal. Fuera de este rango, la acción de los microorganismos del digester se ve ralentizada, pero la acción de estas no se inhibe hasta alcanzar valores extremos. Para regular el pH de un proceso anaerobio, se utilizan varios métodos de los cuales destacan los siguientes:
 - Agregación de álcali (cal o sosa comúnmente)
 - Agregación de ácido (orgánico o inorgánico)
- El **sustrato o materia prima** deben ser compuestos fácilmente degradables, que a su vez aseguren el crecimiento de los microorganismos para así obtener una rápida degradación. Dependiendo del origen del sustrato a digerir (deyecciones ganaderas, fracción orgánica etc.) el poder calorífico obtenido en el biogás puede variar de manera considerable. Entre las deyecciones ganaderas, los purines de cerdo se caracterizan por ser uno de los sustratos que mayor concentración de metano producen en el biogás final. (Khairuzzaman, 2016).

En la Tabla 1, se representan una comparativa de algunas de las características generales que presenta el biogás frente a las que presenta el biometano tras el proceso de “upgrading”.

Tabla 1: Características generales del biogás frente al biometano (Fuente: Elaboración propia)

	BIOGÁS	BIOMETANO
Poder calorífico	18,8 - 23 MJ/kg	55 MJ/kg
Composición	45 – 65% metano (CH₄) 20 – 35% dióxido de carbono (CO₂) 8% trazas de otros gases	90 - 95% metano (CH₄) < 5% dióxido de carbono (CO₂) < 2% trazas de otros gases
Contenido energético	6,0 – 6,5 kW h m⁻³	-
Equivalente de combustible	0,60 – 0,65 L petróleo/m³ biogás	Equivalente al gas natural
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire	5 % de biometano en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750 °C (contenido CH₄ > 50%)	480 – 690 °C
Densidad normal	1,25 kg m⁻³	0,66 kg m⁻³

La diferencia más destacable entre ambos gases se ve reflejado en el poder calorífico, el biometano presenta un mayor poder calorífico, debido al aumento en la concentración de metano (90-95% CH₄).

Como se observa en la tabla 1, el biometano presenta buenas cualidades para ser utilizado como fuente de energía renovable, a continuación, se mencionan los principales beneficios que aporta el uso del biometano (Repullo, 2020).

- Es el único biocombustible que va más allá de la neutralidad del CO₂, incluso puede llegar a generar huellas de carbono negativas. Esta negatividad se debe a la recirculación de los nutrientes al suelo, ya que el suelo actúa como sumidero de carbono y cuando se contabiliza el ciclo completo da lugar a huellas de carbono negativas.
- Gracias a la digestión anaerobia, se consigue evitar el proceso de fermentación de la materia orgánica y con ello las emisiones no controladas de metano. Durante la digestión anaerobia ese metano se recupera y su uso es aprovechado

energéticamente en procesos de combustión, transformándose en dióxido de carbono. Por ello, el biometano permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente el metano siendo esta 28 veces más perjudicial que el dióxido de carbono.

- Valoriza los residuos y permite producir bioproductos (biorefinerías) y biofertilizantes.
- Mejora la balanza económica, disminuyendo la dependencia energética frente a otros países y crea actividad y puestos de trabajo en el medio rural.
- A diferencia de otros tipos de energías renovables como pueden ser la solar, el biometano es un proceso de generación de energía renovable más constante y regular, ya que no depende de factores.
- Es fácilmente almacenable y gestionable, el transporte puede realizarse por los conductos actuales del gas natural (Fernández-González *et al.*, 2020).

5. TRATAMIENTOS DE LIMPIEZA Y PURIFICACIÓN DEL BIOGAS (UPGRADING)

Tras la obtención del biogás mediante la etapa previa de digestión anaerobia, el gas no cumple con las características necesarias para ser considerado biometano, para ello se utiliza la técnica “upgrading” o depuración, que principalmente se compone de dos tratamientos; Limpieza y purificación. Dependiendo del origen de la materia prima a tratar la composición del biogás puede variar significativamente, por este motivo es importante saber de dónde proviene, para así poder definir los métodos de tratamiento más apropiados.

Los tratamientos de limpieza del biogás eliminan parte de los componentes corrosivos como el agua, H₂S y las partículas sólidas. Los tratamientos de purificación se diseñan para limpiar el biogás mediante procesos fisicoquímicos. En este proceso, se eliminan los compuestos inertes como CO₂ y el N₂ para aumentar el contenido relativo del metano y el poder calorífico.

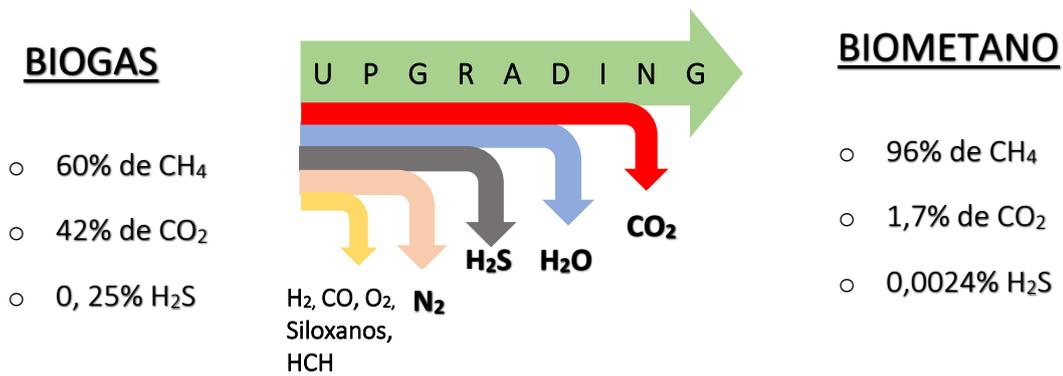


Figura 5: Breve descripción del proceso upgrading. (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se hará una descripción de los métodos de eliminación y purificación de los compuestos gaseosos del biogás.

5.1. Eliminación del vapor de agua

El biogás que se obtiene tras los tratamientos de digestión se encuentra saturado en agua, dicha saturación disminuye drásticamente el poder calorífico inferior (PCI) y el rendimiento de la maquinaria en los procesos de combustión. Además, es probable que se cree condensado y que junto con otras impurezas acabe formando ácidos, los cuales pueden provocar corrosión en las paredes y tuberías de los equipos. (Repullo, 2020)

El contenido de vapor de agua depende de la presión y temperatura a la que se encuentre el biogás, por lo que los métodos de eliminación y purificación se basan en esos dos parámetros (Lanao, 2013).

Los métodos de eliminación de agua están basados en la separación física por condensación o en métodos como la adsorción o la absorción.

- Los métodos físicos son los más sencillos, eliminan el vapor de agua por refrigeración y condensación del gas. Finalmente, las partículas condensadas se eliminan mediante ciclones o trampas de humedad.
- Los métodos químicos, utilizan materiales que adsorben o absorben el agua mediante presiones moderadas que aumentan la capacidad de retención del agua en el material utilizado. Los materiales más utilizados son compuestos higroscópicos, como por ejemplo el glicol, capaz de absorber el agua.

5.2 Eliminación de sulfuros de hidrogeno

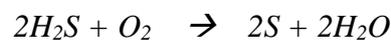
Este proceso es conocido como desulfuración del biogás. La eliminación del H₂S resulta imprescindible para evitar concentraciones tóxicas de H₂S y para prevenir la corrosión de los metales, por ello es uno de los primeros contaminantes en ser eliminado. La presencia de este elemento puede traducirse en daños por corrosión en las tuberías y una reducción del rendimiento de las técnicas de eliminación de otros compuestos.

Para llevar a cabo este proceso de eliminación de H₂S se utilizan dos técnicas que se distinguen principalmente en función del momento en el que se aplican (durante o después de la digestión).

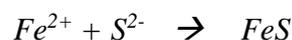
5.2.1 Eliminación de H₂S durante la digestión anaerobia:

En este caso el contaminante se puede eliminar o su formación puede ser inhibida. Este proceso consiste en dosificar O₂ y en la adición de cloruros de hierro, ambos se aplican en el interior del digestor. (Lanao, 2013)

- La adición de oxígeno provoca una oxidación biológica del H₂S por una serie de microorganismos aerobios obteniendo azufre (S) que precipita y se elimina.



- La adición de cloruros de hierro (FeCl₂, FeCl₃) provoca una intervención directa con el H₂S formando sulfuro de hierro (FeS) y azufre (S) que precipita y se elimina.



5.2.2 Eliminación de H₂S tras la digestión anaerobia

A diferencia de la eliminación de H₂S durante la digestión anaerobia, en este caso la eliminación se basa en la adsorción y absorción. También se pueden utilizar filtros biológicos que actúan de forma similar al anterior, en cuyo caso la dosificación del oxígeno se realiza fuera del digestor en una columna aparte.

- La adsorción química se fundamenta en la adsorción tras una reacción química, esta se realiza sobre óxidos metálicos (Fe_2O_3 , ZnO) o hidróxidos ($\text{Fe}(\text{OH})_3$).
- La absorción física, utiliza agua o disolventes orgánicos capaces de disolver el H_2S . Mediante la adición de algunos compuestos químicos (NaOH , FeCl_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$) al agua se puede aumentar la capacidad y eficacia de eliminación. De esta manera, se produce una absorción química en la que se forman sales poco solubles que finalmente precipitan.

5.3 Eliminación de los siloxanos

Los siloxanos, debido a su poder abrasivo suponen un peligro para el aprovechamiento energético del biogás, suelen producir daños en los motores de la maquinaria utilizada, reduciendo su vida útil. La abrasión, ocurre cuando el sílice se deposita en el motor, como consecuencia de la combustión de los siloxanos. (Campanella, 2010)

Actualmente, la eliminación de siloxanos se centra en la absorción, adsorción y criogenia.

- Las técnicas de eliminación por absorción química suelen utilizar ácidos fuertes como H_2SO_4 o HNO_3 . La absorción física se realiza con agua y otros disolventes orgánicos, aunque el agua no proporciona una alta eficiencia de eliminación.
- La técnica de eliminación por adsorción utiliza carbón activo, aunque también pueden servir alúmina o sílica gel. Este último tiene mayor capacidad de absorción y además puede ser regenerado (a 250°C). El carbón activo no tiene capacidad regenerativa lo que suele llevar a la sustitución.
- La técnica de eliminación criogénica es una alternativa cada vez más utilizada por su alta valía, ya que es capaz de conseguir eficiencias de hasta 99% de eliminación de siloxanos. Esta técnica se caracteriza por la necesidad de enfriar el biogás hasta -70°C .

5.4 Eliminación del dióxido de carbono

El CO_2 , es el subproducto que se encuentra en mayor proporción dentro de la corriente de biogás, se considera un componente inerte que afecta directamente al rendimiento del gas. Por esta razón, se llevan a cabo tratamientos de eliminación de CO_2 , para aumentar la

proporción de metano en el gas. La eliminación del dióxido de carbono se caracteriza por ser la etapa más costosa de las técnicas de limpieza y purificación del biogás. Por ello, el resto de las técnicas de eliminación dependen de la elección de la técnica escogida para la eliminación del CO₂ (Alvarez, 2016).

Las técnicas más destacables son las siguientes:

5.4.1 Absorción de CO₂ con agua

Esta, es una técnica de absorción física que se basa en la solubilidad de los elementos en agua. Se conoce que la solubilidad del CO₂ en agua es mayor que la del CH₄ en función de los parámetros de presión y temperatura.

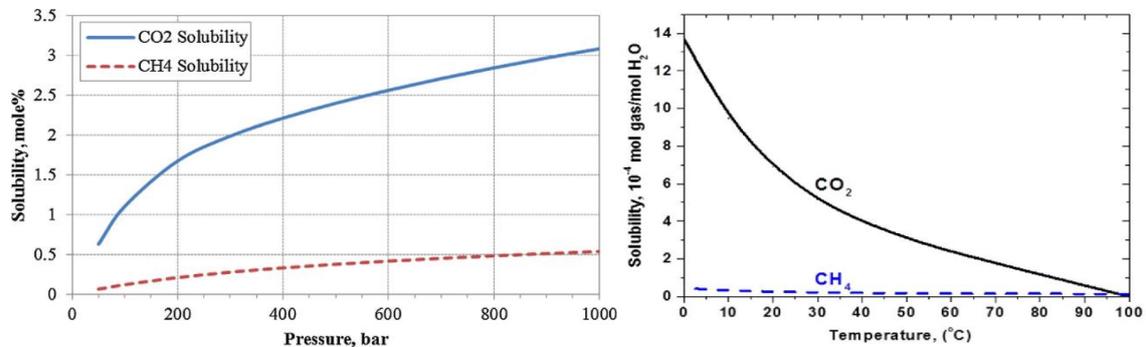


Figura 6: Representación de la solubilidad del CO₂ y CH₄ en función de la temperatura y de la presión. (Fuente: Lanao Sisó, E., 2016)

En el caso de la temperatura, la solubilidad del dióxido de carbono aumenta cuando la temperatura también lo hace, mientras que la solubilidad del metano no varía prácticamente. En el caso de la presión, cuando esta aumenta la solubilidad del dióxido de carbono en agua también se ve incrementado, en cambio en este caso la presión también afecta a la solubilidad del metano, aunque se mantiene muy por debajo de la solubilidad del metano (Figura 6).

Por medio de esta operación, también se consigue eliminar H₂S, NH₃ e incluso CH₄, esta última en poca cantidad.

La técnica de purificación por absorción acuosa del CO₂ se lleva a cabo en torres de lavado. En primer lugar, el gas se introduce por la parte inferior de la torre de lavado y el agua por la parte superior. En el interior de la torre se forma un flujo a contracorriente que lleva a la absorción del CO₂ y H₂S en agua que se dirigen a la parte inferior de la

torre. Finalmente, por la parte superior de la torre se extrae el gas purificado con valores aceptables de CO_2 y H_2S . (Figura 7)

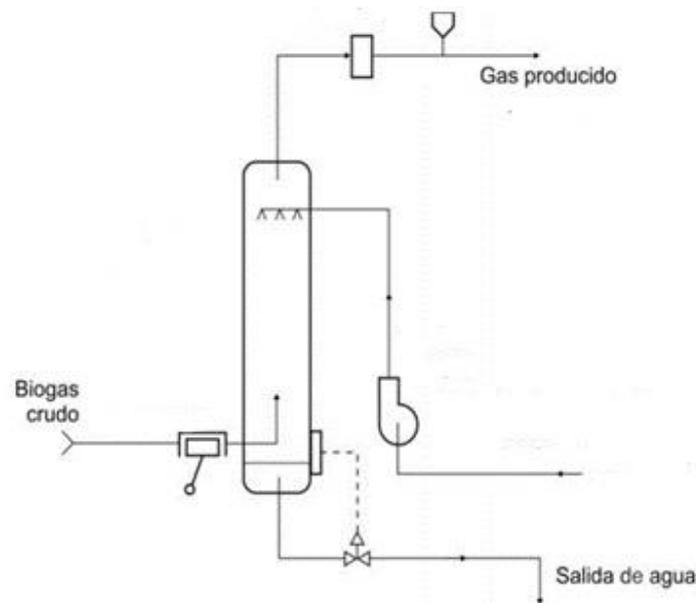


Figura 7: Purificación del biogás por absorción acuosa (Fuente: Elaboración propia)

5.4.2 Absorción de CO_2 con polietilenglicol

El funcionamiento de esta técnica de absorción es similar al anterior, sin embargo, en lugar de utilizar el agua como absorbente se utiliza el polietilenglicol, un disolvente orgánico capaz de absorber el CO_2 , H_2S , vapor de agua, NH_3 y algunos hidrocarburos halogenados eliminándolos casi por completo del biogás.

Este compuesto presenta incluso una mayor capacidad de absorción que el agua, lo que permite trabajar con equipos más pequeños lo que conlleva un menor consumo eléctrico. En cambio, la regeneración del polietilenglicol es más compleja, ya que se deben realizar a temperaturas de entre $50\text{-}80^\circ\text{C}$ (Alvarez, 2016).

5.4.3 Absorción de CO_2 con aminoalcoholes

La técnica de absorción de CO_2 con aminoalcoholes se basa en un tratamiento de absorción química en el que se forman enlaces químicos reversibles entre el soluto y el disolvente. Los disolventes químicos utilizan soluciones acuosas de aminas (mono- di-, tri- etanolamina).

Estos aminoalcoholes tienen una gran selectividad hacia la absorción del CO_2 incluso tienen la capacidad de disolver cantidades significativamente mayores por unidad de volumen que el agua. Además, algunos también son capaces de absorber el H_2S . La absorción con aminas es efectiva a presiones inferiores lo que se traduce en un menor consumo energético de bombeo y compresión en comparación con el agua o con el polietilenglicol. Sin embargo, la regeneración requiere elevadas temperaturas (100 – 160°C) (Lanao, 2016).

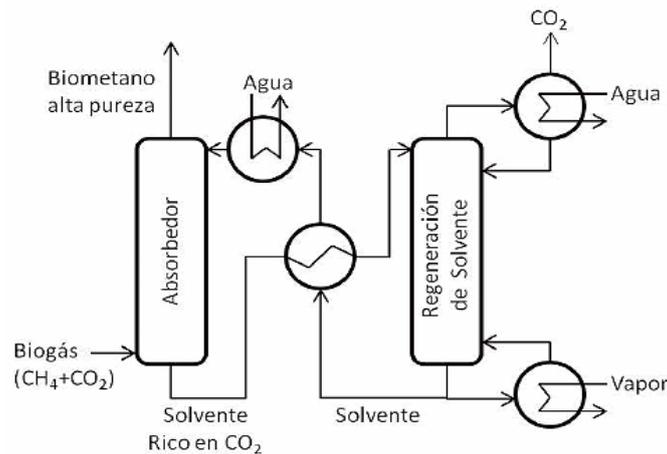


Figura 8: Purificación del biogás por absorción con aminas (Fuente: Maldonado R., 2014)

5.4.4 Adsorción de CO_2 con sistemas PSA (Pressure Swing Adsorption)

Esta técnica de eliminación por adsorción de CO_2 se realiza mediante la tecnología PSA (Pressure Swing Adsorption) caracterizado por una variación de la presión que junto a las diferentes dimensiones moleculares de CO_2 (0,34 nm) y CH_4 (0,38 nm) permiten la adsorción del CO_2 . (Ardolino *et al.*, 2021).

El sistema utiliza dos o más lechos, de esta manera, mientras un lecho se encuentra en la etapa de adsorción, otro se encuentra en la etapa de regeneración mediante la reducción gradual de la presión. El gas residual compuesto mayoritariamente de CO_2 , se libera en la última etapa del proceso.

Como material adsorbente se utilizan zeolitas y carbones activados, con cavidades de 0.37 nm que permiten retener el CO_2 en los poros, mientras que CH_4 fluye sin ser retenido. Dichos adsorbentes permiten obtener un alto grado de pureza en el gas. (Sistematización de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala industrial, 2018). Las etapas generales de este sistema PSA son (Figura 9):

- Presurización del lecho: En esta etapa se aumenta la presión en el lecho con la corriente de alimentación, consiguiendo un enriquecimiento en el componente que se desea adsorber.
- Alimentación o adsorción a alta presión: Se introduce una corriente de alimentación por un extremo del lecho mientras que por el otro se obtiene el producto ligero. El dióxido de carbono es adsorbido por el material adsorbente y el metano pasa sin ser adsorbido como producto ligero.
- Despresurización del lecho: La caída de presión permite la desorción de dióxido de carbono, a continuación, se extrae el gas por el extremo por el que ha sido introducida la corriente de alimentación.
- Purga: Se introduce una corriente de producto pesado para purgar el lecho que contiene el CO₂.

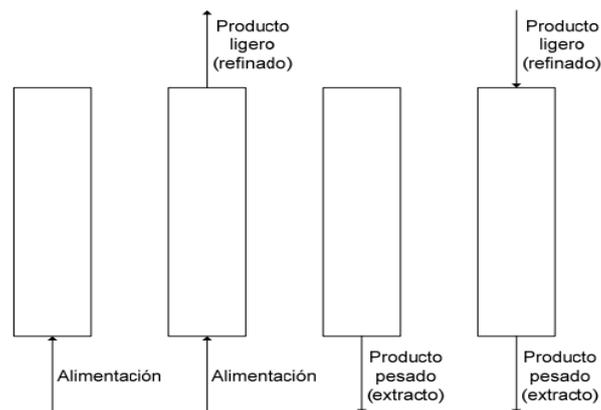


Figura 9: Paralelamente las etapas del sistema PSA. (Fuente: Sanz de Juan A, 2015)

Estas etapas se pueden combinar libremente en función del objetivo que se pretende conseguir. Este sistema permite obtener una corriente de metano con 95-99% de pureza y poder utilizar directamente el biometano en la salida.

6. BIORREFINERIAS

Las biorrefinerías son industrias integradas que, mediante el uso de biomasa como materia prima y una variedad de tecnologías diferentes, producen energía y/o biocombustibles, a la par que productos químicos, materiales, alimentos y piensos. (BioPlat. *et al.*, 2017)

En las últimas décadas, el modelo de biorrefinería ha sido testigo de la evolución lo que dado lugar a la descripción de cuatro tipos de biorrefinería. La primera generación de biorrefinerías comenzó utilizando una sola fuente de energía (con alto contenido en azúcar, rastrojos de maíz o paja de trigo) y tecnología, para así producir unos pocos productos. La segunda generación, al igual que la primera utilizaba una sola materia prima y tecnología, pero en este caso los productos eran variados. En la tercera generación se dio una evolución en comparación a las anteriores generaciones de biorrefinerías. En este caso, los productos que se obtenían eran muchos y estas se obtenían a partir de diversas materias primas y tecnologías. Por último y basadas en la tercera generación se encuentran las biorrefinerías de cuarta generación, cuyo objetivo es lograr materia prima de bajo coste económico y el mayor beneficio ambiental posible (Liu *et al.*, 2021).

Las biorrefinerías actúan de forma similar a las refinerías de petróleo, transformando la biomasa en productos aprovechables, la diferencia entre ambas refinerías se basa en la materia prima que utilizan. Las biorrefinerías utilizan como materia prima cultivos tradicionales, residuos orgánicos de origen agrícola, ganadero, forestal etc. Por otro lado, las biorrefinerías utilizan una amplia variedad de tecnologías en las que destacan; pretratamientos, conversiones químicas y conversiones biológicas. La conversión biológica destaca por ser la etapa fundamental en el proceso, ya que es aquí donde ocurre la digestión anaerobia de la materia prima (Aebig / *Biorefinerías* - Aebig, sin fecha).

Los productos que se obtienen en las biorrefinerías pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Productos bioenergéticos: electricidad, calor, biocombustibles sólidos, biodiesel, bioetanol e incluso biogás.
- Productos no energéticos: Estos productos se producen con los elementos intermedios que se extraen en la etapa de digestión anaerobia: piensos, fertilizantes y bioproductos como bioplásticos, biopinturas, bioadhesivos, biolubricantes, etc.

Las plantas de biogás se centran en la producción del biogás a diferencia de las biorrefinerías, que permiten producir un amplio abanico de productos. La principal ventaja que presentan las biorrefinerías es que pueden adaptarse con facilidad a la materia prima inicial y obtener un buen producto final, lo que permite adaptarlas a contextos

específicos a lo largo del tiempo. Actualmente, se está apostando por la innovación, desarrollando el potencial y ampliando su gama de productos finales yendo más allá de la venta o producción de electricidad. (*evolución de las plantas de biogás agroindustrial hacia nuevos modelos...*, 2015)

7. APLICACIONES TÍPICAS DEL BIOMETANO, SITUACION ACTUAL Y EJEMPLOS DE PROYECTOS

La producción de biometano tiene como finalidad la obtención de un combustible versátil y de origen renovable que pueda ser aplicado en diversos campos. Debido a sus características de composición química y poder energético, el uso se asemeja al gas natural.

Las principales aplicaciones del biometano son:

- La generación de energía eléctrica. Una vez generada la energía eléctrica, esta es transportada por la red eléctrica convencional.
- La producción de calor. El gas es distribuido por la red para suministrar hogares e incluso industrias, donde su aplicación será similar al del gas natural.
- Biocombustible para la automoción: Es utilizado como sustituto de combustibles fósiles convencionales.

Actualmente en España, la mayor parte del biometano que se genera se inyecta a la red y solo una pequeña parte se utiliza como biocombustible.

7.1 Evolución del biometano y situación actual

Para poder hablar de plantas de biometano, es inevitable mencionar las plantas de biogás, ya que para la generación de biometano es necesaria una etapa previa de eliminación y purificación del biogás generado en dichas plantas.

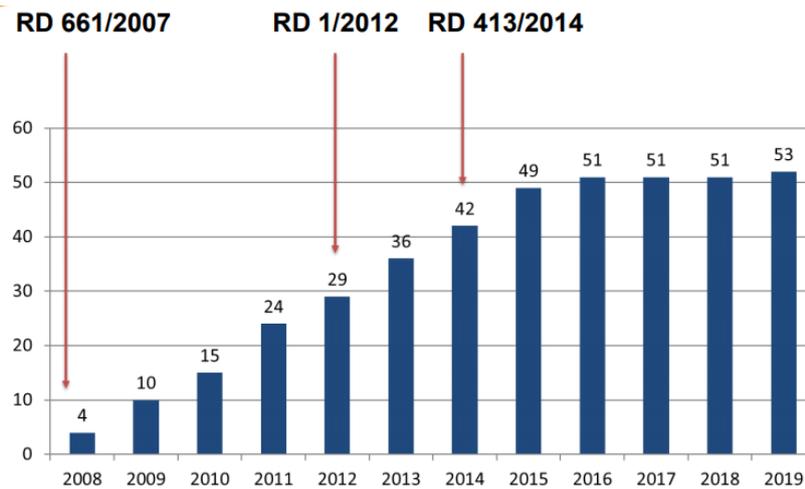


Figura 10: Evolución de las plantas de biogás agrogranaderas en España. (Fuente: AEBIG, sin fecha)

El inicio de las plantas de biogás lo marco el real decreto 661/2007, este real decreto permitió el desarrollo y la evolución de las plantas de biogás durante los primeros años gracias a unas primas y ayudas que se concedieron. En el año 2012, se publicó el RD 1/2012 que paralizó temporalmente las ayudas que en el anterior RD se definían. Este cambio, produjo un descenso en la construcción de nuevas plantas, sin embargo, fue en el año 2016 cuando se paró completamente la construcción. En 2014, mediante la creación de un nuevo RD 413/2014 se reactivó el sistema de ayudas a las energías renovables, sin embargo, estas ayudas resultaron aplicables a los proyectos que estaban en régimen especial anteriormente, es decir, aquellos proyectos que hasta el 2012 pudieron acceder a las ayudas.

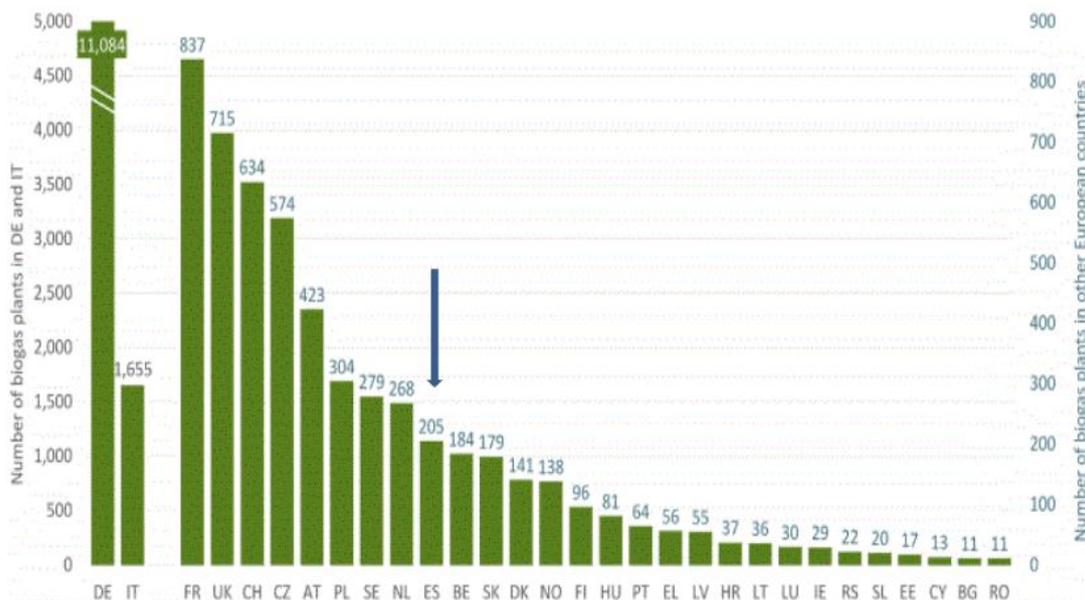
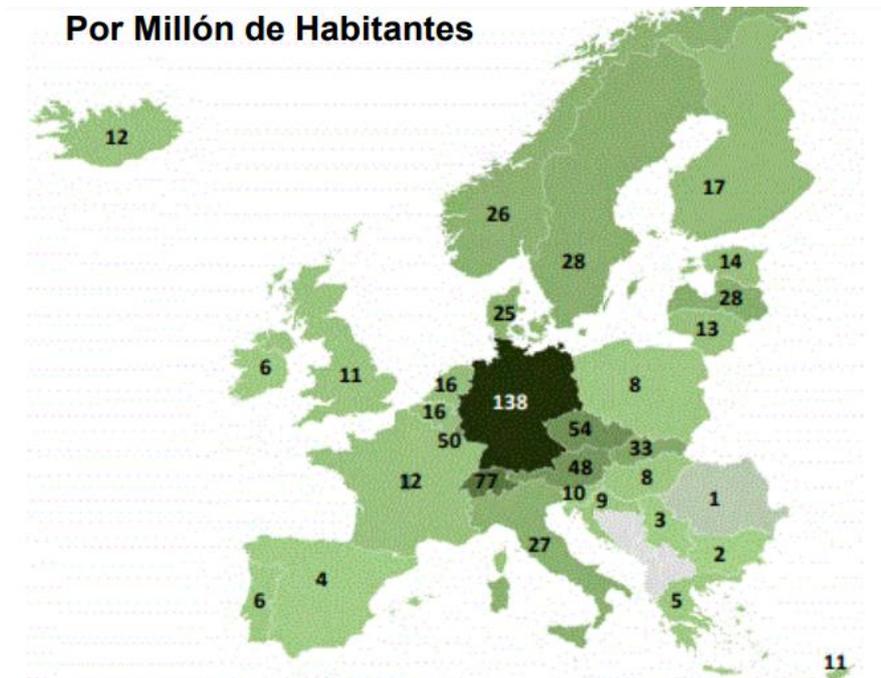


Figura 11: Distribución de las plantas de biogás en Europa en el año 2018. (Fuente: AEBIG, sin fecha)

En relación con la figura 11 en el año 2018, en España había 205 plantas de biogás, de las cuales 53 funcionaban con materia prima de origen agroganadero, 80 relacionadas con estaciones depuradoras de aguas residuales, 40 relacionadas con vertederos y 60 relacionados a otros orígenes como agroalimentarias, papeleras etc.

A nivel europeo, Alemania encabeza el listado de los países que cuentan con el mayor número de plantas de biogás con más de 11.000, consecutivamente Italia con 1.655 y Francia con 837. Sin embargo, la realidad en España es otra, con sus 205 plantas se posiciona como decimo primero en la gráfica (figura 11) situándose a la par de algunos países de pequeño tamaño como Eslovaquia, Bulgaria y Letonia.

La totalidad de las plantas de biogás europeas suman 18.197 plantas de biogás, de las cuales el 1,13% pertenecen a España.



7.2 Potencial de España para la producción de biometano

España es una potencia europea en recursos biomásicos de todo tipo. Si se clasifica el potencial de las materias primas según la fuente de procedencia, los valores energéticos de cada uno serían los siguientes (Tabla 2):

Tabla 2: Potencial disponible por sustrato en España 2018 (Fuente: Elaboración propia)

	RANGO INFERIOR	RANGO SUPERIOR
	Energía producida (GWh)	Energía producida (GWh)
Lodos EDAR	1.023	1.023
Residuos municipales	2.524	3.595
Industria agroalimentaria	3.431	3.431
Ganadería	13.130	15.049
Agricultura	9.520	11.363
TOTAL	29.614	34.460

En primer lugar, con un mayor potencial en el rango superior se sitúa la industria ganadera (43,7%), en segundo lugar, el sector agrícola (32,9%), a continuación, los RSU (10,5%) y finalmente el sector agroalimentario (9,8%) y EDAR (3%).

Para aprovechar el potencial de los sustratos para la producción de biometano, la clave del desarrollo se concentra en el fomento de la producción y en su consumo. Por otro lado, es necesario crear una entidad, un organismo que establezca una serie de mecanismos de control que garantice que un productor que genera una cantidad de biometano sea certificado y sea valorado de manera adecuado en el mercado.

Esta energía, es una energía de futuro imprescindible en el proceso de descarbonización, en la independencia energética, en la reducción de los gases GEI y para la economía circular e incluso para la generación de empleo sostenible en el medio rural.

7.3 Proyectos y perspectivas futuras

Actualmente en España hay varios proyectos de biometano en marcha con el fin impulsar los objetivos de sostenibilidad marcados por Europa para el 2030 y con la estrategia de descarbonización a largo plazo.

- Proyecto de torre Santamaria: Este proyecto se sitúa en una granja de Vallforgona de Balaguer (Lleida). Se trata de la primera granja de leche de vaca totalmente autosuficiente

en materia energéticas. Para ello, han transformado los residuos orgánicos en biogás para la producción de energía eléctrica de autoconsumo.

Actualmente están trabajando en la creación de una planta para la obtención de biometano. La planta utiliza como sustrato estiércol de vacas y ha supuesto una inversión cercana a los 4 millones de euros. El biometano generado, será inyectado en la red de distribución, de esta manera con la puesta en marcha en 2021 de la totalidad de las instalaciones lograran reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a prácticamente cero y podrá obtener ingresos adicionales al inyectar la energía sobrante a la red. (Axpo, 2020)

- FNX Liquid Natural Gas: Este proyecto se centra en la aplicación de un nuevo equipo de enriquecimiento del biogás mediante tecnologías de membranas y un compresor a través del cual consiguen obtener biometano con porcentajes superiores al 97%. Ubicado en Vilanant (Girona), es una planta de biogás desarrollada para la explotación de residuos procedentes de la industria agroalimentaria y de una explotación bobina. La puesta en marcha de esta instalación se estima en julio del 2021(*El correo*, 2021).

- Planta de tratamiento de residuos. Este proyecto se sitúa en la comarca de Iruña-Pamplona, en Navarra. Además de ser una planta de tratamiento de residuos, también será una planta de obtención de biometano donde trataran los residuos de la fracción orgánica para la producción de biometano. El biometano obtenido, se destinará como biocombustible para la flota de autobuses de la ciudad y para los camiones de recogida de residuos. Este proyecto comenzara en 2022 siendo una planta novedosos a nivel estatal, aunque no tanto a nivel europeo (Larrea, 2020).

8. CONCLUSIONES

Habiendo llegado al apartado final de este Trabajo Fin de Grado, se van a resumir las principales conclusiones que se desprenden del mismo.

Una de las principales ideas que se ha querido transmitir, es que un cambio en el actual sistema de generación de energía es necesario y posible en España. El trabajo se ha centrado en la producción de biometano, ya que España tiene todavía mucho que desarrollar y un gran potencial en este campo. También cabe destacar que mediante la generación de biometano, no solo se crea una fuente de energía renovable, sino que mediante este proceso consigue dar salida a los tan problemáticos residuos orgánicos.

El biogás tras ser sometido a diferentes tratamientos de purificación, como pueden ser la absorción o la adsorción, enriquece su contenido en metano equiparándose en propiedades de composición al gas natural y pudiendo ser utilizado en la producción de energía térmica, eléctrica o como combustible de vehículos.

Gracias a proyectos de generación de biometano junto con otros de producción de energías renovables, se favorece una independencia energética para el estado. Por otro lado, esta fuente de energía apoya el modelo de una economía circular, ayudando en la consecución de los objetivos del Marco Europeo de Energía y Medio ambiente como país, y también ayudando a las empresas a reducir su huella de carbono y sus emisiones GEI.

Junto con el biometano es necesario impulsar el resto de las energías renovables para una transición equilibrada en la producción y generación de energía con el fin de lograr un sistema autosuficiente, con menos emisiones de GEI y una mejor calidad del medio ambiente.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- "Mapa europeo de biometano" (2020) *RETEMA. Revista Técnica de Medio Ambiente*.
- Acciona (2020) *La importancia de las energías renovables | ACCIONA | BUSINESS AS UNUSUAL*. Disponible en: https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?gclid=CjwKCAjwiOv7BRBREiwAXHbv3KWVJR0MJMCuLrwbNoqZG-WZY7E74zVSuExEiBskxWdBwhTvljve7xoCaEgQAvD_BwE (Accedido: 22 de octubre de 2020).
- Aebig | Biorefinerías - Aebig* (sin fecha). Disponible en: <https://www.aebig.org/biorefinerias/> (Accedido: 6 de mayo de 2021).
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado (2020) "Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico", *Boletín Oficial del Estado*, (94), pp. 1-5.
- Alvarez, N. (2016) "Procesos de adsorción para la captura de CO2 en corrientes de biogás", p. 270.
- Ardolino, F., Cardamone, G. F., Parrillo, F. y Arena, U. (2021) "Biogas-to-biomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 139, p. 110588. doi:10.1016/j.rser.2020.110588.
- Axpo (2020) "Torre Santamaría, primera granja de leche capaz de convertir el 100% de sus residuos orgánicos en energía".
- Biogas Fue Cell (2017) *Digestión anaerobia - Biogas Fuel Cell*. Disponible en: <https://biogafuelcell.com/digestion-anaerobia/> (Accedido: 10 de diciembre de 2020).
- BioPlat., SusChem., Ministerio de Economía. y Competitividad, I. y (2017) "Manual sobre Biorrefinerías en España", *Ministerio De Economía, Industria Y Competitividad*, pp. 1-92.
- biovec (2016) *Breve historia del biogás en Europa y en España | Biovec Medioambiente | Plantas de Biogás / Biogás*. Disponible en: <https://biovec.net/breve-historia-del-biogas-en-europa-y-en-espana/> (Accedido: 10 de mayo de 2021).
- Campanella, E. (2010) "Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás", *Ciencia y tecnología*, 1(10), pp. 187-202. doi:10.18682/cyt.v1i1.767.
- Diario Oficial de la Unión Europea (2018) *Directiva (UE) 2018/852 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases, Diario Oficial de la Unión Europea. Serie L*. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0852> (Accedido: 24 de mayo de 2021).
- Dominguez Cerdeira, J. M. (2020) *Inyección de biometano en la red de gas natural. EDAR de Butarque (Madrid)*. Disponible en: <https://www.proinstalaciones.com/articulos/reportaje/4394-inyeccion-de-biometano-en-la-red-de-gas-natural-edar-de-butarque-madrid> (Accedido: 10 de mayo de 2021).
- El correo* (2021) "FNX participa en el primer proyecto integral de biometano vehicular en España | El Correo".
- Energía, S. D. E. De (2018) "Consulta Pública Previa de la Hoja de Ruta del Hidrógeno Renovable".
- European Biogas Association (no date) *Aebig | Biometano - Aebig*. Disponible en: <https://www.aebig.org/biometano/> (Accedido: 10 de diciembre de 2020).
- European Commission (2020) *Marco sobre clima y energía para 2030 | Acción por el Clima, European Commission*. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es (Accedido: 22 de septiembre de 2020).
- European Commission (2015) *Acuerdo de París | Acción por el Clima, Polices, information and services. Acciones de la UE*. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es (Accedido: 22 de septiembre de 2020).
- Evolución de las plantas de biogas agroindustrial hacia nuevos modelos...* (2015). Disponible en: <https://es.slideshare.net/ainiapt/evolucion-de-las-plantas-de-biogas-agroindustrial-hacia-nuevos-modelos-basados-en-el-concepto-de-biorefineria> (Accedido: 6 de mayo "GeniaBioenergy-Regulacion-gas-renovable-en-Europa.pdf" (sin fecha).

Fernández-González, J. M., Martín-Pascual, J. y Zamorano, M. (2020) "Biomethane injection into natural gas network vs composting and biogas production for electricity in Spain: An analysis of key decision factors", *Sustainable Cities and Society*. Granada, 60, pp. 1-16. doi:10.1016/j.scs.2020.102242.

Gobierno de España (2015) *Principales elementos del Acuerdo de París*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-el-cambio-climatico/naciones-unidas/elementos-acuerdo-paris.aspx> (Accedido: 22 de septiembre de 2020).

Hernández-Gómez, R. y Chamorro Camazón, C. R. (2016) "Current situation and prospects for biogas and biomethane in Spain and Europe", *DYNA Energía y Sostenibilidad*, 5(1), pp. 1-12. doi:http://dx.doi.org/10.6036/ES8149.

Hidalgo, D., Antolín, G., Martín-Marroquín, J. M., Alvarellós, I., Sanz, S. and Garrote, L. (sin fecha) *PRODUCCIÓN DE BIOMETANO PARA COMBUSTIBLE DE TRANSPORTE A PARTIR DE RESIDUOS DE BIOMASA (BIOMETRANS) | CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*. Disponible en: <http://www.cytred.org/es/biometrans> (Accedido: 6 de noviembre de 2020).

Iberdrola (2020) *Acuerdos Internacionales sobre el Cambio Climático - Iberdrola*. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/acuerdos-internacionales-sobre-el-cambio-climatico> (Accedido: 5 de noviembre de 2020).

IDAE (2016) *Biogás, BIOGÁS*. Disponible en: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas> (Accedido: 19 de noviembre de 2020).

IDAE (sin fecha) *Ayudas a la inversión en instalaciones de producción de energía térmica con fuentes de energía renovable*. Disponible en: <https://sede.idae.gob.es/lang/modulo/?refbol=tramites-servicios&refsec=ayudas-inversion-instalaciones-produccion-energia-termica&refsec=ayudas-inversion-instalaciones-produccion-energia-termica&idarticulo=146896> (Accedido: 9 de mayo de 2021).

Infobae (2020) *Por qué la economía circular es clave para combatir el cambio climático*. Disponible en: <https://www.infobae.com/tendencias/2019/12/17/por-que-la-economia-circular-es-clave-para-combatir-el-cambio-climatico/> (Accedido en: 18 de octubre de 2020)

ISTAS (sin fecha) *Cambio climático | ISTAS, Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud*. Disponible en: <https://istas.net/istas/guias-interactivas/cambio-climatico-y-sus-efectos/cambio-climatico> (Accedido: 22 de octubre de 2020).

Junta de Castilla y León (2019) "Ficha técnica | Medio Ambiente | Junta de Castilla y León", p. 4. (Accedido: 15 de octubre de 2020).

La Unión Europea (2016). Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-el-cambio-climatico/la-union-europea/> (Accedido: 15 de octubre de 2020).

Lanao, E. (2016) "Tecnologías purificación de biogas Master Thesis".

Larrea, P. (2020) "Así será la nueva planta de residuos que planifica la Mancomunidad | Noticias de Pamplona y Comarca en Diario de Navarra", *Diario de Navarra*.

Liu, Y., Lyu, Y., Tian, J., Zhao, J., Ye, N., Zhang, Y. y Chen, L. (2021) "Review of waste biorefinery development towards a circular economy: From the perspective of a life cycle assessment", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, p. 110716. doi:10.1016/j.rser.2021.110716.

Madrid, U. P. de (2019) "INFORME DE EMISIONES DE VEHÍCULOS QUE AFECTAN A LA CALIDAD DEL AIRE". (Accedido: 6 de noviembre de 2020).

Maldonado R., Acosta B., Osorio J., Soto D. y Zeppieri S. (2014) "Selección y diseño de un esquema de separación CH₄-CO₂ de una corriente de biogás" *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela* pp 115-126

Mercado y empresas para los servicios públicos (2020) *Ciudades azules y empleos sustentables mediante la economía circular*. Disponible en: <https://mercadoyempresas.com/web/> (Accedido en: 18 de Octubre de 2020)

Ministerio para la transición ecológica (2019) *Objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto*

invernadero. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/objetivos.aspx> (Accedido: 15 de octubre de 2020).

Palau, C. V. (2012) "Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás. Fundamentos", *Universidad Politécnica de Valencia*, pp. 1-10. (Accedido: 18 de octubre de 2020).

Parlamento Europeo (2015) *Economía circular: definición, importancia y beneficios* | Noticias / Parlamento Europeo. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios> (Accedido: 18 de octubre de 2020).

Parlamento Europeo y del Consejo (2018) "Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y el Consejo por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos", *Diario Oficial de la Unión Europea. Serie L*, pp. 109-140.

Parra Huertas, R.A. (2015) "Digestión anaeróbica: Mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria" *Producción + Limpia* pp. 142-159

Repullo, F. (2020) *Biometano en España Estado actual y perspectivas*.

Sanz de Juan A., 2015 *Diseño de ciclos PSA para la captura de CO2 de gases de combustión*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

S. Arjandas et al. (2019) "LIFE Landfill Biofuel. Valorización sostenible de residuos para producción de biometano y su uso como combustible - Artículos y Reportajes", <https://www.retema.es/>. (Accedido: 6 de noviembre de 2020).

Sistematización de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala industrial (2018) *Tecnología Química*. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000100003 (Accedido: 24 de mayo de 2021).

Unión Europea (2019) *Causas del cambio climático | Acción por el Clima, Causas del Cambio Climático*. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_es (Accedido: 18 de octubre de 2020).