

Universidad  
Rey Juan Carlos

Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

**GRADO EN INGENIERÍA EN ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL**

**Curso Académico 2022/2023**

**Trabajo de Fin de Grado**

**“BIOGÁS Y BIOMETANO Y SU USO ESTRATÉGICO COMO  
FUENTE DE ENERGÍA”**

**Autor: MARÍA MARTÍN-ALBO MARTÍN**

**Directores: MARÍA ORFILA DEL HOYO**

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>RESUMEN</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. PNIIEC</b> .....	<b>6</b>
2.1.1	Descarbonización.....	7
2.1.2	Reducción de emisiones.....	7
2.1.3	Impulso a las renovables.....	7
2.1.4	Biogeneración.....	7
<b>2.2</b>	<b>Perspectivas a 2030</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Perspectivas a 2050</b> .....	<b>9</b>
<b>2.4</b>	<b>Situación de España frente al contexto europeo</b> .....	<b>9</b>
<b>2.5</b>	<b>Sector del biogás y biometano en España</b> .....	<b>11</b>
2.5.1	Plantas de biogás.....	11
2.5.2	Plantas de biometano.....	11
2.5.3	Qué son el biogás y el biometano y cómo se produce.....	12
	Cómo se produce el biogás (Procedencia y composición del biogás).....	13
<b>2.6</b>	<b>Qué es la biomasa y su clasificación</b> .....	<b>13</b>
2.6.1	Pretratamiento de la biomasa previo a la digestión anaerobia.....	14
2.6.1.1	Residuos SANDACH.....	14
2.6.1.2	Rendimientos de la biomasa.....	15
2.6.2	Tipos de biogás.....	16
2.6.3	Producción de biometano.....	16
2.6.4	Usos del biogás.....	18
2.6.4.1	Generación térmica.....	18
2.6.4.2	Cogeneración.....	18
2.6.4.3	Combustible para vehículos.....	19
<b>2.7</b>	<b>Análisis estratégico: biogás como elemento clave en la economía circular, el suministro y la transición energética</b> .....	<b>19</b>
2.7.1	Economía circular.....	19
2.7.2	Descarbonización.....	20
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>23</b>
<b>4.1</b>	<b>Factores a tener en cuenta</b> .....	<b>23</b>
<b>4.2</b>	<b>Potencial de las Comunidades Autónomas en España en función de su producción agrícola y ganadera</b> .....	<b>23</b>
4.2.1	Producción de estiércol en las Comunidades Autónomas.....	24
<b>4.3</b>	<b>Ubicación de la planta y contexto (Vic (Barcelona))</b> .....	<b>25</b>
4.3.1	Accesibilidad a la red eléctrica.....	26
<b>4.4</b>	<b>Detalles técnicos de una instalación de biogas</b> .....	<b>27</b>
4.4.1	Alimentación de la planta.....	28
4.4.2	Digestores de estiércol de vacuno y/o cerdo.....	28
4.4.3	Acondicionamiento y depuración.....	28
4.4.4	Inyección a red.....	29
<b>4.5</b>	<b>Fundamentos teóricos de una planta de biogás</b> .....	<b>29</b>



4.5.1	Valorización energética y proceso de digestión anaerobia.....	29
4.5.2	Proceso químico para la obtención del biogás por digestión anaerobia.....	30
4.5.3	Características de la codigestión.....	32
4.5.4	Características de los residuos agroindustriales para su uso en la co-digestión anaerobia.....	33
-	Relación sólidos totales-humedad.....	33
-	Sólidos volátiles y biodegradabilidad.....	34
-	Balance carbono-nitrógeno.....	34
-	Producción máxima de biogás frente producción real.....	35
-	Sustancias no deseables.....	35
-	Sustancias inhibidoras.....	35
4.5.5	Tipos de digestores anaerobios.....	36
-	Reactor de mezcla completa sin recirculación (RMC sin recirculación).....	36
-	Reactor de mezcla completa con recirculación.....	37
-	Digestor flujo-pistón.....	38
-	Digestor discontinuo.....	38
-	Reactor con retención de biomasa sin recirculación.....	39
-	Sistemas discontinuos.....	41
-	Otros sistemas.....	41
-	Sistema de dos etapas.....	42
-	Sistema de dos fases.....	42
4.5.6	Parámetros ambientales y operacionales de los reactores o digestores.....	42
4.5.7	Potenciales y rendimiento según el tipo de residuo y su gestión.....	44
4.5.8	Acondicionamiento del biogás y subproductos.....	44
4.5.9	Procedimientos para la purificación del biogás:.....	44
4.5.10	Gestión de los subproductos.....	46
<b>5</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>47</b>
<b>5.1</b>	<b>Estiércol usado en la planta.....</b>	<b>47</b>
5.1.1	Costes del estiércol.....	48
<b>5.2</b>	<b>Biogás generado por la planta.....</b>	<b>48</b>
<b>5.3</b>	<b>Mezcla homogénea y agua necesaria.....</b>	<b>48</b>
<b>5.4</b>	<b>Energía eléctrica generada y su facturación.....</b>	<b>49</b>
<b>5.5</b>	<b>Almacenamiento y biodigestor.....</b>	<b>49</b>
<b>5.6</b>	<b>Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.....</b>	<b>50</b>
<b>5.7</b>	<b>(Emisiones de CO<sub>2</sub> “equivalentes” al biogás).....</b>	<b>50</b>
<b>5.8</b>	<b>Cálculo rentabilidad de la planta.....</b>	<b>51</b>
5.8.1	Análisis de costes.....	51
5.8.2	Análisis de ingresos.....	53
5.8.3	Análisis de rentabilidad.....	53
<b>5.9</b>	<b>Análisis DAFO.....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>58</b>

## 1 RESUMEN

A mediados de los años 90 surgen las primeras alarmas que advierten de un calentamiento global. El Protocolo de Kyoto de Naciones Unidas de 1997 y el Consejo de la Unión Europea, ya en los años 2000, abordan esta preocupación internacional por el medioambiente lanzando una serie de medidas para paliar el problema. En España el PNIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030) sienta las bases para la evolución del modelo energético, donde las energías renovables cobran todo el protagonismo en aras a la descarbonización y la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Sus principios, entre los que destacan la economía circular, la reducción de gases de efecto invernadero o la transición energética, señalan al biogás como una fuente de energía estratégica. En la misma línea, la Hoja de Ruta de Biogás fija objetivos para su implantación desde 2022 a 2030 y su posterior desarrollo hasta 2050.

Frente a otros países europeos, España cuenta con menos plantas de biogás y dadas sus dimensiones geográficas y preponderancia del sector primario (en el que se encuentra la agricultura y la ganadería), muestra un gran potencial de crecimiento.

### **Pero, qué es el biogás.**

El biogás, que se compone principalmente de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), se obtiene principalmente de la biomasa tratada en procesos mecánicos, térmicos y químicos. Esta materia proviene de residuos ganaderos y agroindustriales, residuos de estaciones depuradoras y residuos domésticos que son procesados mediante digestión anaerobia en vertederos o reactores cerrados. Mediante la depuración del biogás se produce el biometano. Las aplicaciones del biogás como fuente de energía son múltiples (generación térmica, cogeneración, combustible vehicular).

Por otro lado, el biogás es un elemento clave de la economía circular que promueven las agendas medioambientales aprovechando residuos que, una vez procesados, se convierten en fertilizantes. Además, puede jugar un papel importante en la transición energética sustituyendo parte del gas natural y contribuyendo a la descarbonización.

### **Instalación de una planta de biogás**

Para tener una aproximación más prolija al biogás como fuente energética, y después de haber desgranado sus principios teóricos, se propone el levantamiento de una planta en Vic (Barcelona). Para ello se tienen en cuenta criterios logísticos, tanto para la obtención de biomasa como para la inyección de la energía generada, además del interés de la Administración (en la zona se da una sobre hidrogenación del terreno por exceso de estiércol y purines).

El montaje de la planta consta de un mezclador, un biodigestor y un almacén de biogás conectado a una turbina de generación eléctrica. Para ponerlo en funcionamiento se calcula, en base a datos oficiales, la producción de estiércol en Vic, la que se va a utilizar (8.286 kg/día) y su coste. Sabiendo la biomasa empleada se calcula la generación de biogás (0,3 m<sup>3</sup>/kg). Por otro lado, se realizan cálculos de la mezcla homogénea y el agua necesaria para la producción (1/3kg biomasa).

Sabiendo que, como indican documentos oficiales de la Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos, 1m<sup>3</sup> de biogás genera 2.8 kW de energía eléctrica, se calcula la producción de la planta que resulta ser 5.916,69 kW/día y en base al precio oficial del kW, la facturación que se obtiene (723.463 €/día). Por otro lado, se calculan las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas y las “equivalentes” al biogás. Finalmente, se hace un estudio económico con los costes directos e indirectos de la inversión, los gastos de personal, costes anuales y un análisis de ingresos y rentabilidad de 0 a 8 años calculando VAN (1.855.510 €M) y TIR (2%). En base a estos resultados, se analiza cómo cambia la viabilidad del proyecto en el caso de recibir la subvención aportada por el Gobierno en este tipo de desarrollos, obteniendo un TIR mucho más elevado (163%), y por consiguiente, un proyecto mucho más rentable.

Tras todo lo visto se señala al biogás como una fuente de energía estratégica. Responde perfectamente a los requerimientos del nuevo modelo energético europeo y español en el que la economía circular, con el reciclaje y valorización de residuos, y la descarbonización juegan un papel fundamental. España cuenta con una baja implantación de este tipo de plantas energéticas y su alto potencial de crecimiento redundando también en generación de empleo. Teniendo en cuenta factores logísticos, la ubicación de estas plantas debe plantearse cerca de industrias alimentarias y explotaciones agroganaderas de las que aprovecha sus residuos y a las que puede surtir de energía y fertilizantes, aunque con conexión a redes eléctricas y gas puede dar apoyo en suministros lejanos a estas. La industria química incluso puede aprovechar el biogás directamente para su producción.

Como contrapartida, se observa una difícil rentabilidad a corto y medio plazo. En la planta que se propone, a pesar de que el VAN es positivo, el TIR es muy bajo por lo que se hacen necesarias las ayudas y subvenciones de organismos oficiales.

## 2 INTRODUCCIÓN

Desde hace años la sociedad vive un cambio de modelo energético constante. El calentamiento global ha moldeado la política medioambiental del planeta dándole prioridad. La Convención Marco del Cambio Climático de las Naciones Unidas adoptó, ya a finales de 1997, el Protocolo de Kioto, por el que los países industrializados se comprometieron a limitar sus emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs y SF<sub>6</sub>) desde entonces a 2012. La Unión Europea fue la más ambiciosa, con un 8% de reducción y Estados Unidos con un 7%.

Más tarde, el Consejo de la Unión Europea aprobó en 2009 un paquete normativo sobre energía y cambio climático. Además, propuso para 2020 la reducción del consumo de energía hasta un 20% por debajo de los niveles previstos, la generación en dicho año de un 20% de la energía de fuentes renovables y la reducción de otro 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990.[1]

### 2.1 Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. PNIEC.

En 2019 el Gobierno de España, actuando en el contexto de protección medioambiental propiciado por los organismos internacionales, fija las bases para la modernización de la economía española, el liderazgo de España en las energías renovables, el desarrollo del medio rural y la mejora del medio

ambiente. Y todo basado en un modelo de economía sostenible y circular al que denomina Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC).

Este plan prevé la creación de hasta 364.000 empleos anuales a lo largo de la década, muchos de ellos basados en la implantación de energías renovables, que deben ocupar el 42% de la energía producida en el país. En el caso de la generación eléctrica, el porcentaje de renovables en 2030 debe llegar al 74%. Por otro lado, señala que la dependencia energética de España debe disminuir 15 puntos porcentuales, pasando del 74% actual al 59% en 2030. De esta manera España se protege de los vaivenes de los precios de la energía en un incierto mercado internacional alterado aún más por la Guerra de Rusia contra Ucrania. [2]

### **2.1.1 Descarbonización.**

El PNIEC vino a dibujar una hoja de ruta para esta década sujeta a la neutralidad de emisiones en 2050 basándose en un modelo energético conducente a la descarbonización del medioambiente. Para ello contempla la reducción del 21% de las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a 1990 (a finales de 2017 era 18 puntos porcentuales por encima de esa referencia). Por otro lado, asegura que con la implantación de un 74% de energías renovables en la generación eléctrica, la eficiencia energética mejorará casi un 40%. [2]

### **2.1.2 Reducción de emisiones**

En cuanto a la reducción de emisiones, el PNIEC se plantea pasar de los 340,2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (MtCO<sub>2</sub>-eq) emitidos en 2017 a 226 MtCO<sub>2</sub>-eq en 2030, lo que significa que dejará de emitirse una de cada tres toneladas. Según el plan del Gobierno de España, la generación eléctrica será la que más reduzca su nivel de emisiones, 44 MtCO<sub>2</sub>-eq entre 2021 y 2030. Le sigue el transporte, responsable en 2017 del 26% de las emisiones, que pasará de 28 MtCO<sub>2</sub>-eq entre 2021 y 2030. [2]

### **2.1.3 Impulso a las renovables**

Los objetivos del PNIEC no son alcanzables sin las energías renovables. En 2030, se prevé una potencia total instalada en el sector eléctrico de 157 GW, de los que 50 GW serán energía eólica; 37 GW solar fotovoltaica; 27 GW ciclos combinados de gas; 16 GW hidráulica; 8 GW bombeo; 7 GW solar termoeléctrica; y 3 GW nuclear, así como cantidades menores de otras tecnologías. El problema del almacenamiento, talón de Aquiles de las energías renovables, se espera resolver a través de las tecnologías de bombeo y baterías, con una potencia adicional de 6 GW, aportando una mayor capacidad de gestión a la generación.[2]

### **2.1.4 Biogeneración**

Todo lo comentado hasta ahora sirve de argumento para plantear la generación de energía, ya sea eléctrica o térmica, a través del uso de biomasa. Una planta de biogás cumple con todos los requisitos de las políticas medioambientales que se han marcado desde Naciones Unidas y sobre las que la Unión Europea quiere avanzar. España pretende ser un referente en esta materia conjugando la protección del medioambiente basada en fuentes energéticas limpias con la generación de empleo y la economía circular. En ésta, los residuos generados por la propia naturaleza, por la industria ganadera, por la

alimenticia o en núcleos urbanos y rurales se aprovechan como materia prima para generar la energía que estas industrias necesitan. La biogeneración de energía, además, es un proceso más o menos complejo que tiene ventajas asociadas como es el procesamiento de residuos generados por el hombre, por los animales o por la naturaleza. Su aprovechamiento elimina problemas como la nitrogenación excesiva de los pastos por el estiércol, o el peligro de incendios forestales por la acumulación de maleza. Y una vez generada la energía con estos residuos pueden volver a la industria en forma de fertilizantes.

## 2.2 Perspectivas a 2030

Como se ha mencionado anteriormente, tanto el biogás como el biometano son factores importantes para la descarbonización de la economía, tanto es así que son una de las prioridades para el consumo. Ambos gases renovables cumplen con objetivos planteados en distintos programas:

- DER II: este plan no establece objetivos directamente sobre el consumo de biogás, aunque sí fija un mínimo de 3,5% de contribución en el sector del transporte de biogás y biometano.
- PNIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima) 2021-2030 establece como objetivo un 42% de energías renovables para uso final y un 28% de renovables para el transporte mediante electrificación y uso de biocarburantes, donde entran ambos gases. El biogás en concreto se incluye en la consecución de una serie de objetivos marcados por el PNIEC entre los que destacan la incorporación de renovables en el sector industrial, biocombustibles para el transporte, promoción de gases renovables, planes de renovación tecnológicos existentes y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en sector agrícola, ganadero y en la gestión de residuos. [3]

Teniendo en cuenta los objetivos del PNIEC, en la Hoja de Ruta del Biogás se establecen como objetivos:

- Producción mínima de 10,41 TWh anuales de biogás en 2030 a partir de residuos agroindustriales, fracción orgánica de residuos locales y lodos de aguas residuales y estiércoles (esto supone casi cuadruplicar la producción de 2020).
- Parte del gas producido se transformará en biometano (mediante el *upgrading*) para el consumo de vehículos (recogida de basuras, etc.) y para inyección a red y distribución sustituyendo al gas natural de origen fósil.
- Que al menos el 1% del gas consumido a través de la red de gas natural sea biometano.
- Contribuirá a los objetivos para Transporte marcados por el PNIEC 2021-2030, donde al menos el 28% de energías que lo impulsa es renovable.
- Emplear biogás en la cogeneración para sustituir gases fósiles.

Uno de los efectos más importantes que tendrá el biogás en 2030 será evitar la emisión de 2,1 Mton de CO<sub>2</sub> equivalente. [3]

### 2.3 Perspectivas a 2050

El biogás cobra especial importancia de cara a 2050 por la “Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050”, donde su producción contribuye a la reducción del 53% de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Además, ayuda a la reducción de estos gases contaminantes en el sector de residuos y aguas residuales donde se reducen las emisiones y torno al 81%. [3]

### 2.4 Situación de España frente al contexto europeo

En el punto anterior se vio que la situación actual del biometano en España comparada con los niveles de producción de otros países del entorno es manifiestamente baja. En la Figura 1 se puede ver la producción de biogás y biometano de los países europeos en el año 2020. Tomando como referencia Suecia o Dinamarca, cuyo uso de biogás y biometano representa casi el 20% del consumo total del país, se aprecia que en España la generación de energía a través de estas fuentes alternativas tiene todavía un gran recorrido. [4]

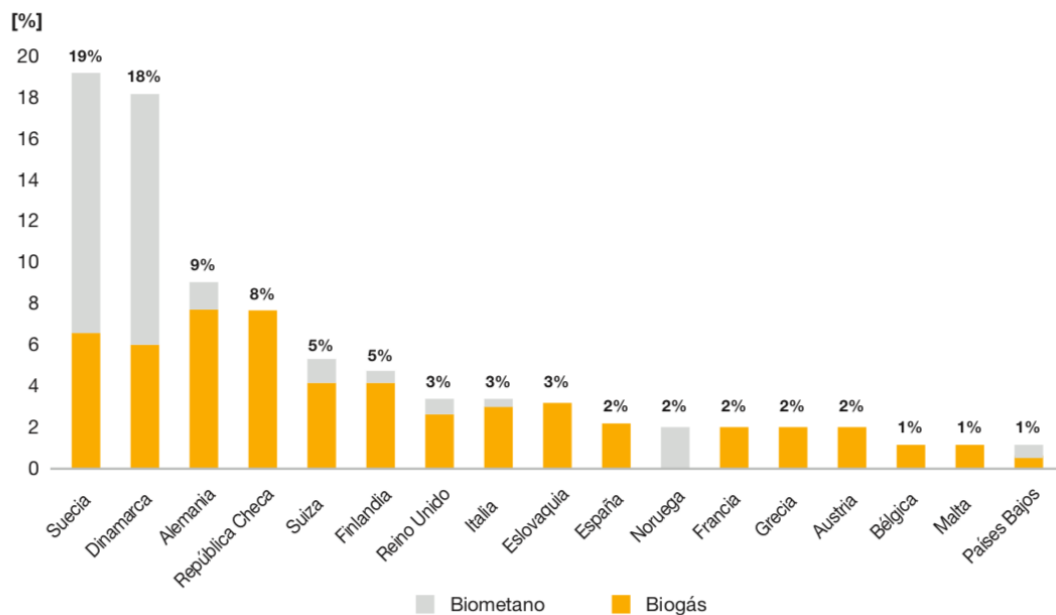


Figura 1 Producción de biogás y biometano en % relativa al consumo de gas en países europeos (Fuente: European Biogas Association (EBA) y análisis del PwC.

Sin embargo, comparando a nivel de producción (GWh) en los países europeos (Figura 2), España ocupa el 5º puesto, con una producción total de 8.174 GWh. [4]



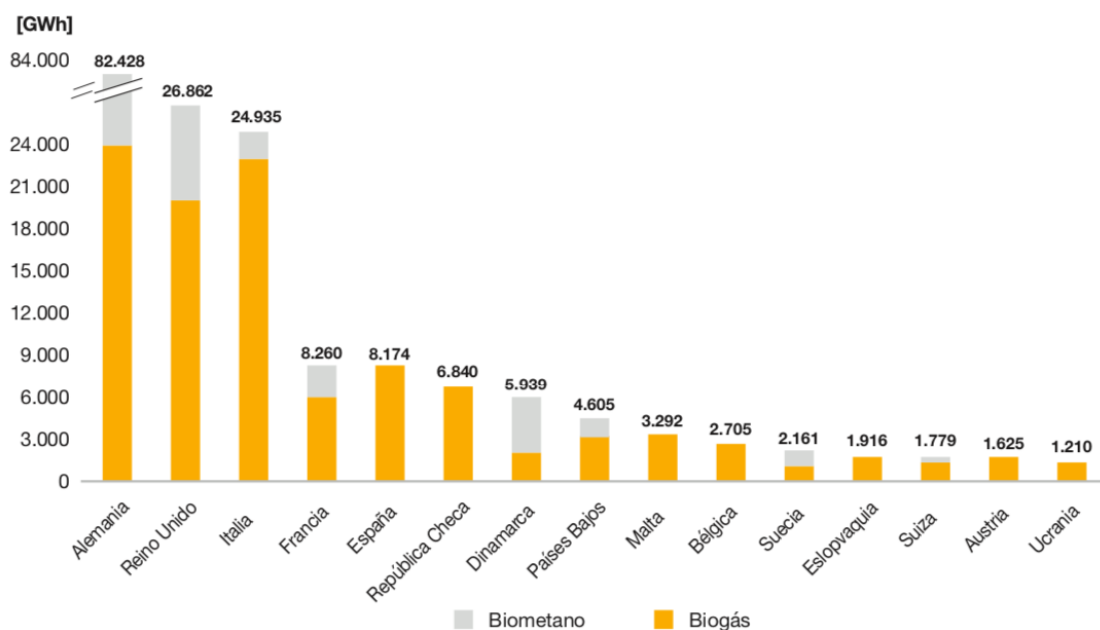


Figura 2 Producción de biogás y biometano (GWh) relativa al consumo total de gas en países europeos. (Fuente: European Biogas Association (EBA) y análisis de PwC.

Otro estudio (Tabla 1, abajo) pone de manifiesto el potencial de España en la producción energía (GW) basada en biomasa por sectores.

Residuos	GW	
	Inferior	Superior
Rango		
Ganadería	13.130	15.049
Agricultura	-	11.263
Industria agroalimentaria	3.431	3.431
Residuos municipales	2.524	3.594
Lodos de EDAR	1.023	1.023
<b>Total</b>	<b>20.108</b>	<b>34.360</b>

Tabla 1 Potencial del biogás en España según origen de los residuos, fuente: IDAE y análisis de PwC

Teniendo en cuenta que en 2021 la demanda de gas natural fue de 378.500 GWh, con el potencial estimado se podría haber cubierto entre el 5 y el 9% de esta demanda.

En 2020 la producción de biogás fue de 8.174 GWh y sólo se aprovecharon un 24-40% de los recursos. Considerando los residuos forestales y cultivos el potencial disponible podría aumentar al 35% de la demanda de gas natural.

Como conclusión, España cuenta todavía con un gran potencial, especialmente gracias a la ganadería y agricultura y los desechos que proporcionan. La Comisión Europea establece la fortaleza del sector agrícola y ganadero español como ventaja competitiva para el desarrollo de esta tecnología, poniendo como objetivo alcanzar los 120 TWh/año en 2050 y situándonos como tercer país europeo en cuanto a potencial. [4]

## 2.5 Sector del biogás y biometano en España

### 2.5.1 Plantas de biogás

La Hoja de Ruta del biogás señala que en 2022 había un total de 146 plantas de biogás, de las que 52 pertenecen al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación que las alimenta con residuos de su incumbencia. Este informe (Figura 3) indica que la mayor parte de las plantas se localizan en Lérida (9), Barcelona (6), Gerona (4). Contando con que Tarragona dispone de 2 plantas más, el total de las 4 provincias catalanas representa un 40% del cómputo nacional con 21[5]. A fecha de 2020 había 130 plantas que estaban en funcionamiento, 46 son abastecidas de residuos urbanos (35,66%), 34 de lodos de depuradoras de tratamiento de aguas (26,36%), 22 por administraciones de comercios y similares (17,05%), 14 de residuos generados en el sector industrial (10,85%) y 13 en sector agropecuario, más en concreto, purines y estiércol (10,08%). En cuanto al biometano, actualmente existen 6 plantas, pero se plantean como objetivo para 2024 hasta 64.. El Gobierno de España, por su parte, ha marcado el objetivo de que al menos el 1% del gas distribuido en España sea biometano en 2030. [3]

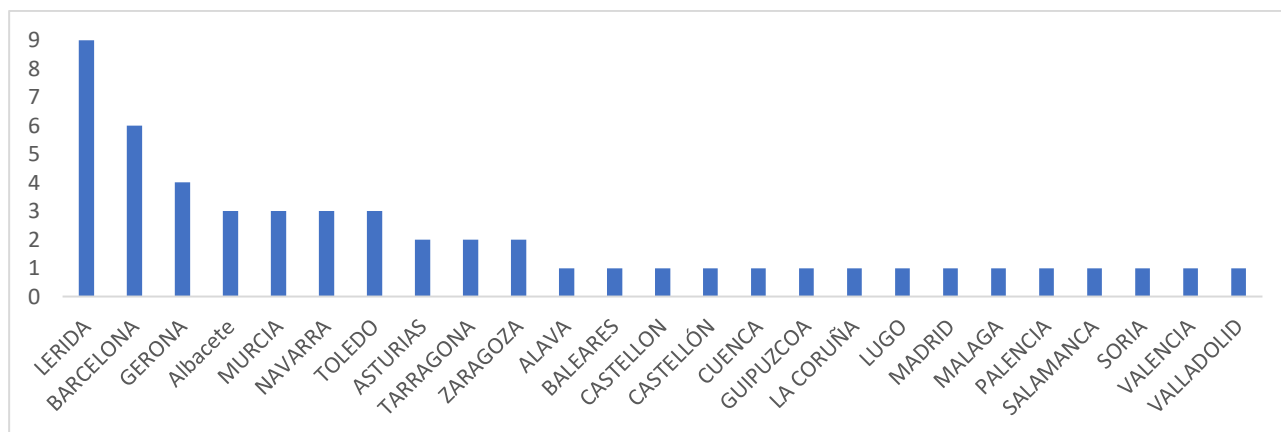


Figura 3 Número de plantas de biogás existentes por provincia en España.

De las 146 plantas de biogás 130 reportaron actividad en 2021. La producción estimada fue de 2,74 TWh, 2,45 TWh fueron consumidos en centrales de generación eléctrica, de los que 2,29 TWh fueron utilizados en generación eléctrica y el resto en generación térmica.

El Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO), en su Hoja de Ruta del Biogás, espera que la producción se multiplique por cuatro hasta 2030 [3]. Expertos en la materia confirman que España es el segundo mayor productor de residuos agrícolas de los países comunitarios y que tiene un gran potencial en esta tecnología, como ya ocurre en Francia, Italia o Alemania, que claramente nos superan en este aspecto. Por otro lado, Vente Bernal, científico en Repsol Tech Lab afirma que España tiene capacidad para 2.000 plantas, sin embargo, apenas tiene la décima parte, por lo que se necesitan más inversiones en esta tecnología [6]

### 2.5.2 Plantas de biometano

En octubre de 2022 había en España 8 plantas de biometano (Figura 4) y según datos de Gasnam otras 30 están en construcción, 14 en proyecto y 12 en estado de proyecto piloto que en 2024 (64 en

total) deben ser ya una realidad. Estas plantas generarán 2.077 Gwh/año, un 1.182% sobre la producción de 2022, cantidad muy inferior a la de Francia, que hoy en día genera 4.000 GWh/año. [7]



Figura 4 Ubicación de las 8 plantas de biometano existentes en España.

En cuanto a la situación de esta tecnología años anteriores, en el informe realizado por Naturgy en colaboración con la consultora PwC, la producción de biometano en 2020 en España fue de 95 GW, representando el 1,2% de la producción del gas nacional. [4]

### 2.5.3 Qué son el biogás y el biometano y cómo se produce

El biogás se compone principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) cuyas proporciones varían en función de la materia orgánica que lo genera.

El biogás se obtiene principalmente de los residuos ganaderos y agroindustriales, los residuos obtenidos de las EDAR, que son Estaciones Depuradoras, en especial de las de Aguas Residuales urbanas (EDARs) y residuos domésticos. Mediante la descomposición en ausencia de oxígeno de la materia orgánica de estos residuos (digestión anaerobia) se produce el biogás y este proceso se lleva a cabo en vertederos o reactores cerrados, técnicamente llamados digestores anaerobios.

à <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas>

Por otro lado, mediante la depuración del biogás generado en la digestión anaerobia se produce el biometano, aunque también puede ser producto del lavado de gas de síntesis generado en la gasificación de la biomasa, siendo también una fuente de energía renovable. [8]

Características del biogás: [9]

- Buen sustitutivo de energías fósiles, ya que es poco contaminante.
- Puede generar electricidad.
- De la depuración del biogás se puede obtener biometano, que es el sustituto del gas natural y neutro en carbono.
- Es clave en la generación de fertilizantes.
- Optimiza el uso de vertederos.
- Permite el aprovechamiento de residuos y su uso para energía limpia.

### *Cómo se produce el biogás (Procedencia y composición del biogás)*

Como ya se ha mencionado, el biogás se puede generar a partir de distintas fuentes. Estas pueden ser desechos biológicos, en concreto residuos agrícolas, cultivos energéticos, lodos de aguas residuales o incluso residuos tanto domésticos como industriales. Algunos de estos residuos son purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas [7]. Técnicamente al conjunto de estos residuos se le denomina biomasa. Mas a delante se detallan sus tipos y clasificación.

Mediante el proceso de digestión anaerobia las bacterias generan el biogás que, sin tratar, tiene la siguiente composición: en mayor parte, 50 a 75% de metano (CH<sub>4</sub>), en segundo lugar -de un 25% a 50%- se compone de (CO<sub>2</sub>) y el resto está compuesto por agua (H<sub>2</sub>O), oxígeno (O<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>) y ácido sulfhídrico (SH<sub>2</sub>). Para el uso de este biogás se eliminan tanto el agua como el ácido sulfhídrico y se usa para la producción conjunta de electricidad y calor (cogeneración, CHP).

Sin embargo, para poder inyectar el biogás en la red debe someterse a un proceso de depuración más exhaustivo, llamado “upgrading” donde se suprime el dióxido de carbono de forma que incrementa el porcentaje de metano alrededor de un 96% para que cumpla con los estándares de calidad que se detallan más adelante. A este compuesto con un porcentaje predominante de metano se le conoce como biometano. [8]

## **2.6 Qué es la biomasa y su clasificación**

La biomasa son aquellos residuos de materia orgánica que se pueden utilizar, entre otras cosas, para obtener biogás. En esta definición se incluyen restos de madera procedentes de bosques, cultivos, residuos de la industria agrícola y forestal, cultivos, además de residuos orgánicos municipales, así como de animales (estiércol) o biomasa marina. También recientes estudios confirman que las microalgas pueden llegar a ser una fuente de biomasa interesante. [10] (<https://cordis.europa.eu/article/id/423112-algae-biomass-unlocking-new-uses-as-food-feed-and-fuel/es>)

La biomasa es procesada en un biodigestor donde gracias a la actuación de las bacterias se descompone (de forma anaerobia) y se obtiene el biogás, que puede ser depurado para obtener el biometano como se ha explicado anteriormente.

De todos los mencionados anteriormente, el residuo más utilizado es la madera, ya sea en su forma original o como astillas o pellets. La biomasa se clasifica en 2 grupos: la biomasa natural y la residual. [11]

- La biomasa natural es aquella que se produce en terrenos no cultivados y sin intervenciones externas (del ser humano) y posteriormente es usada. La madera de la construcción sería un buen ejemplo.
- La biomasa residual es la consecuencia de procesos o el excedente de actividades humanas y es generada en núcleos urbanos e industrias. Se divide en dos subtipos:
  - 1.Cultivos energéticos (su única finalidad es producir biomasa para combustión).

2.Excedentes agrícolas o (aquellos que no fueron usados por animales ni personas y generan electricidad, como pueden ser huesos de animales o cáscaras de frutos secos).

El estudio “*Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion*” afirma que en la Unión Europea aproximadamente el 70% de las plantas de biogás utilizan sustratos agrícolas. En segundo lugar, se utilizan cultivos energéticos y por detrás los residuos orgánicos (como los RSU, Residuos Sólidos Urbanos). Por último, lodos de depuradora y estiércol. Este estudio realizado en 2021 señala que las carencias de legislación de recogida de residuos alimentarios frenan la explotación del biogás. El uso de biomasa para la valorización energética tiene una serie de ventajas como que está exenta de elementos que contaminan el proceso, como el azufre. También que mediante la incorporación de equipos de depuración se puede corregir la presencia de cloro o nitrógeno. [12]

### **2.6.1 Pretratamiento de la biomasa previo a la digestión anaerobia**

Con el fin de aumentar la biodegradabilidad del sustrato, aumentar la producción de biogás y disminuir el tiempo de retención, se aplican una serie de pretratamientos, que según la tecnología se clasifican en mecánicos, térmicos, químicos y biológicos [13].

- Mecánicos: reducen el tamaño de la partícula, aumentando la solubilidad (capacidad de una sustancia de disolverse en otra). Algunos de los métodos utilizados son la trituración, homogeneización a alta temperatura, etc.
- Térmicos: con los tratamientos térmicos se obtiene doble beneficio porque consigue facilitar la degradación de algunas moléculas y aumentar la solubilidad, pero también se puede higienizar la materia orgánica. Se emplean métodos como aplicar calor por conducción, uso de corrientes de vapor etc.
- Químicos: mediante la adición de sustancias químicas se rompen los enlaces de las moléculas menos degradables de forma que se facilita la digestión. Con estos también se puede ajustar el pH o aumentar la capacidad tampón de la sustancia (resistencia a la reducción del pH por adición de un ácido).
- Biológico: se degradan compuestos mediante bacterias o enzimas. Se utilizan procesos como el ensilado que conserva el material y aumenta la productividad del biogás.

En el caso de las plantas de biogás agroindustriales (como es el caso que se estudia más adelante), los métodos más utilizados son el mecánico (trituración), térmico (higienización y esterilización) y biológicos (ensilado) [13].

#### **2.6.1.1 Residuos SANDACH**

A continuación, se explica más detalladamente la clasificación de los residuos de subproductos animales, ya que en el caso propuesto más adelante, estos residuos serán de mayor importancia. Los residuos SANDACH son aquellos que engloba el marco regulatorio de los subproductos animales no destinados al consumo humano, así como los productos derivados de los mismos. Su gestión está regulada para que no generen riesgos para la salud humana, de animales ni al medio ambiente.

Estos residuos se dividen en 3 tipos dependiendo del nivel de riesgo que supone para la salud pública y salud animal. La categoría 1 engloba residuos no aptos para plantas de biogás ya que tienen sustancias contaminantes entre otras cosas. En la categoría 2 se incluyen aquellos que sí son aptos para plantas de biogás previo tratamiento, como pueden ser residuos que no superen la cantidad permitida de contaminantes, animales muertos en condiciones aptas o incluso estiércol [14]. Por último, en la categoría 3 están los residuos que son aptos para las plantas si antes se tratan mediante pasteurización e higienización.

En el caso de los estiércoles y purines, se consideran SANDACH y su aplicación queda excluida del ámbito de aplicación de la Ley 7/2022 y no precisa de autorización en materia de residuos, aunque sí que debe cumplir con el Código de Buenas Prácticas y depurar los residuos de la alta concentración de nitratos. Sin embargo, cuando los estiércoles o purines se tratan fuera del lugar donde se generan, como es el caso de una planta de biogás sí que precisan de autorización [13].

### 2.6.1.2 Rendimientos de la biomasa

El rendimiento a producción de biogás de la biomasa depende del origen de esta. Así, en la Figura 5 se muestra el contenido en metano en % de diferentes tipos de biomasa, mientras que en la Figura 6 se muestra la producción de biogás de las mismas [15].

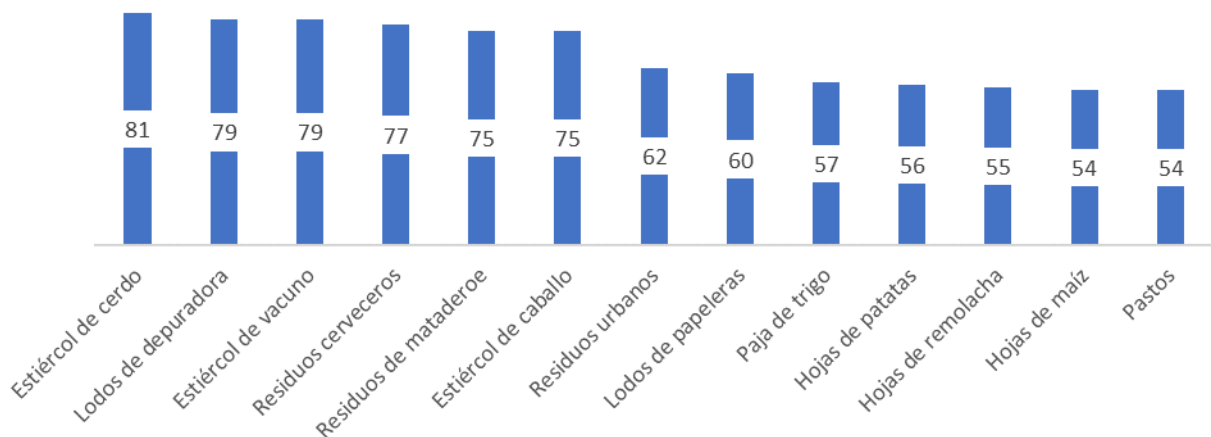


Figura 5 Contenido en metano (%) de diferentes residuos.

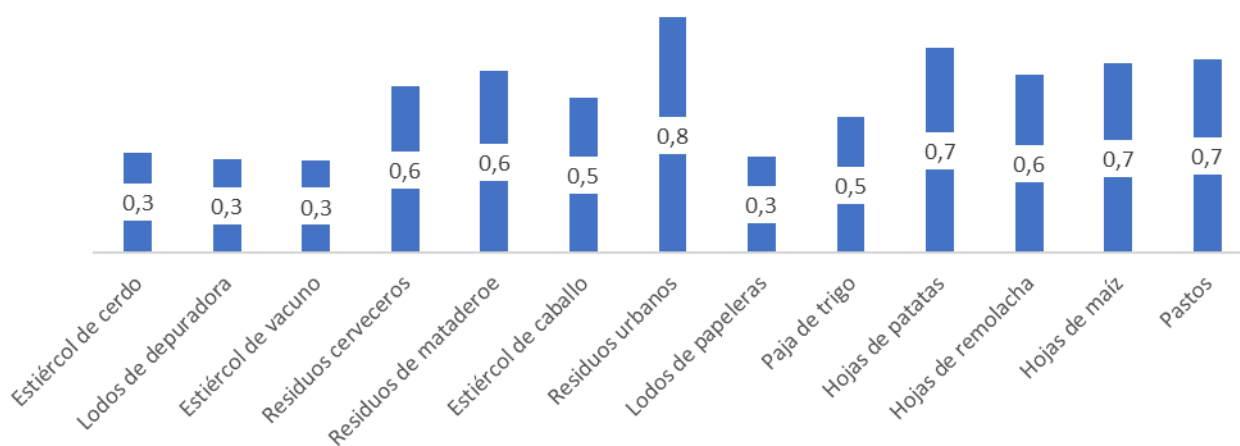


Figura 6 Producción de biogás en m³/kg SV.

Como se puede observar en la Figura 5, son los residuos de cerdo los que tienen un mayor contenido en metano, mientras que son los residuos urbanos los que proporcionan la mayor producción de biogás (Figura 6) [15].

### 2.6.2 Tipos de biogás

Dependiendo de la procedencia del biogás, y en consecuencia, de sus características, se distinguen 2 tipos: [13]

1. Biogás de vertedero: Se produce tras el sellado de los vertederos de residuos sólidos urbanos, que se componen de siloxanos, compuestos fluorados y clorados en distintas proporciones
2. Biogás de digestores: dependiendo del origen de la materia se divide en: biogás agroindustrial (residuos agrícolas, ganaderos y de la industria agraria), biogás FORSU (de la fracción degradable de los residuos sólidos urbanos) y biogás de depuradoras (digestión de los fangos primarios de plantas de tratamiento de aguas residuales).

El más noble de todos es el de los residuos agroindustriales, pero en su uso para la valorización energética es necesario depurarlo y reducir la concentración de sulfuro de hidrógeno.

### 2.6.3 Producción de biometano

Primero detallaremos cómo es la producción del componente principal de este gas, el metano (CH<sub>4</sub>). En sistemas anaerobios, como es la digestión llevada a cabo en este caso, la DQO o Demanda Química de Oxígeno (“parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible a ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida” [16]) se considera un parámetro conservativo. Es decir, el total de la DQO de entrada, que es la del influente, debe ser la misma que la de salida, siendo esta la del efluente y la del biogás.

Considerando biogás aquel formado principalmente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> y teniendo en cuenta que la DQO del CO<sub>2</sub> es nula, la DQO del biogás mencionada anteriormente, corresponde a la DQO del metano obtenido. Explicado en la Figura 7, cuyas condiciones se recogen de forma resumida en la Figura 8:

$$DQO_{entrada} \rightarrow DQO_{salida}$$

$$DQO_{entrada} \rightarrow DQO_{CH_4} + DQO_{CO_2}$$

$$DQO_{entrada} \rightarrow DQO_{CH_4}$$

Figura 7 Resumen del balance de la DQO durante la digestión anaerobia, elaboración propia

	Condiciones estándar	Condiciones normales
1 kg de DQO eliminado	Presión 1 atmósfera y 0°C	1 atmósfera y 25°C
	0,35 m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub>	0,38 m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub>

Figura 8 Equivalencias de valores de DQO dependiendo de las condiciones de la reacción, elaboración propia

Esto supone que, en condiciones estándar, presión de 1 atmósfera y 0°C, se tienen 1,857 kg de DQO/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ó 0,35 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por kg de DQO eliminado. El equivalente en condiciones normales, de presión a 1 atmósfera y 25°C sería de 0,38 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>. El poder calorífico (“cantidad de energía por unidad de masa o de volumen de materia que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación [17] del metano corresponde a 3,5 kWh/kg DQO eliminada en unidades de energía primaria (“energía primaria es aquella disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada. Si no es utilizable debe ser transformada en electricidad o calor”

Esto supone una ventaja de los sistemas anaerobios contra los aerobios en el tratamiento de residuos orgánicos y aguas residuales, en los que el consumo de energía para transferir oxígeno es de alrededor de 1kWh/kg O<sub>2</sub> consumido. La acumulación de gases como H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S u otros en el reactor, junto a la posibilidad de que la DQO medida no haga referencia solamente al carbono oxidable, hace que pueda haber variaciones en los valores mencionados. Se adjunta como ejemplo un proceso en el que el total de la DQO inicial es conservado en el proceso de la digestión anaerobia, siendo un 10% de la DQO no biodegradable y el 90% de la DQO inicial queda transformado en CH<sub>4</sub>:

Para obtener este gas, al biometano se le somete a un proceso de limpieza y otro de enriquecimiento también llamado “upgrading”. En este se separan el H<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub>, siloxanos, etc., de forma que el porcentaje de metano aumenta hasta prácticamente el 100% y su composición es similar a la del gas natural de origen fósil.

En este proceso pueden emplearse distintas tecnologías con distintas capacidades y distintos costes. Entre ellas se encuentran la absorción por agua, absorción química, Pressure Swing Adsorption (PSA), membranas, criogenización y demás tecnologías que se explicarán más adelante.

En términos económicos, el inconveniente del biogás es su coste de producción, lo que se ve reflejado en su precio de venta. En 2022, dada a la inflación de precios, el gas natural era más caro que el biometano. Expertos afirman que, una vez vuelta la normalidad, serán necesarias subvenciones e incentivos para impulsar la producción y el consumo del biometano. Por otra parte, será necesaria la



optimización del trabajo conjunto de ganaderos, depuradoras y vertederos para reducir costes de logística, traslado y gestión [6]

#### 2.6.4 Usos del biogás

El biogás que se obtiene como producto de la digestión anaerobia se puede utilizar en distintas aplicaciones como pueden ser: [9]

- Calderas de generación de calor o electricidad.
- Motores o turbinas para generar electricidad.
- Pilas de combustible, si se retira el  $H_2S$  y otros contaminantes.
- Inyectar a red de transporte de gas natural siempre y cuando haya sido purificado y previa incorporación de aditivos necesarios.
- Síntesis de metanol o gas natural licuado.
- Combustible para automoción.

La limpieza del biogás dependerá del uso final que se le vaya a dar como combustible, ya que contiene compuestos como el sulfuro de hidrógeno anteriormente mencionado, agua, halogenados, etc.

Atendiendo a los usos anteriores, se resumen los tratamientos requeridos: [9]

- Producción térmica en caldera: precisa de eliminar el agua y en mayor medida la eliminación de  $H_2S$ .
- Producción de electricidad en motores: es necesaria la eliminación de agua,  $CO_2$  y  $H_2S$ .
- Combustible para vehículos o turbinas, gas para calefacción y pilas de combustible: es de elevada importancia la eliminación de agua,  $CO_2$  y  $H_2S$ .

El uso del biogás como fuente de energía hace sinergias con la instalación de un sistema de cogeneración, calderas y turbinas que permita ahorrar agua caliente y electricidad y con conexión a red para la venta de energía.

El biogás presenta tres aplicaciones principales: la producción de calor o vapor, generación de electricidad y su uso como combustible para vehículos. A continuación se explican más detenidamente cada una de ellas. [9]

##### 2.6.4.1 Generación térmica

El uso más simple es el de la generación de energía térmica, es decir, calor. Sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar suficiente energía para cocinar y calentar agua, aunque también se usa para generar iluminación. Los quemadores de gas pueden ser adaptados al uso del biogás ajustando la relación aire-gas. Alcanzando una presión de gas de 25 mbar y controlando que los niveles de  $H_2S$  no sobrepasen los 100 ppm se alcanza un punto de rocío de  $150^{\circ}C$  [13].

##### 2.6.4.2 Cogeneración

Cuando se trata de sistemas combinados de calor y electricidad (cogeneración) se produce calor y la electricidad es una consecuencia secundaria. También puede suceder a la inversa en algunos sistemas. Independientemente de cuál fuese el objetivo de la instalación, cualquiera de los dos procesos es más eficiente que si se usase el biogás con el único fin de generar calor o energía. Las microturbinas (hasta 100 kW) y grandes turbinas (mayores de 100 kW) se pueden usar tanto para

producir calor como energía con una eficacia similar a los motores de combustión interna que precisan de menos de 100 ppm de H<sub>2</sub>S y remoción de agua [13]. En estos sistemas el rendimiento de la energía eléctrica ronda el 35 al 40% y de energía térmica del 30 al 40%

Las celdas de combustible se consideran las plantas de energía a pequeña escala del futuro para la producción de electricidad y calor con una eficiencia superior al 60% y bajas emisiones.

#### *2.6.4.3 Combustible para vehículos*

Anteriormente se menciona que el uso más simple del biogás es el de la generación térmica, pero el más usado es el del biogás como combustible vehicular [13]. El transporte no ha tenido un descenso tan gradual en la emisión de gases de efecto invernadero como sí han tenido otros sectores. Este sigue estando dominado por el gasóleo fósil y el diésel especialmente en vehículos pesados. Además, en el transporte marítimo se recurre al fuelóleo, que es más barato que otros combustibles, pero genera más emisiones [20]. En los vehículos acondicionados para funcionar con gas natural, con la pertinente adaptación, se puede usar biogás en sustitución a este. Estos vehículos son equipados con un tanque de gas, un sistema de suministro y un sistema de gasolina normal. Es viable su uso en todo tipo de motores (gasolina o diésel). El gas tiene un octanaje de 100-110 (el octanaje es la unidad en que se expresa el poder antidetonante de una gasolina o de otros carburantes), por lo que es adecuado en motores de alta relación de compresión, aunque su velocidad de encendido sea baja. Sin embargo, cuenta con problemas como que el gas debe ser almacenado a alta presión para permitir una autonomía razonable, lo que implica que debe ser purificado previa compresión. Además, la conversión de los motores es costosa y la red de abastecimiento es escasa [21]

Conviene destacar que a la hora de producir biogás para motores de combustión, cuando los niveles de H<sub>2</sub>S superan las 200 ppm, el biogás debe ser sometido a un proceso de acondicionamiento para ser usado como combustible, lo que se debe tener en consideración como costes de pretratamiento, como es el caso de los estiércoles y purines [13]

## **2.7 Análisis estratégico: biogás como elemento clave en la economía circular, el suministro y la transición energética**

### **2.7.1 Economía circular**

La producción de biogás es en sí un proceso que entra dentro del enfoque de la economía circular, ya que para obtenerlo se deben degradar residuos orgánicos.

La economía circular es un modelo económico basado en el uso de desechos y residuos industriales y naturales ya disponibles evitando que se acumulen. Se basa en la reutilización y reciclaje que mediante la valorización y transformación de la materia orgánica, produce combustible energético. Se aprovechan los residuos naturales y los que no pueden ser utilizados son eliminados.

Como se ha mencionado anteriormente, uno de las materias más utilizadas en la valorización energética para obtener biogás, es la proveniente de la industria alimentaria. Es por esto que la generación de biogás y su retorno como fuente de energía es un claro ejemplo de la economía circular en la industria alimentaria [22]

Esta industria, además, pertenece a un sector en continuo cambio y adaptación de infraestructuras y sistemas de producción para poder adaptarse a las normativas que luchan por el cambio climático [22]. Por otro lado, el uso de energías renovables como parte de la economía circular en la industria alimentaria tiene otros beneficios como pueden ser la mejora de la imagen ante los clientes y la sociedad, el desarrollo de una tecnología más sostenible, mayor aprovechamiento de los recursos y de los residuos generados y puesta en marcha de distintas líneas de negocio como la comercialización de los residuos generados para la creación de biocombustibles. Estos pueden ir destinados a uso propio de las empresas o venderlos a terceros [22].

### 2.7.2 Descarbonización

El uso de gases renovables, en concreto el biogás y su derivado, el biometano, es clave para lograr los objetivos fijados por la Unión Europea sobre la descarbonización mencionados anteriormente. Esta fuente de energía permite mejorar la calidad del aire, así como la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El biogás cobra especial importancia en la gestión de residuos y la economía circular porque la mayor parte de los procesos llevan implícito la producción de desechos orgánicos biodegradables, como son los lodos de las depuraciones de aguas residuales o residuos de la industria alimentaria, entre otros. La gestión y el tratamiento de estos residuos es imprescindible para preservar el medioambiente y el biogás es una gran solución a este problema, porque gracias a la valorización energética de estos residuos se obtiene energía y mejora el ciclo de vida de los procesos.

El impacto de estos recursos energéticos es beneficioso para el medioambiente y para la economía de los países, ya que el sistema energético es más fiable y flexible. Además, se consigue mayor independencia de fuentes de energía exterior y la descarbonización de sectores como la agricultura, ganadería o el transporte (especial mención al transporte pesado) y de las industrias que son grandes consumidoras de energías, también llamadas electrointensivas.

Por estos motivos la Unión Europea establece como objetivo para 2030 la producción de 35.000 millones de m<sup>3</sup> de biometano dentro del plan REPowerEU, que reducirían al menos 155.000 millones de m<sup>3</sup> de gases fósiles [3].

La *Hoja de Ruta del Biogás* en España plantea superar los 10,4 TWh en 2030 (objetivo establecido por el PNIEC 201-2030), lo que significa multiplicar la producción por 3,8 para evitar la emisión de 2,1 MtCO<sub>2</sub> equivalente al año. Entre estos objetivos también se encuentra que el consumo de biometano sea al menos el 1% del gas consumido a través de la red de gas natural.

Distintos informes apuntaban a que el potencial actual disponible era cercano al 34 TWh/año, lo que sería 3 veces más que el objetivo fijado por el PNIEC, aunque estudios posteriormente lo incrementaron a 137 TWh/año (multiplicando por 10 el objetivo fijado por el PNIEC) [3].

#### Transición energética

Todo lo visto hasta ahora corrobora que el biogás es estratégico como fuente de energía. Ya son muchos los países que se centran en el desarrollo de esta tecnología, incluida Alemania. En el contexto

actual de crisis energética y necesidad de garantizar el suministro, “*el biogás y el biometano son palancas fundamentales en la descarbonización de la economía española*”, según afirman textos publicados por la Fundación Naturgy en colaboración con PwC y CIEMAT [4].

Otros estudios afirman que desarrollando el máximo potencial del biogás se podría haber sustituido hasta el 32% de la demanda de gas natural de 2021, disminuyendo las emisiones asociadas de un 20 a un 56% (Figura 9). En el caso de explotar el potencial mínimo del IDAE mencionado anteriormente, la huella de carbono habría disminuido de un 3 a un 5% de las emisiones de 2019 y del 4 al 6% de las de 2020.

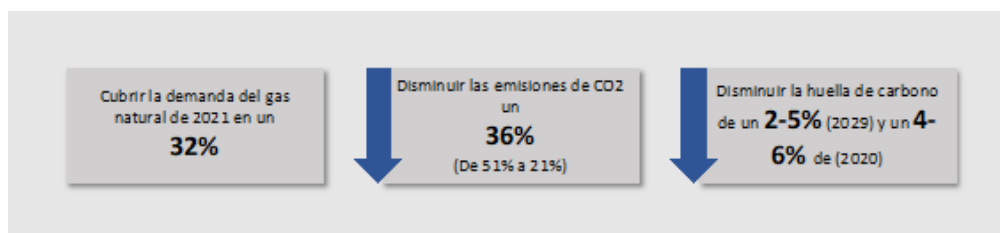


Figura 9 Objetivos del biogás marcados por la Hoja de Ruta del Biogás.

Si bien es cierto que la redacción de la Hoja de Ruta del Biogás para fomentar su desarrollo es un aspecto favorable, los objetivos marcados parecen poco ambiciosos, según señala el artículo de Retama, Revista (Revista Técnica de Medioambiente), que indica que son bajos respecto al potencial actual de su producción en España.

Como ya se ha dicho, la cuota de uso de biometano sobre el gas natural consumido en red es del 1%, mientras que en países como Alemania es del 20%. El apoyo institucional beneficiaría a sectores como la agricultura y la ganadería, los transportes, especialmente el pesado, o el sector residencial, ya que el biogás podría haber sustituido el 32% de la demanda de gas natural de 2021, reduciendo el impacto de los gases de efecto invernadero entorno al 20-56%.

Son muchas las barreras que a día de hoy siguen vigentes por parece primordial aplicar las medidas correspondientes para permitir el desarrollo de estos gases renovables, como pueden ser las que recoge la citada revista RETAMA: Establecer un objetivo de penetración de gases renovables en el mix nacional, aplicar garantías de origen y organismos reguladores para las aplicaciones de estos gases y que financien los costes de inyección y compensen los derechos de emisión, simplificación y homogeneización de procedimientos administrativos para la construcción de plantas. Y por último, la eliminación de barreras sociales y fomentar la divulgación de información en esta materia para luchar contra el desconocimiento [7]

#### Cadena de valor

El biogás, y su derivado depurado, el biometano pueden obtenerse por distintas vías, como pueden ser materias primas degradables, lodos de depuradoras u otros residuos. En este proceso, el valor lo aporta el hecho de que se utilizan residuos, lo que reduce los gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Y si se produce una gestión múltiple de residuos, la cogestión, se minimiza el impacto ambiental lográndose un proceso todavía más eficiente. En este se dan dos cuestiones especialmente

importantes: asegurar un suministro continuo y estable y un buen uso al digestato generado. Este digestato se considera residuo y debe atenderse a la Ley 7/2022 de residuos [23]. El reglamento 2019/1009 señala que se puede usar como fertilizante y su uso se rige por el RD 47/2022. En el diagrama mostrado en la Figura 10 se explica más detalladamente el proceso.

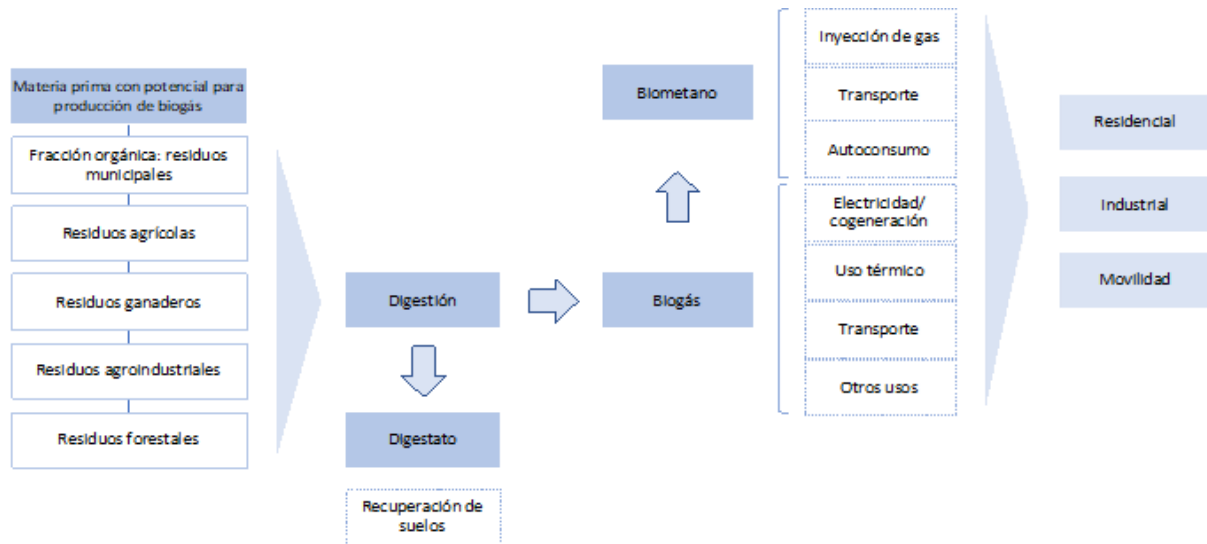


Figura 10 Esquema del proceso para la obtención de biogás y biometano y sus usos finales.

En el proceso de *upgrading* (depuración para obtener el biometano), se puede recoger el  $\text{CO}_2\text{eq}$  generado, y una vez tratado puede ser usado para procesos de refrigeración, por ejemplo, y si se consigue la homologación, puede ser usado incluso en la industria alimentaria. El calor y la energía generada pueden ser también aprovechados como base para tecnologías como bombas de calor, District Heating, etc,

En resumen, la cadena de valor del biogás es muy compleja, ya que este producto puede ser usado directamente o depurado para obtener biometano e inyectarlo a red o usarlo para generar biocombustible. Estas posibilidades hacen que se multipliquen los actores involucrados y el interés que tienen en esta tecnología aumentando su cadena de valor.

### 3 OBJETIVOS.

El principal objetivo de este proyecto es el análisis del uso del biogás y biometano como fuente de energía bajo criterios estratégicos.

Para ello se muestra una visión del panorama medioambiental y energético desde distintos ángulos. Se analiza la preocupación por el cambio climático mostrado desde instituciones internacionales y nacionales. Se revisan las directrices políticas que fomentan las energías limpias, la sostenibilidad y la economía circular. Se hace una aproximación a la legislación internacional y nacional que rige en la materia. Y, centrándose en España, se estudian las fuentes de biomasa y los problemas que generan

(nitrogenación del terreno, por ejemplo). Todo ello con el objetivo de dejar al descubierto las bases que dan lugar a la política estratégica del uso de energías verdes en la que el biogás supone una respuesta muy adecuada. Una vez llegados a esta conclusión, se estudia el principio de funcionamiento de esta tecnología y los elementos que componen una planta de biogás.

Por último, se plantea la instalación de una planta de biogás estudiando la idoneidad de su ubicación y se analiza si el proyecto es viable económicamente.

Una vez sopesados los parámetros mencionados se podrá determinar, finalmente, si el biogás es una fuente estratégica de energía.

## 4 METODOLOGÍA

Una vez decidida la instalación de una planta de biogás, se procede a realizar un estudio de la idoneidad del territorio para su ubicación.

### 4.1 Factores a tener en cuenta

Antes de plantearse la instalación de una planta de biogás, se debe hacer un estudio de viabilidad basado en los siguientes factores:

- Disponibilidad de materia prima. El suministro debe ser constante y garantizar que provenga de materia orgánica. Este es un factor decisivo.
- Proximidad a los usuarios. El transporte del biogás supone un coste elevado. La planta debe situarse cerca del consumidor final (red eléctrica) o de la planta que vaya a tratar el digestato producido (fertilizante...). Estas pueden ser empresas energéticas, industrias o comunidades locales.
- Normativa e incentivos económicos. Las instituciones locales pueden ofrecer ayudas y subvenciones para promover el desarrollo de las plantas (subvenciones, créditos fiscales o incentivos financieros).
- Consideraciones medioambientales y sociales. Se debe tener en cuenta el impacto sobre el medioambiente y terrenos habitados de las proximidades, ya que las plantas pueden influir en la calidad del aire, niveles de ruido e impacto sobre la fauna del terreno.
- Además, se debe tener acceso a infraestructuras de electricidad, agua y tuberías de gas natural.

### 4.2 Potencial de las Comunidades Autónomas en España en función de su producción agrícola y ganadera

De las 17 Comunidades Autónomas de España, 5 son las que han mostrado tener un gran potencial para la implantación de una planta de biogás en España [24].

1. Cataluña: Cuenta con gran cantidad de explotaciones agrícolas y ganaderas, por lo que genera gran cantidad de residuos orgánicos.

2. Andalucía: Debido a su clima cálido y seco esta región es ideal para la producción de biomasa a partir de residuos agrícolas y ganaderos.
3. Comunidad Valenciana: Gracias a su gran actividad turística y agrícola cuenta con muchas plantas de tratamientos de residuos.
4. Castilla y León: Tiene gran cantidad de explotaciones ganaderas y genera gran cantidad de residuos orgánicos.
5. Galicia: La actividad agrícola y pesquera es muy importante, genera muchos residuos y dispone de gran cantidad de plantas para su tratamiento.

#### 4.2.1 Producción de estiércol en las Comunidades Autónomas

A la hora de analizar el tipo de planta de biogás del proyecto un factor muy importante es la fuente de materia prima más abundante en España. En el país se generan más residuos vegetales que animales. De estos, los más adecuados para el tratamiento son los restos de cultivos (maíz, trigo, arroz y remolacha, entre otros), de poda (árboles y arbustos), de zonas ajardinadas (hojas, ramas etc.), o de la industria alimentaria (frutas y verduras). Sin embargo, en este proyecto se plantea la instalación de una planta alimentada por residuos orgánicos de origen animal, en concreto estiércol, ya que su generación en grandes cantidades puede resultar altamente contaminante para el terreno. [25].

A continuación, en la Figura 11 se muestran las toneladas de estiércol producido por cada comunidad autónoma, mientras que en la Figura 12 se puede ver el número de explotaciones ganaderas existentes en cada comunidad. Estos datos, ofrecidos por el Instituto Nacional de Estadística (INE) sobre el último censo agrario registrado que data del año 2020 [26], permiten analizar dónde se concentran la mayor producción de estiércol por superficie además de la ubicación de la mayor cantidad de plantas de explotación.

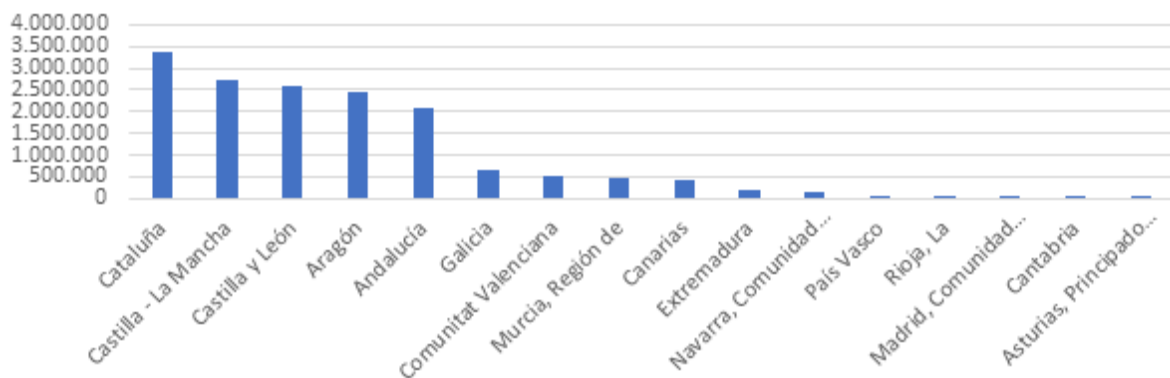


Figura 11 Toneladas de estiércol producido por Comunidad Autónoma.

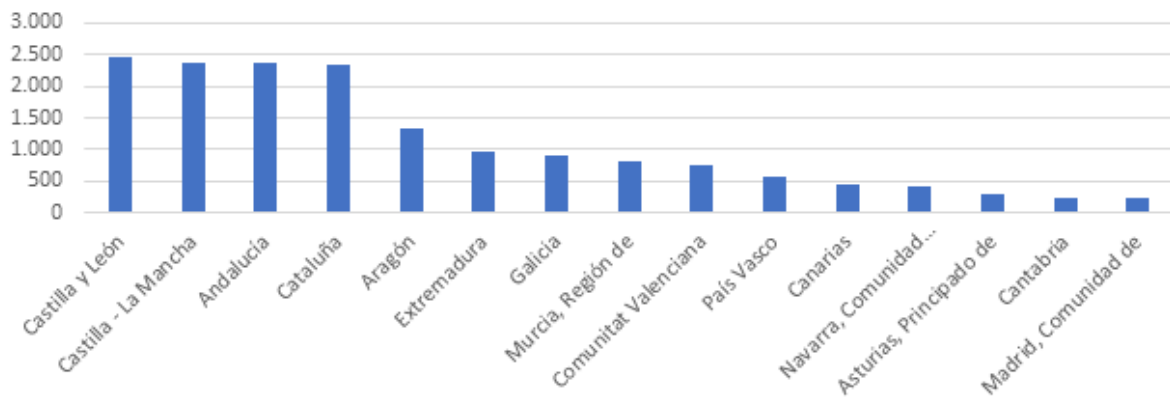


Figura 12 Número de explotaciones ganaderas por Comunidad Autónoma.

Analizando las Figuras 11 y 12 se puede observar que la Comunidad Autónoma de Cataluña es la mejor para este tipo de instalaciones dado que es la que presenta la mayor producción de estiércol y el mayor número de explotaciones ganaderas.

#### 4.3 Ubicación de la planta y contexto (Vic (Barcelona))

Como conclusión, en el proyecto se elige Cataluña como ubicación estratégica para instalar la planta de producción de biogás y será alimentada de residuos orgánicos animales (estiércol de procedencia vacuna y porcina). En esta comunidad autónoma se registraron un total de 3.380.457,06 ton de este elemento y 2.348 granjas de explotación ganadera [26]. Actualmente, en Cataluña hay 20 instalaciones de biogás de las cuales 4 se nutren de residuos municipales y las 16 restantes de purines y otro tipo de sustratos. Viendo el potencial de desarrollo de esta fuente de energía, se está desarrollando un plan para poder aprovechar la cantidad de purines y recursos de origen biológico que genera la industria alimentaria [27].

En 2022 se creó un plan en Cataluña con el objetivo de generar 1,1 TWh/año de biogás en 2030 y estima que serán necesarias alrededor de 90 plantas de generación y aprovechamiento de biogás [28]. Teniendo en cuenta estos parámetros, la elección de la ubicación en esta comunidad autónoma de una planta de biogás es altamente estratégica.

Más en concreto, se plantea la instalación de la planta en el municipio Vic, en la comarca de Osona, al norte de la provincia de Barcelona y sur de la de Gerona. En esta zona hay una gran generación de residuos orgánicos ganaderos durante todo el año de los que sólo el 50% pueden ser usados con fines fertilizantes para no sobre-nitrogenar la tierra. Actualmente disponen en la zona de dos plantas donde generan electricidad y energía térmica mediante combustión, aunque debido a las medidas que el Gobierno pondrá en vigor, estas acabarán siendo desmanteladas [29].

Como datos de interés cabe destacar que el municipio de Vic en el año 2022 tenía una población de 47.545 personas, 30,58 km<sup>2</sup> y una altitud de 484 m. La densidad de habitantes era de 1.554,8 hab/m<sup>2</sup> [30].

Se estudia el consumo eléctrico de la zona para evaluar la colocación de una planta de biogás que podría suministrar electricidad a parte del municipio. Esta instalación será alimentada a partir de



estiércol de vacuno, ya que se detecta un grave problema en la gestión del excedente de este residuo en el municipio. El consumo general (medido en GW) a fecha de 2020 fue de un total de 247,7 GW, los que se distribuyen de la siguiente manera en los distintos sectores que quedan resumidos en la Tabla 2 [31]:

Construcción y obras públicas	Industrial	Primario	Terciario	Usos domésticos	Total general
0,8	100,5	1,1	87,1	58,1	247,7

Tabla 2 Consumo en GW por sectores en el municipio de Vic.

Otro aspecto importante para el diseño de la planta es la evolución del consumo energético en los últimos años. Así, en la Figura 13 se muestra dicha evolución desde el 2013 hasta el año 2020 [31].

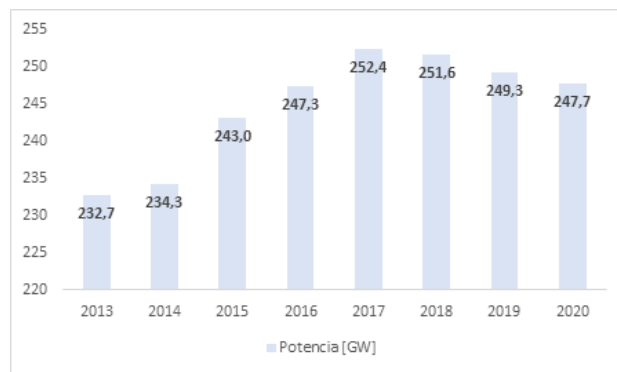


Figura 13 Evolución del consumo anual de energía en GW en el municipio de Vic.

#### 4.3.1 Accesibilidad a la red eléctrica

Ya que el proyecto se basa en el planteamiento general de una instalación de biomasa que suministre de energía a parte de la población del municipio de Vic, es esencial que la planta tenga acceso a inyección en la red eléctrica. Según el mapa de la REE (Red Eléctrica Española), el municipio de Vic tiene conexión mediante cables de 400 kV (rojos) y 220 (verdes) actualmente dando servicio a diferentes localidades (indicadas por el punto) (Figura 14) [32].

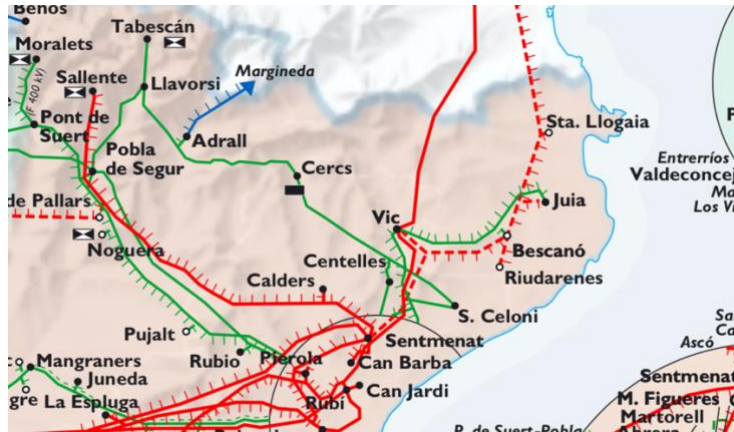


Figura 14 Mapa de la Red Eléctrica Española en la zona objeto de estudio.

#### 4.4 Detalles técnicos de una instalación de biogás

En cuanto a la planta, a continuación se explica de forma somera cómo sería su funcionamiento.

Todas las plantas de biogás tienen la misma distribución: Un receptor, los biodigestores o reactores, estructuras de almacenamiento y equipos para generar energía [33]:

- Como su nombre indica, **el receptor** es aquel encargado de recibir la materia orgánica que va a ser usada como sustrato, en este caso el estiércol mencionado.
- A continuación, el estiércol pasa a los **biodigestores** donde tiene lugar la digestión anaerobia y se produce el biogás como resultado de este proceso.
- Después este biogás pasa a ser tratado en las **estructuras de almacenamiento** para asegurarse así de que cumpla con las medidas de calidad exigidas.
- Por último, los **equipos de generación de energía** lo transforman en energía térmica o eléctrica, que es nuestro caso.

En la Figura 15 se muestra, a modo ilustrativo, un esquema del proceso.

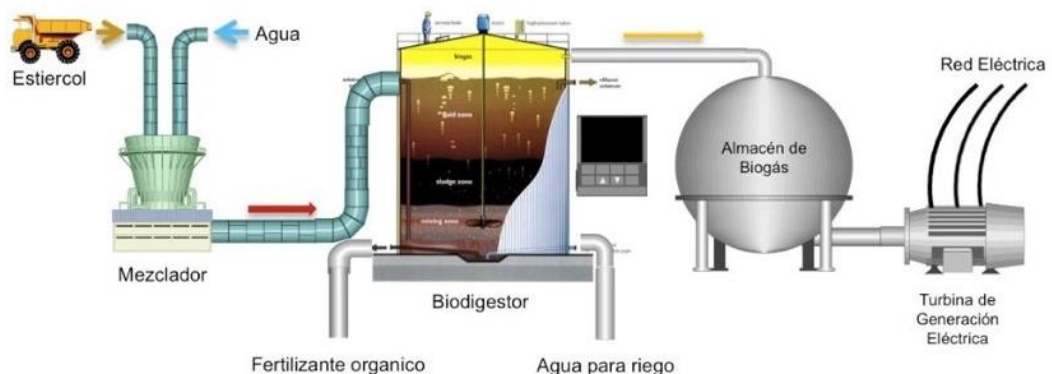


Figura 15 Esquema de una planta de producción de biogás y generación de electricidad.

El proceso comienza con el calentamiento de los residuos en un intercambiador tubular y se añaden al fermentador donde se mantiene una temperatura de aproximadamente 40°C para facilitar que la acción

de las bacterias genere metano. Tras este proceso, que suele tardar aproximadamente 90 días, se obtiene un gas compuesto en mayor parte por metano y dióxido de carbono.

Después de dos meses en el fermentador, el gas es conducido por el compresor donde es preparado para la combustión. El excedente que permanece en el digestor puede ser usado como abono [34].

#### 4.4.1 Alimentación de la planta

Para que la planta de biogás tenga el mayor rendimiento posible, el proceso de alimentar la instalación debe optimizarse, de forma que lo que entra al digestor sea una mezcla homogénea. Para esto se debe separar el estiércol de cuerpos extraños, triturarlo y mezclarlo, proceso en el cual se usa agua externa. Hoy en día existen agitadores (o mezcladores) que pueden automatizar el proceso de alimentar el digestor de forma que el proceso sea más eficiente y se ahorre en costes de energía y tiempo [35].

#### 4.4.2 Digestores de estiércol de vacuno y/o cerdo

Cuando se obtiene esa mezcla homogénea, esta pasa a la siguiente fase que es la digestión anaerobia en los digestores. Estos son el reactor de mezcla completa sin recirculación, el reactor de mezcla completa con recirculación, reactor de retención de biomasa y el de sistemas discontinuos principalmente (explicados en el epígrafe correspondiente).

En este caso el digestor elegido es el de retención de biomasa sin recirculación, ya que es el comúnmente usado para residuos de bovino y porcino [21]. Para facilitar la homogeneización del estiércol se añadirá previamente un agitador.

La instalación consta de un sistema de calefacción para mantener la temperatura en rangos óptimos para la fermentación (40°C) y funcionamiento de la planta.

#### 4.4.3 Acondicionamiento y depuración

El primer paso es analizar o tratar el estiércol para comprobar que cumple con las especificaciones mostradas en la Tabla 3 [13]:

Residuo	ST (%)	SV (%)	Producción de biogás (m <sup>3</sup> /kg de SV)	Tiempo de retención (días)	CH <sub>4</sub> (%)	Sustancias no deseadas	Sustancias inhibitoras	Problemas frecuentes
Estiércol	5-12	75-85	6-20	20-30	55-75	Calderas, tierra, paja, madera	Antibióticos, desinfectantes	Espumas

Tabla 3 Condiciones de acondicionamiento y depuración

Parte del contenido del biogás generado son impurezas que deben ser eliminadas. Aquellas con peores efectos son las compuestas por H<sub>2</sub>S por su toxicidad y corrosión y porque pueden derivar en ácido sulfúrico que degradaría la maquinaria. El agua puede formar condensaciones en el gas además de soluciones ácidas. El CO<sub>2</sub> reduce el poder calorífico y el NH<sub>3</sub> forma óxidos de nitrógeno durante la combustión y partículas que pueden provocar decantación.

Si el uso final del biogás generado por la planta es el de inyección a la red de gas natural, el nivel de depuración debe ser elevado. Para esto se recurre a los métodos anteriormente explicados: la desulfuración, donde se debe prestar especial atención ya que los residuos ganaderos son los que mayor concentración de sulfatos presentan; la deshumidificación y la eliminación de CO<sub>2</sub> mediante la filtración a través de carbón activo (el gas circula por el carbón activo y este fija el CO<sub>2</sub>) o por separación de membranas. Este método consiste en la separación de los compuestos ya que tienen distintas permeabilidades sobre la presión aplicada. Se eligen estos métodos porque siendo efectivos, su coste no es demasiado elevado [13].

#### 4.4.4 Inyección a red

Una vez el biogás es depurado y se va a inyectar a red, previamente debe someterse al *upgrading*. La normativa determina que el biometano inyectado debe cumplir las siguientes condiciones [36]:

- El contenido de CO<sub>2</sub> debe ser siempre inferior al 2%.
- El punto de rocío del agua debe ser inferior a -8°C.
- El volumen de inyección debe ser inferior a 5.000 m<sup>3</sup>/h.

### 4.5 Fundamentos teóricos de una planta de biogás

#### 4.5.1 Valorización energética y proceso de digestión anaerobia

La valorización energética es el proceso mediante el cual se optimiza la explotación de residuos industriales, más en concreto, del sector agroalimentario. En función del tipo de subproducto se pueden aplicar varias técnicas que se clasifican en termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), químicos (dividido en producción de bioetanol por fermentación alcohólica o producción de biogás por fermentación o digestión anaerobia).

Los métodos termoquímicos suelen quedar descartados en la industria agroalimentaria porque son procesos en los que la muestra debe tener un contenido muy bajo en agua, lo que no aplica a sus residuos. En cuanto al biodiesel, el contenido en grasas debe ser elevado y para el bioetanol el contenido en hidratos y almidones debe ser alto también. En el caso a tratar, el biogás, ya sea de origen agroalimentario o industrial, acepta residuos de elevada humedad y distinta composición [37].

La digestión anaerobia se caracteriza por ser un proceso biológico en el que, en ausencia de oxígeno y bajo la acción de unas bacterias específicas, se descomponen las formas más complejas de los microorganismos (carbohidratos, proteínas, lípidos...) en productos gaseosos como el biogás formado por CH<sub>4</sub> (50-80%), CO<sub>2</sub> (20-50%), H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y NH<sub>3</sub> (1-5%), H<sub>2</sub>S (100-4.000ppm) en mayor medida y el digestato, que se compone de productos minerales como K, P, Ca, etc) [37].

Por otra parte, los residuos pueden ser tratados individualmente o de forma colectiva en lo que se denomina co-digestión. Esta ofrece distintas ventajas entre las que se encuentran la reducción de malos olores, la mineralización, sustitución de energía fósil por una energía renovable y la reducción de gases de efecto invernadero, ya que se reducen las emisiones de CH<sub>4</sub> y reducción del CO<sub>2</sub> al sustituir la energía fósil [9].

En la Figura 16 se muestra la equivalencia de biogás con otras fuentes de energía (Fuente CIEMAT):



Figura 16 Equivalencia energética entre el biogás y otros combustibles.

#### 4.5.2 Proceso químico para la obtención del biogás por digestión anaerobia

La digestión anaerobia se divide en distintas fases consecutivas que culminan con la degradación del sustrato, que es el alimento de los microorganismos. Intervienen 5 poblaciones de microorganismos que son [9]:

- Bacterias hidrolíticas-acidogénicas
- Bacterias acetogénicas
- Bacterias homoacetogénicas
- Bacterias metanogénicas hidrogenófilas
- Bacterias metanogénicas acetoclásicas

Todas ellas tienen una velocidad de crecimiento distinta, así como su sensibilidad a inhibidores como el hidrógeno (H<sub>2</sub>), ácido acético o amoníaco es diferente. Ambos factores hacen que cada etapa del proceso sea distinta en cuanto a la velocidad de reacción y que el proceso global dependa del equilibrio entre la materia a tratar y los compuestos inhibidores, así como la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) que reducen el pH, el cual depende del equilibrio CO<sub>2</sub>-bicarbonato. Para que estas reacciones tengan lugar es necesaria la asociación sintrófica ("organismos que combinan sus capacidades metabólicas para catabolizar sustancias que individualmente no podrían" [38]) entre bacterias acetogénicas y metanogénicas creando así agregados de diferentes poblaciones. Esto significa que, en ocasiones, la puesta en marcha de los reactores pueda demorarse incluso meses.

Como se ha mencionado anteriormente, cada etapa se desarrolla a una velocidad determinada, siendo la más lenta la que determina la velocidad del proceso. En el caso de los sustratos solubles, la metanogénesis es la fase limitante, optando por escoger diseños que permiten elevar la concentración de microorganismos acetogénicos y metanogénicos en el reactor para solucionar este problema. De esta manera se crean sistemas cuyo tiempo de procesamiento es de días en vez de meses.

En el caso de los residuos de materia orgánica en forma de partículas, la fase limitante es la hidrólisis, cuya velocidad de proceso depende del tamaño de las partículas pudiendo demorar dos o tres semanas el procesamiento. Mediante el pretratamiento, es posible reducir el tamaño de las partículas para a su vez reducir el tiempo del proceso. Además, que las partículas sean más pequeñas las hace también más solubles y esto se puede conseguir a través de maceración, ultrasonidos, tratamientos térmicos, altas presiones o combinación de ambas [9].

A continuación se explica en qué consiste cada una de las etapas (Figura 17) [21]:

- El proceso comienza con la **hidrólisis**, donde los polímeros que forman las sustancias tratadas se transforman en compuestos orgánicos solubles por la acción de enzimas que actúan como agentes hidrolíticos (reacción entre una molécula de agua y otra macromolécula donde la molécula de agua se divide y rompe los enlaces de la macromolécula convirtiéndola en otra más simple [39] obteniendo compuestos adecuados para otras bacterias gracias a la despolimerización. Este depende de varios factores que deben ser controlados como la temperatura.
- A continuación, mediante la **acidogénesis** se eliminan las trazas de oxígeno existentes y convierte las moléculas solubles en compuestos que aprovechan agentes como el hidrógeno. Esto es gracias a la acción de las bacterias acidogénicas que convierten los azúcares y aminoácidos en dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y ácidos orgánicos [40].
- Después tiene lugar el proceso de digestión, técnicamente llamado **acetogénesis** donde los compuestos no metabolizados por las bacterias son transformados en otros más simples para que se puedan aprovechar. Esta acción la llevan a cabo las bacterias acetogénicas que convierten estos ácidos de la anterior etapa en ácido acético con la producción adicional de amonio, hidrógeno y dióxido de carbono.
- El proceso termina con la **metanogénesis** que es la obtención de dióxido de carbono y biometano, compuesto de gran poder calorífico.

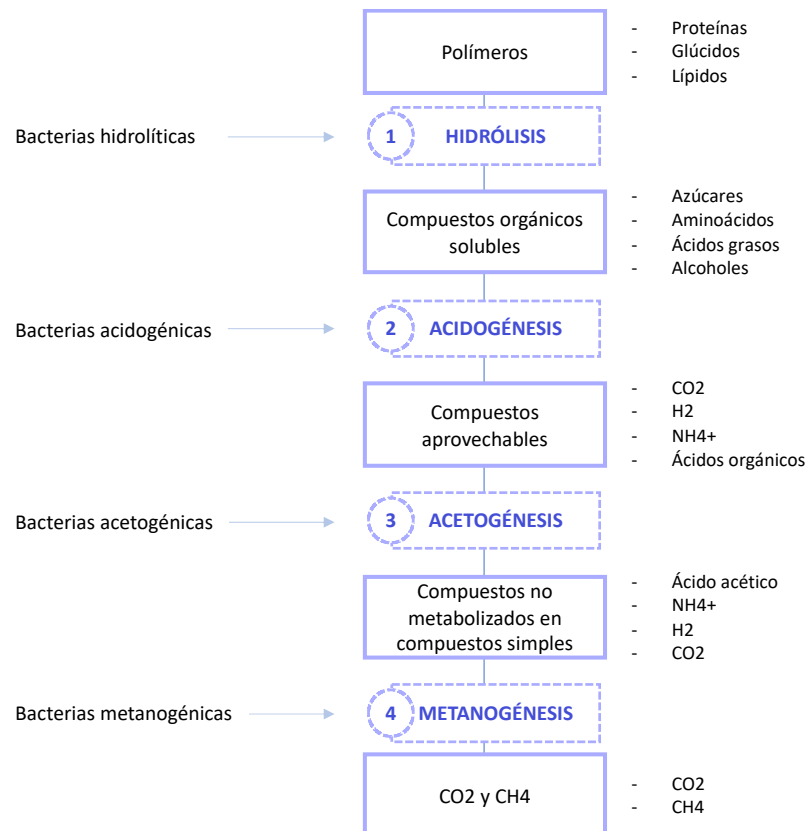


Figura 17 Esquema de las reacciones consecutivas que tienen lugar para la obtención de biometano.

### 4.5.3 Características de la codigestión

La co-digestión anaerobia es el proceso en el que se digieren dos o más residuos y cuenta con ventajas frente a los procesos en los que se trata un solo sustrato, como pueden ser las ventajas técnicas medioambientales y económicas. Algunas de estas virtudes mencionadas son la posibilidad de que ambas composiciones se complementen para que el proceso sea más sencillo y también poder usar las mismas instalaciones para el tratamiento. Si los compuestos son similares, también se pueden usar las mismas metodologías en el proceso de digestión, aunque las variaciones de cada uno en cuanto a composición y producción se debe analizar por separado. Como resultado, si se pueden tratar ambos residuos de forma simultánea, se pueden reducir costes y optimizar la explotación de los recursos aunque la principal ventaja es beneficiarse de las sinergias y compensar las carencias de los residuos por separado, tanto en régimen termófilo como mesófilo [9].

Además, se aprovecha la complementariedad de ambos residuos como es el ejemplo de las deyecciones ganaderas y los residuos alimentarios ya que estos tienen una concentración de materia orgánica y relación C/N baja, aunque el nivel de micro y macronutrientes es elevado. Esto favorece el crecimiento de los microorganismos anaerobios y la alcalinidad, lo que es fundamental para evitar la acidificación (cierta alcalinidad produce lo conocido como “efecto tampón” y mantiene el pH estable ante el agregado de un ácido. Sin embargo, un déficit de alcalinidad puede producir corrosión sobre superficies metálicas y desajustar el pH del medio [41]. También se obtienen resultados positivos en la

combinación de residuos ganaderos con aquellos que resultan de la industria cárnica y los mataderos debido a que son ricos en grasas y por sus características producen altos niveles de metano, aproximadamente 47 m<sup>3</sup>/t por residuo. Otro ejemplo donde es aplicable es en la combinación de residuos municipales (su fracción orgánica) y lodos de depuradora (se tiende a usar residuos urbanos e industriales porque tienen mayor potencial de producción de biogás que los ganaderos, aunque pueden ser usados como base por su elevado contenido en agua, capacidad tampón y abundancia de nutrientes) [9]. Sin embargo, el caso de los residuos alimenticios es el contrario, ya que su concentración de carbohidratos, proteínas y grasas es elevado, y además presentan una alta relación C/N por lo que la digestión anaerobia se ve afectada negativamente dando lugar a problemas de acidificación (Figura 18). La mezcla de ambos propicia un proceso más estable, favoreciendo la producción de biogás

	Residuos ganaderos	Lodos depuración	FORM	Residuos industria alimentaria
Micro y macronutrientes	↑	↑	↓	↓
Relación C/N	↓	↑ ↓	↑	↑
Capacidad tampón (alcalinidad)	↑		↓	↓
Materia orgánica biodegradable	↓	↑ ↓	↑	↑

Figura 18 Caracterización relativa para la co-digestión de diferentes residuos orgánicos. Fuente: GIRO.

#### 4.5.4 Características de los residuos agroindustriales para su uso en la co-digestión anaerobia

Las características de los residuos agroindustriales para su uso en la co-digestión anaerobia que se deben tener en cuenta son: relación sólidos totales-humedad, sólidos volátiles y su biodegradabilidad, balance entre C/N (carbono y nitrógeno), la máxima producción de biogás y producción real, los materiales no deseables que actúan en el proceso y las sustancias inhibidoras [39].

##### - Relación sólidos totales-humedad

Los sólidos totales son aquella porción de materia seca que conforma la muestra y su porcentaje dentro de esta depende de la muestra a estudiar. De los residuos agroindustriales, los que menor porcentaje de sólidos totales (ST) son el lactosuero y los purines de porcino pudiendo ser inferior al 10% mientras que otro tipo de residuos superan el 20%. Cuanto mayor sea el porcentaje de ST de la muestra, mayor biogás (gracias al poco contenido en agua). Sin embargo, una mínima concentración de agua es necesaria para el proceso de fermentación, por lo que debe alcanzarse el equilibrio entre los requisitos de producción de biogás y la humedad necesaria para el proceso de digestión. Para que este proceso se lleve a cabo de forma adecuada se deben dar por debajo del 15%. Por otro lado, los residuos que



contengan un alto porcentaje de ST puede suponer un problema en el reactor dando lugar a problemas de agitación, sedimentación etc. Es por esto que los distintos sistemas que actúan en el digestor, ya sean elementos de agitación o eliminación, deben ser diseñados correctamente [39].

- *Sólidos volátiles y biodegradabilidad*

De los sólidos totales de la muestra, los sólidos volátiles suelen oscilar entre el 70 al 90%, por debajo de este porcentaje, incluso menor a un 60% no son aptos para la digestión anaerobia. Este concepto de biodegradabilidad es necesario para obtener un buen rendimiento en el proceso. Los componentes con mayor biodegradabilidad quedan reflejados en la Tabla 4 [39]:

Componente	Presente en	Biodegradabilidad anaerobia
Azúcares	Remolacha o caña de azúcar. Subproductos de industria azucarera o fábrica de golosinas, etc.	Excelente
Almidón	Excedentes de cereales, patatas, subproductos de fábricas de snacks o de almidones, etc.	Excelente
Celulosa	Paja triturada, hierba, pulpas y pieles de frutas y verduras, etc.	Buena
Proteínas	Subproductos animales, productos cárnicos, lácteos, o de la pesca, etc.	Excelente
Grasas	Subproductos de origen animal o vegetal	Buena <sup>1)</sup>
Pesticidas, antibióticos, detergentes	Restos de producción vegetal, estiércol y purines, subproductos de la industria farmacéutica.	Regular
Sales.	Salmueras o residuos salinos.	No biodegradable
Arena, piedras	Estiércol, purines, restos vegetales, etc.	No biodegradable
Metales	Residuos de envases.	No biodegradable
Plásticos	Residuos de envases.	No biodegradable

<sup>1)</sup> Requiere mayores tiempos de retención.

Tabla 4 Biodegradabilidad anaerobia de los principales componentes de los residuos agroindustriales

- *Balance carbono-nitrógeno*

Esta relación cobra especial importancia en la fermentación de la materia orgánica a degradar en el proceso y sus valores oscilan entre 6 y más de 500, siendo el valor más bajo en las evacuaciones ganaderas y el más alto cuando se trata de madera. El balance óptimo para el proceso es de 20-25 (Tabla 5) [39].

Residuo	Sólidos Totales ST [%]	Sólidos Volátiles [% de ST]	C:N [-]	Producción Biogás <sup>3)</sup> [m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> SV]	Tiempo de retención [días]	CH <sub>4</sub> [%]	Sustancias NO deseables	Sustancias inhibidoras	Problemas frecuentes
Purín de cerdo	3-8 <sup>1)</sup>	70-80	3-10	0,25-0,50	20-40	70-80	virutas de madera, cerdas, arena, cuerdas	antibióticos, desinfectantes	espumas, sedimentos
Estiércol	5-12 <sup>1)</sup>	75-85	6-20 <sup>2)</sup>	0,20-0,30	20-30	55-75	cerdas, tierra, paja, madera	antibióticos, desinfectantes	espumas
Gallinaza	10-30 <sup>1)</sup>	70-80	3-10	0,35-0,60	>30	60-80	piedras, arena, plumas,	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , antibióticos, desinfectantes	inhibición por NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , espumas
Residuos de frutas	15-20	75	35	0,25-0,50	8-20	ND	partes poco biodegradables	AGV, pesticidas	acidificación
Restos de alimentos	10	80	ND	0,50-0,60	10-20	70-80	huesos, metales, plásticos	AGV, desinfectantes	acidificación sedimentos, mecánicos
Lactosuero	1-5	80-95	ND	0,80-0,95	3-10	60-80	impurezas	-	acidificación
Vinazas	1-5	80-95	4-10	0,35-0,55	3-10	55-75	partículas poco biodegradables	AGV	acidificación
Hojas	80	90	30-80	0,10-0,30 <sup>4)</sup>	8-20	ND	tierra	pesticidas	-
Paja	70	90	90	0,35-0,45 <sup>5)</sup>	10-50 <sup>5)</sup>	ND	arena	-	espumas biodegradabilidad
Madera	60-70	99	723	ND	∞	ND	NO UTILIZAR	-	biodegradabilidad
Jardinería	60-70	90	100-150	0,20-0,50	8-30	ND	tierra, restos poco biodegradables	pesticidas	biodegradabilidad
Hierba	20-25	90	12-25	0,55	10	ND	piedras, arena, tierra	pesticidas	acidificación

<sup>1)</sup>Según dilución; <sup>2)</sup>Según presencia de paja; <sup>3)</sup>Según tiempo de retención; <sup>4)</sup>Según secado; <sup>5)</sup>Según picado  
ND: no disponible.

Fuente: Adaptado de Steffen, R., et al. (1998)

Tabla 5 Características y producción de biogás de algunos residuos orgánicos agroindustriales

#### - Producción máxima de biogás frente producción real

El potencial máximo para producir biogás es distinto en cada residuo, ya que este depende de su composición y biodegradabilidad. Este potencial es determinado mediante ensayo en laboratorio donde el residuo en cuestión es biodegradado en condiciones anaerobias determinadas. Los valores oscilan entre 0,15-0,9 m<sup>3</sup> de biogás/kg de SV, siendo los residuos grasos los que mayor biogás producen, aunque precisen de mayor tiempo de retención. La producción real en usos industriales depende no solo de este potencial, si no en mayor medida del tiempo de retención (también se deben tener en cuenta desechos no deseados y sustancias inhibidoras entre otras) siendo ese el tiempo medio que los residuos permanecen en el interior del reactor para ser sometidos a la digestión anaerobia (volumen del digestor/caudal de alimentación). Por ejemplo, los sustratos de un digestor de 2.000 m<sup>3</sup> alimentado con un caudal de 80 m<sup>3</sup>/día tienen un tiempo de retención de 25 días.

En usos industriales este tiempo de retención es adaptado a cuando la producción de biogás es máxima, que ronda el 40-60% de eliminación de sólidos volátiles [39].

#### - Sustancias no deseables

Cobra especial importancia su eliminación puesto que pueden crear problemas en la separación de distintas fases debido a su sedimentación o flotación, como pueden ser espumas u objetos de pequeño tamaño que no hayan sido eliminados antes. Es por esto que es importante eliminar aquellas sustancias o cuerpos que los residuos puedan arrastrar desde su origen ya, que una vez entren en el reactor la separación será más complicada [39].

#### - Sustancias inhibidoras

Pueden encontrarse presentes antes del proceso o desarrollarse durante el mismo pudiendo reducir el rendimiento o a imposibilitar el proceso de fermentación. Uno de los mayores inconvenientes es el ejemplo de la descomposición de los carbohidratos y las grasas, ya que aumentan la concentración de

ácidos grasos volátiles, también llamados AGVs que causan problemas de inhibición. Otras sustancias que pueden dar lugar a estos problemas son el amonio, ácidos grasos de cadena larga, pesticidas o desinfectantes entre otros [39].

En los subproductos industriales, debido a su naturaleza podemos encontrar pesticidas o herbicidas entre otros, aunque en los residuos vegetales o estiércoles no se ha demostrado que la presencia de estas sustancias tenga impacto significativo en el proceso de biodigestión. También pueden desarrollarse en el proceso de la digestión, como se ha mencionado anteriormente, con la aparición de concentraciones de ácidos de cadena larga, amoniaco, hidrógeno y ácido sulfhídrico [39].

Los valores más habituales de las principales sustancias inhibidoras se muestran en la Tabla 6:

INHIBIDORES	CONCENTRACIÓN INHIBIDORA (mg/ml)
Sulfuro (como azufre)	200
Cu	10-250
Cr	200-2000
Zn	350-1000
Ni	100-1000
CN	2
Na	8000
Ca	8000
Mg	3000

Fuente: GTZ GmbH, 1999

Tabla 6 Valores de concentración de los inhibidores más comunes

#### 4.5.5 Tipos de digestores anaerobios

Los digestores son contenedores herméticos, también llamados reactores, donde los residuos que son depositados son sometidos a digestión anaerobia generando biogás y digestatos, que son fertilizantes orgánicos [42]. Los digestores se clasifican según el método que siguen para mantener alta la concentración de organismos siendo el más simple el reactor de mezcla completa y es el más usado para los residuos (RMC o CSTR en inglés). En la Figura 19 se muestra un esquema de los principales reactores de digestión anaerobia [9]

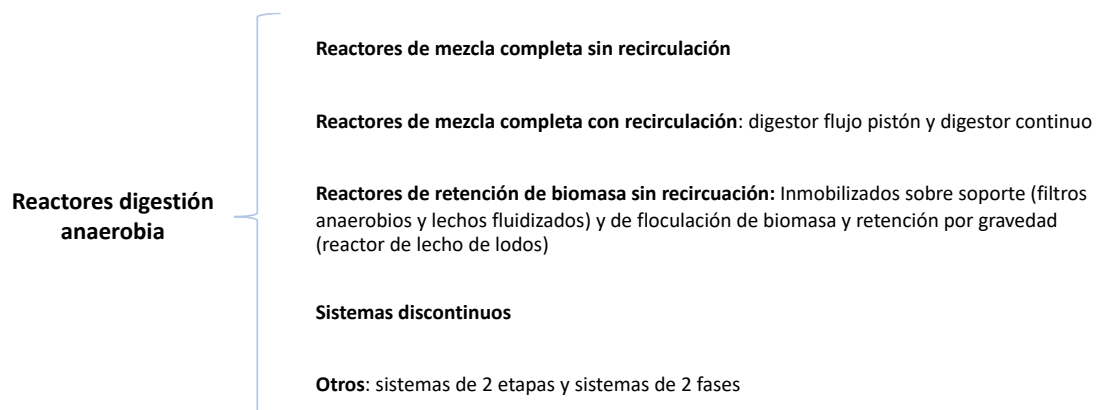


Figura 19 Esquema de tipos de digestores (elaboración propia)

#### - Reactor de mezcla completa sin recirculación (RMC sin recirculación)

En la Figura 20 se puede observar un esquema del reactor de mezcla completa sin recirculación. La relación entre las concentraciones de microorganismos y substrato se mantiene constante gracias al

sistema de agitación, que puede ser de dos tipos. En la agitación mecánica se pueden usar agitadores de hélices o palas, de eje vertical o agitadores horizontales, y la neumática donde se recircula el biogás a presión. Su ventaja ante otros reactores es que su diseño es sencillo, aunque su tiempo de retención es mayor ya que la concentración de la especie que se mantiene en régimen estacionario (las condiciones se mantienen constantes) es la misma que se pretende en el afluente. La velocidad de la reacción depende de la concentración. Al tratarse de procesos biológicos la velocidad será baja por lo que aumentar el tiempo de la reacción es una forma de compensar este inconveniente [9].

Se usa principalmente en residuos semi-sólidos y se caracteriza por una producción “escasa” de biogás, ya que la biomasa se elimina a medida que se digiere el residuo orgánico [9].

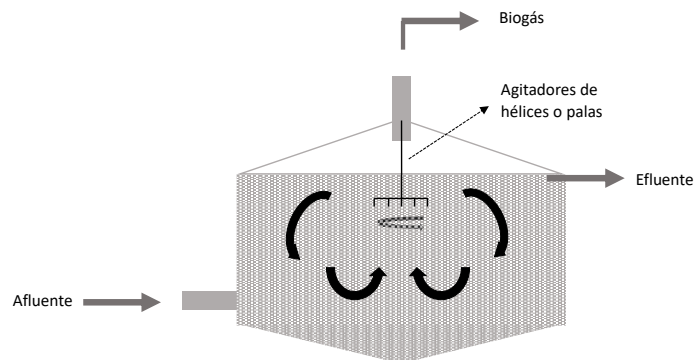


Figura 20 Reactor de mezcla completa sin recirculación (con agitadores de hélices o palas)

#### - Reactor de mezcla completa con recirculación

En la Figura 21 se puede observar un reactor de mezcla completa con recirculación. La principal diferencia con el reactor sin recirculación es que este dispone de un desgasificador y decantador, de forma que la biomasa decantada vuelve al interior del reactor principal por el afluente sin que se pierda biomasa del efluente por lo que el aprovechamiento es mayor [9].

Como se menciona en el anterior apartado, uno de los problemas del RMC sin recirculación es el tiempo de retención hidráulica. Se comprueba que con la regulación de la recirculación es posible mejorar este parámetro, aunque sea a costa de aumentar el tiempo de retención de los microorganismos y separación en el decantador y recirculación. Esto hace que el sistema sea aplicable exclusivamente a aguas residuales de alta carga orgánica, como son las provenientes de azucareras o cerveceras. Así se consigue a separación de fases líquido-sólido. Cabe mencionar la importancia del desgasificador previo a la decantación. De forma resumida, la materia orgánica se digiere en el reactor, expulsando el biogás producido. Sin embargo, los residuos son trasladados al desgasificador para terminar de obtener el biogás que todavía pueda ser extraído, y después pasan al decantador, donde tras dejar que los microorganismos se depositen. Luego vuelven a ser reconducidos al efluente siempre que puedan ser aprovechados. En caso de que no lo sean, se eliminan [9].

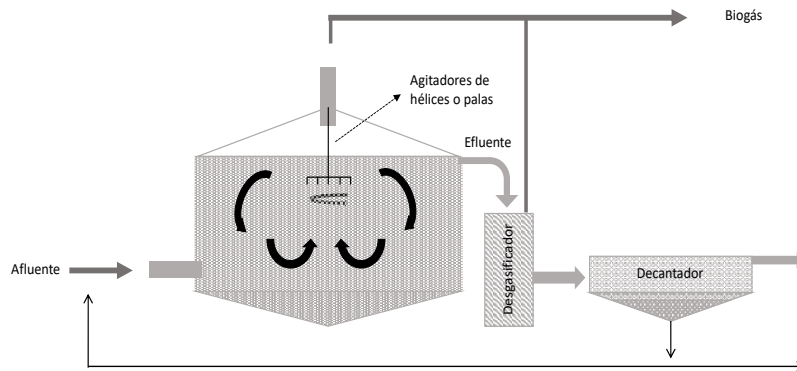


Figura 21 Reactor de mezcla completa sin recirculación (con agitadores de hélices o palas)

- *Digestor flujo-pistón*

En las Figuras 22 y 23 se muestran los esquemas de este tipo de reactores. La principal diferencia es que se trata de un desplazamiento horizontal donde la fermentación es distinta según la sección en la que se encuentre. Usados para residuos con gran cantidad de materia en suspensión ([Sector del biogás](#)), son digestores cilíndricos o paralelepípedos de hormigón o acero en los que la alimentación puede ser continua o semicontinua y la agitación se da mediante palas [9]. La principal ventaja frente a los digestores de mezcla completa es que permite mayor concentración de sólidos totales, en torno al 20-40%, el rendimiento es mayor y el tiempo de retención inferior [43].

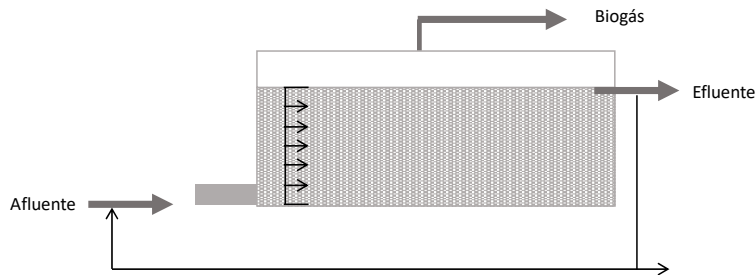


Figura 22 Reactor con retención de biomasa sin recirculación (Flujo-pistón).

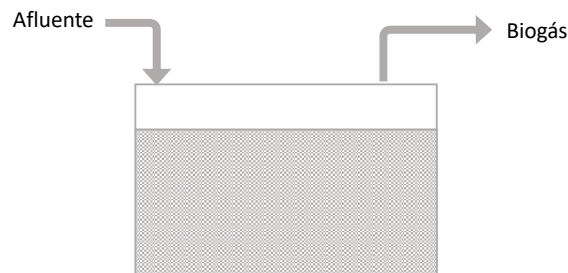


Figura 23 Reactor con retención de biomasa sin recirculación.

- *Digestor discontinuo*

En la Figura 24 se muestra un esquema de un reactor discontinuo. Consiste en un tanque en el que, una vez transcurrido el tiempo de retención, se retira el efluente y se procede a añadir la mezcla de nuevo. Es un proceso poco eficiente debido al lapso entre ambas fases y porque no se dispone de sistemas de mezcla para garantizar la completa digestión [44].

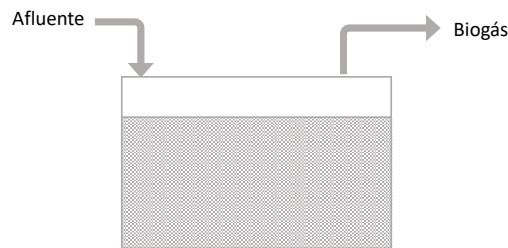


Figura 24 Esquema de un digestor discontinuo

- *Reactor con retención de biomasa sin recirculación*

Reteniendo bacterias en el interior y sin mezcla completa es posible reducir el tiempo de retención a niveles inferiores al RMC que es tomado como valor de referencia. Dependiendo del método de retención de biomasa se dividen en dos tipos: inmovilización sobre un soporte, como pueden ser filtros anaerobios o lechos fluidizados (explicados posteriormente) o mediante agregación o floculación de biomasa y su retención por acción de la gravedad, como pasa en reactores de lecho de lodos [9].

En este caso, el crecimiento de microorganismos es mayor en la entrada del reactor donde la concentración del sustrato también lo es, haciendo así que la concentración media del reactor sea mayor que la de referencia (el RMC). Su uso más común es en la gestión de residuos urbanos así como los de porcino y bovino. Uno de los inconvenientes de esta tecnología es la homogeneización en la sección transversal del reactor de aquellos que tienen configuraciones horizontales. Este problema se puede solventar introduciendo un sistema de agitación transversal, como podría ser la reintroducción del biogás a presión en la base horizontal [9].

Entrando en mayor detalle sobre los tipos de reactores con retención de biomasa sin recirculación:

**Filtro anaerobio (Figura 25):** sistema de bacterias fijadas en la superficie formando una biopelícula sobre el flujo vertical. La distribución de estas bacterias puede ser irregular siendo un filtro anaerobio simple o con flujo ascendente donde las bacterias se encuentran más atrapadas en los espacios del propio filtro. En su defecto, pueden estar distribuidas y fijas recibiendo el nombre de “flujo ascendente” generando un sustrato lentamente degradable que precisa de un elevado tiempo de retención. Esta retención es de relevante importancia en la actividad del reactor. Su uso más común es en la industria alimentaria, en concreto en el tratamiento de aguas residuales (fracción líquida de residuos ganaderos), aunque requiere de una gran inversión [9].

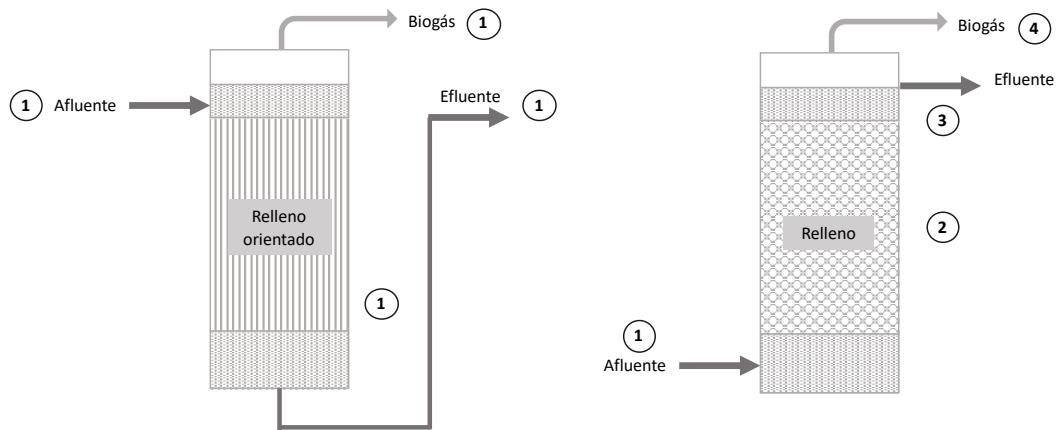


Figura 25 Filtros anaerobios de lecho fijo.

En algunos casos estos digestores están provistos de un tanque séptico donde se separa la parte sólida de los residuos que se quieren eliminar. Gracias a la densidad de estos residuos permanecen en el fondo mientras que la biomasa, mediante el flujo ascendente es filtrada por el relleno.

Este relleno se compone de un medio filtrante que puede ser grava, estructuras de plástico u otros materiales.

Tras una última superficie de filtrado el biogás ya depurado se extrae y el efluente, que es expulsado.

**Lecho fluidizado (Figura 26):** En este tipo de reactor, un fluido (gas o líquido) pasa a través de un material granular sólido (el lecho) a velocidades lo suficientemente altas como para suspenderlo y que se comporte como si fuera un fluido. Para favorecer estas condiciones y que se dé la expansión y fluidización del lecho se aplica la recirculación. Se le puede dar el mismo uso que al filtro anaerobio, aunque no hay tantas referencias en su uso [9].

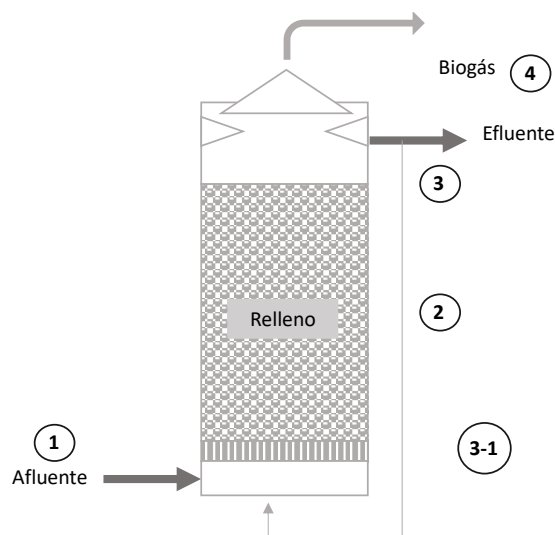


Figura 26 Esquema de un reactor de lecho fluidizado

**Reactor de lecho de lodos (Figura 27):** Sistema que favorece la floculación formando gránulos que, sedimentados, se mantienen en el interior del reactor sometidos a velocidad ascendente generando una reacción química que produce biogás. En la parte superior se coloca un separador de biomasa-

líquido-gas. El más conocido es el Up-low Anaerobic Sludge Blanket (UASB) y su uso más común es la industria alimentaria como en los mencionados anteriormente. Es el más simple de los reactores y cuenta con la limitación de que la biomasa granule y forme agregados de alta densidad. Frente a esto es clave la composición del agua a tratar y mantener buenas condiciones durante el proceso [9].

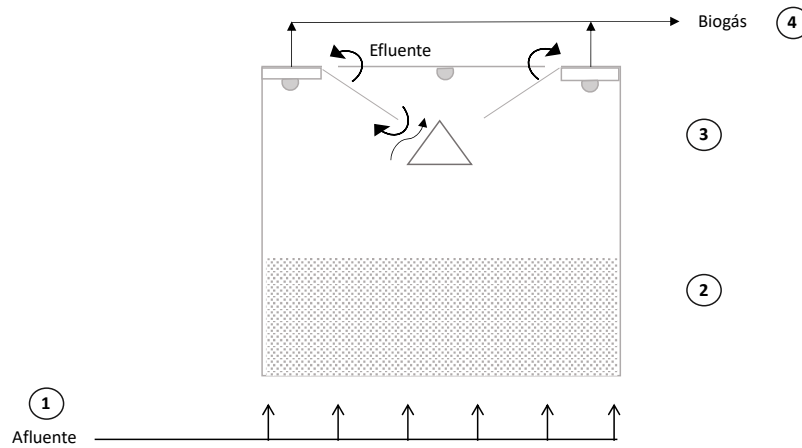


Figura 27 Esquema de un reactor de lecho de lodos.

La biomasa entra en el digestor y mediante el movimiento ascendente pasa a través del lecho de lodos situado en el fondo.

En la parte inferior del reactor el lecho de lodo es más denso y su actividad es mayor. A medida que se asciende, el lecho es más disperso y su capacidad de retención de los organismos que se pretenden eliminar es menor (se llama también “manta de lodo”). El efluente es expulsado por un decantador situado en la parte interna y superior del reactor. Bajo este se sitúa el dispositivo de separación de gases y sólidos que mantiene las partículas que se desprenden de la manta de lodos en la cámara de digestión. El lodo que ha sido tratado se extrae y se obtiene el biogás depurado. Como resultado se obtiene una cantidad de biomasa con gran actividad microbiológica respetando el tiempo de retención hidráulica [46]

#### - *Sistemas discontinuos*

En este método no se aplica el tiempo de retención de la muestra puesto que la evolución del biogás sigue la misma tendencia que la curva típica de crecimiento de los microorganismos, por lo que se habla de tiempo de digestión. Esta se divide en latencia, crecimiento exponencial, estacionalidad y decrecimiento. Para que la producción de biogás sea lo más continua posible se combinan reactores discontinuos con puestas de marcha intercaladas para que siempre se encuentre uno en funcionamiento. Se utilizan en el tratamiento de residuos de alta concentración de sólidos donde es más difícil aplicar sistemas de bombeo [9].

#### - *Otros sistemas*

Según el residuo que se pretenda tratar se pueden combinar los distintos tipos de reactores que funcionarán según un sistema de dos etapas o dos fases [9].





- *Sistema de dos etapas*

En la primera etapa y gracias a un reactor discontinuo, se eleva el tiempo de retención favoreciendo la hidrólisis obteniendo como resultado un líquido por percolación. A continuación, se dirige a un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos que son producidos en la primera etapa. Esto permite mantener la temperatura en el reactor discontinuo, así como en el segundo reactor. Este sistema se aplica en el tratamiento de residuos sólidos urbanos, ganado vacuno etc.

- *Sistema de dos fases*

En este caso se trata de dos reactores en serie y en cada uno se realiza las fases de acidogénesis y metanogénesis respectivamente. Con esto, el objetivo es conseguir un tiempo de retención menor que si se utilizase un solo reactor de mezcla completa. El tiempo de retención será menor en el primer reactor, ya que el crecimiento de las bacterias acidogénicas es mayor. Se utiliza en aquellos compuestos cuyo limitante no sea la hidrólisis, como pueden ser aquellos altos en azúcares y bajo contenido en sólidos.

También se pueden utilizar sistemas híbridos, que combinan los dos reactores descritos anteriormente. Se han desarrollado diseños de reactores con retención de biomasa híbridos en los que la parte inferior se comporta como un UASB y la superior como un filtro.

#### 4.5.6 Parámetros ambientales y operacionales de los reactores o digestores

Para diseñar los digestores es necesario tener en cuenta diferentes parámetros y controlar una serie de variables químicas para asegurar el correcto desarrollo del proceso [9]:

**El pH:** Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa. Debe encontrarse en niveles medios (en el orden de 0 a 14, siendo 0 las sustancias más ácidas y 14 las más básicas, el pH debe rondar el valor 7).

**La alcalinidad:** capacidad del agua para neutralizar ácidos añadiendo sales de ácidos débiles o bases débiles y fuertes en aguas naturales.

**El potencial redox,** cuya función es medir la actividad de los electrones en una reacción química donde se da lugar a transferencia de electrones, distinguiendo sustancias químicas que actúan como donadores (agentes reductores) y otras que reciben estos electrones (agentes oxidantes).

**El valor de los nutrientes** de los microorganismos para asegurar el crecimiento y la concentración de tóxicos e inhibidores, que debe ser lo más cercana a cero.

También se deben controlar **parámetros operacionales** para controlar las condiciones del reactor. Estos son: temperatura, la agitación, el tiempo de retención y la velocidad de carga orgánica:

La **temperatura**, que debe mantenerse en rangos psicrófilicos, que son aquellos que rondan temperaturas frías (hasta 5°C), mesófilicos, si están en torno a los 35°C, o termófilicos si rondan los 55°C. La relación de la tasa de crecimiento y la reacción es directamente proporcional. Sin embargo, teniendo en cuenta que la sensibilidad de algunos inhibidores también aumenta conforme a este parámetro, lo conveniente es operar en rangos termófilos puesto que, a altas temperaturas, la tasa de destrucción de los agentes patógenos también es mayor.

La **agitación** que depende del tipo de reactor, ya que debe transferirse al sistema. Dependiendo de las características de cada reactor, se necesitarán cantidades de energía distintas para poder fomentar el traspaso de sustrato a las distintas poblaciones o agregados de bacterias. También es necesario para homogeneizar y mantener las concentraciones de inhibidores en valores que permitan la adecuada actividad del reactor.

El **tiempo de retención**. Se puede definir como la relación volumen-caudal de la materia orgánica a ser tratada. Es decir, el tiempo medio de permanencia del efluente en el reactor durante el cual se somete a la acción de microorganismos para posterior obtención del gas.

Para comprender mejor la tasa de eliminación de materia orgánica en forma de sólidos volátiles, (SV) en un reactor anaerobio continuo, y en consecuencia, la producción específica de gas, se hace uso de la Figura 28:

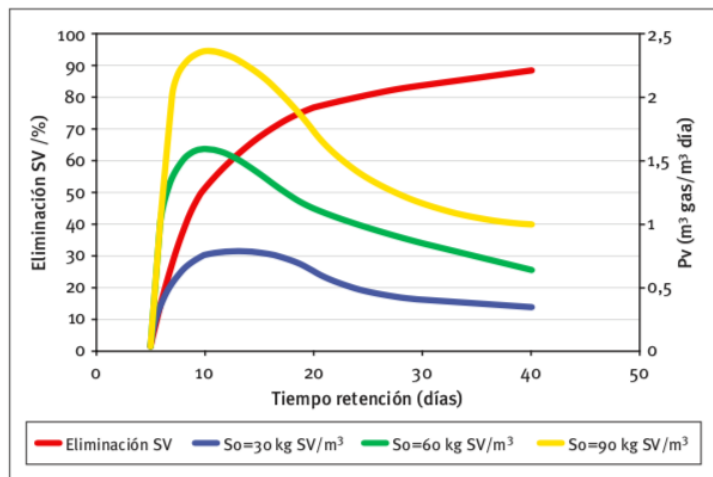


Figura 28 Eliminación de sólidos volátiles, SV (%) y producción volumétrica de gas Pv ( $m^3$  biogás/ $m^3$  dig·día) para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa, en función del tiempo de retención hidráulico. Fuente: GIRO.

Como se puede observar, en un periodo de tiempo menor a 10 días, el reactor no presenta actividad, pero una vez superado este valor, la eliminación de materia orgánica sigue una línea asintótica con una eliminación completa que tiende al infinito. Sin embargo, la producción de gas en el reactor alcanza su máximo en un tiempo de retención donde se ha eliminado entorno al 40 y 60% del sustrato, valor que corresponde a una concentración de 60 kg SV/ $m^3$

La **velocidad de carga orgánica**, que se mide por sus siglas en inglés, OLR. Hace referencia a la cantidad de materia introducida por volumen del reactor y unidad de tiempo. Si los valores son bajos, puede ser porque se introduzca una baja cantidad de materia y la concentración del efluente sea baja, o porque el tiempo de retención sea alto. En el caso contrario, si el valor es alto, puede darse una reducción en la producción del gas por materia orgánica introducida. El valor de ORL adecuado para cada reactor será distinto, dependiendo de las características de la instalación y el residuo a tratar.

#### 4.5.7 Potenciales y rendimiento según el tipo de residuo y su gestión

La producción máxima de biogás y en concreto, biometano, depende de factores mencionados anteriormente como son su potencial, la temperatura, el tiempo de retención, velocidad de reacción o carga orgánica y la presencia de inhibidores.

Se analiza especialmente el rendimiento de las deyecciones ganaderas, las más utilizadas en la valorización energética. Sustancias como el nitrógeno amoniacal en régimen termofílico tiene especial impacto negativo en el proceso de la digestión anaerobia. Otro de los factores con impacto negativo es el tiempo de almacenaje de los purines previo a la digestión. Si este es mayor a 3 meses la capacidad de producción de biogás puede reducir más del 70% (Bonmatí et al., 2001) ya que la fermentación puede emitir metano a la atmósfera.

Cabe mencionar que los lodos de depuración (mezcla de agua y sólidos separados del agua residual generados en estaciones depuradoras que tratan aguas urbanas [46] muestran producciones de metano que dependen del origen de estos residuos. Los que mejores resultados en cuanto a producción de biometano se refiere, son los lodos obtenidos de los mataderos, cuya mayor producción es de 0,45 m<sup>3</sup>/kg SV. En caso de ser concentrados por centrifugación y con uso de floculantes este valor se reduce a 0,34 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV según indica el estudio de Flotats de 2005. Los residuos que menor producción presentan son los lodos de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas siendo 0,33 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV cuando se tratan en rangos mesofílicos y 0,36 en régimen termofílico (Palatsi et al., 2006) dependiendo de la longevidad del fango y su concentración de sólidos primarios o secundarios [9].

#### 4.5.8 Acondicionamiento del biogás y subproductos

Tras el proceso de la digestión anaerobia, el biogás obtenido no es completamente puro (CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>) ya que puede incluir trazas de otros gases y pequeñas partículas y su eliminación dependerá del uso que se le vaya a dar al biogás. Su eliminación es crucial para el aumento del poder calorífico y cumplir con los requerimientos para el posterior uso. El objetivo final es obtener un porcentaje de metano lo más cercano al 92%, que es el contenido de CH<sub>4</sub> del gas natural, y entonces se le podrán dar los mismos usos [44]

#### 4.5.9 Procedimientos para la purificación del biogas:

**Desulfuración:** consiste en eliminar el H<sub>2</sub>S y para esto se distinguen 3 tipos de desulfuración. La microaerofílica que consiste en inyectar aire en la cabeza del digestor de forma que se degrada el H<sub>2</sub>S dando lugar a azufre elemental; la biológica externa que consiste en hacer pasar el biogás a través de un biofiltro relleno de un plástico al que se adhieren las partículas de H<sub>2</sub>S (aunque también se elimina el NH<sub>3</sub>). Y por último, a través de la adición de materiales férricos produciendo sulfatos que evitan la salida de azufre al biogás (aunque puede corroer el material y disminuir el pH). Los residuos ganaderos suelen ser los que más problemas presentan con el azufre [13].

**Deshumidificación:** se condensa el agua para disminuir su concentración en el biogás. Normalmente se pasa el agua por tubos que la condensan o se enfría el agua a una temperatura de 4°C [13].

**Eliminación del CO<sub>2</sub>:** el dióxido de carbono se elimina siempre que el uso final del biogás no sea en un motor de cogeneración. Esto se realiza mediante procesos como el lavado con agua, con disolventes orgánicos, filtración de carbón activo, separación por membranas o criogénica según el punto de ebullición (ordenadas de forma creciente por precio y eficiencia). Se consigue una concentración de metano muy alta (95%). A continuación, se explica este procedimiento de forma más detallada [13].

Dependiendo del uso que se le dé al biogás, la retirada de CO<sub>2</sub> será más o menos importante. En aplicaciones simples como calentadores, motores de combustión o sistemas de generadores este pasa por un quemador o motor. Será en usos más complejos cuando se necesite retirar el CO<sub>2</sub>. Esta eliminación aumenta el poder calorífico y genera un gas similar al natural y se realiza mediante absorción, adsorción, mediante el uso de membranas y criogenia. Es importante controlar factores como el pH, que debe ser alcalino, la presión en valores altos y la baja temperatura. También se usan soluciones como la de Ca(OH)<sub>2</sub> para remover el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, pudiendo eliminar el CO<sub>2</sub> hasta valores menores al 0,5%, aunque estos métodos son más costosos que el tradicional lavado de agua contracorriente a presión que puede eliminar los dos componentes mencionados. El proceso de adsorción puede no ser rentable por el balance coste-efectividad, ya que se necesitan temperaturas y presiones asociadas. Sin embargo, el proceso de separación criogénica es más “sencillo”, ya que el CO<sub>2</sub> tienen puntos de ebullición muy distintos, siendo el del CH<sub>4</sub> -106°C y el del CO<sub>2</sub> -78°C, ambos medidos a 1 atm, por lo que mediante la condensación y destilación a bajas temperaturas se puede separar el metano en forma líquida y obtener hasta un 97% de pureza del mismo. El único inconveniente de esta técnica son las altas inversiones iniciales. Por último, el uso de membranas o tamices moleculares son una solución más económica [21].

La Figura 29 recoge los distintos usos que se le puede dar al biogás dependiendo de la purificación a la que ha sido sometido.

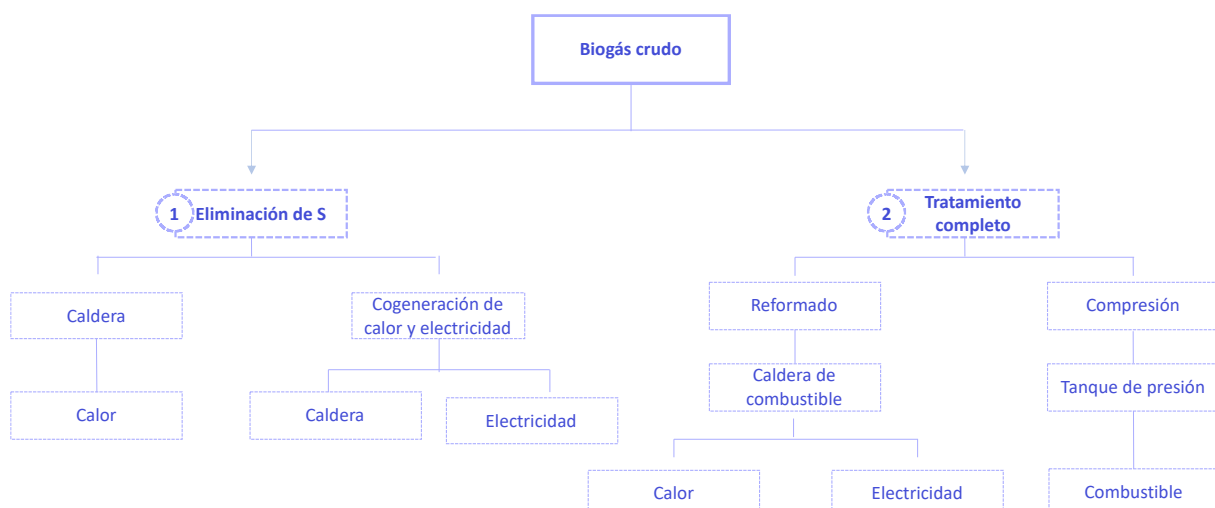


Figura 29 Alternativas de utilización del biogás y sus requerimientos de purificación

#### Acondicionamiento del biogás para su inyección a red

Para la inyección en la red de gas natural el biogás debe ser totalmente depurado (mediante el *upgrading* y se obtiene biometano). Esta depuración consiste en [36]:

1. Eliminar el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y partículas sólidas lo que causa un aumento en la concentración de metano (CH<sub>4</sub>).
2. Medición de la densidad energética, índice de Wobbe (forma de clasificar los combustibles gaseosos y asegurar la combustión necesaria en el quemador) y presión requerida.
3. Determinar el poder calorífico (cantidad de energía que desprende en una reacción química) para agregar propano en caso de ser necesario.

#### 4.5.10 Gestión de los subproductos

Durante el proceso de valorización energética, se obtiene energía renovable y subproductos, llamados biodigestatos (o digestatos simplemente), que son fertilizantes orgánicos y compost. Durante el proceso de la digestión anaerobia, estos subproductos son estabilizados, por lo que pueden ser usados como fertilizantes de alta calidad o aditivos. Se usan como sustratos orgánicos en agricultura, horticultura y paisajismo, lo que permite el ahorro en fertilizantes y la reducción de CO<sub>2</sub> del proceso de producción de estos. El uso de los fertilizantes y el compost también evita la producción de gases de efecto invernadero, como son el metano y el dióxido nitroso que se generarían si estos no fuesen usados como sustratos y se enterraran sometándose a fermentación anaerobia incontrolada. Los subproductos también reducen la necesidad de usar fertilizantes sintéticos de nitrógeno, fósforo y potasio [47].

Por otra parte, el digestato generado debe ser tratado para estabilizarlo y reducir su emisión de olores. Esto se realiza mediante el compostaje, proceso de digestión anaerobia selectiva que permite obtener compost a través del digestato. Consiste en la adición de un material estructural, el volteo periódico y la aireación opcional. El compost generado se usa para mejorar la estructura de los suelos y estimular el crecimiento del cultivo [48]. Para evitar la propagación de patógenos se recurre al método de pasteurización, ya que es el más rentable en coste-eficiencia. Se emplean sistemas como el de Pasteurización de Digestato HRS (DPS) consistente en intercambiadores de calor. En este caso se utiliza el exceso de calor generado en procesos complementarios como la evaporación del agua y su eliminación del digestato [47].

Los residuos sometidos a compostaje deben cumplir con los criterios establecidos en la normativa europea UNE-EN 13432:2001 y las medidas sanitarias recogidas en los reglamentos UE nº 1774/2002 y 208/2006. El uso de los fertilizantes también queda regulado en el Real Decreto 999/2017 de 24 de noviembre.

Se estima que la producción europea de biogás y biometano en 2030 pueda ser el doble que la actual, llegando a cuadruplicarse en 2050. Ante esto cobra especial importancia maximizar la eficiencia en el uso del biofertilizante de digestato producido en la digestión anaerobia, afirmaciones del informe de la comisión ENVI del Parlamento Europeo, con el fin de evolucionar hacia una economía circular y una industria agrícola sostenible.

Operaciones de tratamiento de digestato [43]:

1.- Acondicionamiento físico (centrifugado): se separan sólidos y líquidos de forma que el nitrógeno permanece en la fase líquida y el fósforo y potasio en la sólida, aunque la concentración de nutrientes es constante.

2.- Recuperación de nutrientes: los nutrientes se extraen para valorizarlos por separado de forma que el material resultante se usa para la agricultura. Se tienen menos nutrientes, pero se conserva la materia orgánica (por ejemplo: stripping)

3.- Eliminación de nutrientes: reduce la concentración de macronutrientes como el nitrógeno. Se usa principalmente cuando se dan problemas por contaminación de nitratos (por ejemplo: nitrificación-desnitrificación)

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se detallan todos los cálculos realizados. Para ello, es necesario tomar una serie de asunciones (Tabla 7) para plantear el desarrollo de la planta:

ASUNCIONES
Duración del periodo mensual de 31 días
Reparto equitativo de estiércol entre comarcas y a su vez entre municipios
Consumo del 60% del estiércol generado en Vic
1,5 m <sup>3</sup> de digestor por cada 1000 kg de mezcla homogénea
La mezcla ocupa el 80% del volumen del digestor
El consumo de la planta es un 10% de la energía que genera
Descuento en la compra de estiércol por venta al por mayor: 10%

Tabla 7 Asunciones para el desarrollo del proyecto

### 5.1 Estiércol usado en la planta

Para tener una aproximación a la cantidad de estiércol disponible en la instalación se comienza calculando la cantidad de estiércol de vaca generado en Barcelona. Las cabezas de ganado bovino en esta provincia en 2021 fueron 152.736, sin filtrar por edades ni género [49]. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación afirma en la "Hoja Divulgadora" sobre "Estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente" [50], una vaca adulta produce 20.200 kg de estiércol en un año, por lo que produce 55,34 kg/día. En base a esto se calcula la cantidad de estiércol producido en Barcelona:

$$\begin{aligned} \text{Estiércol en Barcelona producido en un día} &= 152.736 \times 55,34 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 8.452.410,24 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \\ &= 8.452,4 \text{ ton/día} \end{aligned}$$

Barcelona tiene 12 comarcas entre las que se encuentra Osona, a la que pertenece Vic



$$\text{Estiércol producido en Osona en un día} = \frac{8.452.410,24 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{12} = 704.367,52 \text{ kg/día}$$

A su vez, Osona está dividido en 51 municipios, por lo que la cantidad de estiércol que le corresponde a Vic es:

$$\text{Estiércol producido en Vic en un día} = \frac{704.367,52 \text{ kg/día}}{51} = 13.811,13 \text{ kg/día}$$

La Universidad de Vic estima que en la comarca de Osona solo se usa el 50% de las deyecciones ganaderas como fertilizante [29]. En base a esto, se estima que para el consumo de la planta se puede usar el 60% del estiércol producido en Vic:

$$\text{Estiércol} = 13.811,13 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 0,6 = 8.286,68 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

### 5.1.1 Costes del estiércol

Tomando como referencia el precio del estiércol que se ha encontrado en internet de un proveedor de este residuo en Barcelona ("Transporterra"), que vende el estiércol de vacuno a 0,12 €/kg.

$$8.286 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} \times 0,12 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 1.002,6 \frac{\text{€}}{\text{día}}$$

$$\text{Coste final} = 1.002,6 \frac{\text{€}}{\text{día}} - \left( 1.002,6 \frac{\text{€}}{\text{día}} \times 0,4 \right) = 601,56 \frac{\text{€}}{\text{día}} \times 31 \text{ días} = 18.648,36 \frac{\text{€}}{\text{mes}}$$

## 5.2 Biogás generado por la planta

Se toma una fracción de sólidos volátiles (SV) del 85% en la muestra.

$$\text{Fracción de SV} = 8.286,68 \text{ kg/día} \times 0,85 = 7.043,69 \text{ kg/día}$$

El potencial del estiércol de vacuno para generar biogás es de 0,3 m<sup>3</sup> biogás/kg estiércol [13], por lo que el biogás generado por la instalación es:

$$7.043,69 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} \times 0,3 \frac{\text{m}_3 \text{ biogás}}{\text{kg estiércol}} = 2.113,10 \frac{\text{m}_3 \text{ biogás}}{\text{día}}$$

## 5.3 Mezcla homogénea y agua necesaria

La relación líquido – biomasa es de 1:3 [52], es decir, por cada kg de biomasa se necesitan 3 de agua.

$$\text{Agua necesaria} = 8.286,68 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 3 = 24.860,04 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times$$

$$\text{Mezcla homogénea} = \text{Agua necesaria} + \text{Estiércol} = 24.860,04 \frac{\text{kg}}{\text{día}} + 24.860,04 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 3.3146,72 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

El coste del agua necesaria se calcula teniendo en cuenta que el m<sup>3</sup> cuesta 1,91€ [53]

$$24.860,04 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ kg}} \times \frac{1,91 \text{ €}}{1 \text{ m}^3} = 47,48 \frac{\text{€}}{\text{día}}$$

$$47,48 \frac{\text{€}}{\text{día}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 17.331,15 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

#### 5.4 Energía eléctrica generada y su facturación.

En el documento elaborado por la Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos del Gobierno de España sobre el sector del biogás agroindustrial en España [13], afirman que 1 m<sup>3</sup> de biogás podría generar hasta 2,8 kW de energía eléctrica renovable. En base a esto se calcula lo que genera la planta al día (estimando un rendimiento del motor del 40/45%).

$$2.113,1 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}} \times 2,8 \frac{\text{kW energía}}{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}} = 5.916,69 \text{ kW/día}$$

Tomando como referencia el precio de la electricidad de diciembre de 2022 [54] se calcula la facturación de la energía generada:

$$5.916,69 \frac{\text{kW}}{\text{día}} \times 0,335 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 1.982,09 \frac{\text{€}}{\text{día}}$$

#### 5.5 Almacenamiento y biodigestor

Suponiendo que por cada 1.000 kg de mezcla homogénea que se introduce se necesita 1,5 m<sup>3</sup> de digestor.

$$3.3146,72 \frac{\text{kg mezcla homogénea}}{\text{día}} \times \frac{1,5 \text{ m}^3 \text{ digestor}}{1.000 \text{ kg mezcla homogénea}} = 49,72 \frac{\text{m}^3 \text{ digestor}}{\text{día}}$$

Sabiendo que el tiempo de residencia del estiércol de vacuno ronda entre los 20 y los 30 días, se estima que en este caso planteado el tiempo de retención es de 20 días. El volumen del digestor debe poder abarcar el volumen que ocupa el estiércol este periodo de tiempo por lo que en base a lo que ocupa el volumen de la mezcla, se estima el tamaño final.





$$\text{Volumen mezcla en el digestor} = 49,72 \frac{\text{m}^3 \text{ digestor}}{\text{día}} \times 20 \text{ días} = 994,4 \text{ m}^3$$

Suponiendo que la mezcla ocupe el 85% del volumen del digestor, el volumen total de este es:

$$\text{Volumen digestor} = \frac{994,4 \text{ m}^3}{0,85} = 1.169,9 \text{ m}^3$$

## 5.6 Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas

Partimos de la suposición de que esta planta se autoabastece en un 25% y el excedente lo vierte a red con la finalidad de que parte de la energía del municipio sea de origen renovable. Se calcula el equivalente en energía eléctrica renovable del biogás generado [13].

La planta genera 2.113,1 m<sup>3</sup> biogás/día. En base a esto se calcula la energía en forma de gas natural que consumiría y las emisiones de CO<sub>2</sub> correspondientes

$$\begin{aligned} 2.113,1 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}} \times 0,6 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{1 \text{ m}^3} &= 1.267,86 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{\text{día}} \times 365 \text{ días} \\ &= 462.769,65 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Aplicando el factor de conversión para saber los kg de CO<sub>2</sub> emitidos al año:

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ iniciales} = 462.769,65 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{\text{año}} \times 2,15 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} = 994.954,74 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{año}}$$

## 5.7 (Emisiones de CO<sub>2</sub> “equivalentes” al biogás)

Para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas, se restan las equivalentes al % de autoconsumo de la planta

$$\text{Consumo de la planta} = \frac{5.916,69 \frac{\text{kW}}{\text{día}}}{0,25} = 23.666,76 \frac{\text{kW}}{\text{día}}$$

Aplicando las equivalencias respecto a energía eléctrica y gas natural que aplican al biogás:

$$\begin{aligned} 23.666,76 \frac{\text{kW}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{6,8 \text{ kW energía eléctrica}} \times \frac{0,6 \text{ m}^3 \text{ gas natural}}{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}} \\ = 2.088,24 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{\text{día}} \times 365 \text{ días} = 762.208,82 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{\text{año}} \end{aligned}$$



*Consumo que la planta necesita de gas natural = Consumo total – Autoconsumo*

$$\begin{aligned} &= 762.208,82 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{\text{año}} - 462.769,65 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{\text{año}} \\ &= 299.412,17 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\text{Emisiones } CO_2 = 299.412,17 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{\text{año}} \times 2,15 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} = 643.736,17 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{año}}$$

*Emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes usando de gas natural*

Por último, se calculan las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas como diferencia entre las emisiones que generaría el uso de la energía proveniente del biogás (que serían nulas al tratarse de una fuente de energía renovable) y las emisiones del gas natural que necesita la planta ya que solo se abastece en un 25%

*Emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas*

*= Emisiones equivalentes al biogás*

*– Emisiones equivalentes al gas natural necesario*

$$= 994.954,74 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{año}} - 643.736,17 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{año}} = 351.218,57 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{año}}$$

## 5.8 Cálculo rentabilidad de la planta

### 5.8.1 Análisis de costes

A la hora de calcular los costes de la planta de biogás se toman una serie de consideraciones.

Los costes directos son aquellos relacionados con la producción o venta de productos finales, son directamente proporcionales al volumen de producción. Los costes indirectos no tienen una relación directa con la producción.

Primero se analizan los costes de inversión necesarios para la construcción de la planta. En cuanto a estimaciones de costes directos:

Terrenos y bienes naturales: se estima el precio de la superficie rústica en la población de VIC de Barcelona a 3,5 €/m<sup>2</sup> [55] y la superficie necesaria para la instalación de la planta en 30.000 m<sup>2</sup> contando con espacio de almacenaje, oficina de gestión y terreno adicional a la planta en sí.

Por otra parte, el transporte se estima en un 1% del coste de la maquinaria y los equipos. Además, se añaden costes por imprevistos que puedan surgir en el proceso de la instalación y se estiman en un 1% del coste de esta.

En la Tabla 8 se recogen desglosados los costes de inversión (tanto directos como indirectos)

<b>COSTES DE INVERSIÓN</b>	
<b>COSTES DIRECTOS (€)</b>	
Terrenos y bienes naturales	105.000
Construcciones	140.000
Instalaciones técnicas	5.000
Maquinaria, equipos y elementos de instalación	700.000
Mobiliario	2.500
Equipos de oficina	3.500
Transporte	7000
Imprevistos de construcción	1400
<b>Total</b>	<b>964.400</b>
<b>COSTES INDIRECTOS (€)</b>	
Patentes	200
Licencias y permisos	30.200
<b>Total</b>	<b>30.400</b>
<b>TOTAL COSTES INVERSIÓN</b>	<b>994.800</b>
<b>TOTAL COSTES INVERSIÓN + IVA (21%)</b>	<b>1.203.708</b>

Tabla 8 Costes de inversión

Una vez estimados los costes de inversión es necesario estimar los costes anuales de producción y mantenimiento de la planta.

En primer lugar, se calcula el salario de los trabajadores (Tabla 9):

<b>GASTOS DE PERSONAL DE SUPERVISIÓN Y MANTENIMIENTO</b>		
Puesto de trabajo	Numero de trabajadores	Coste total
Supervisión (30.000€/año)		
Ingeniero	1	30.000
Mantenimiento (24.500€/año)		
Técnicos	2	49.000
Responsable de administración (26.000 €/año)	1	24.500
Vigilante seguridad (20.000€/año)	2	40.000
<b>Total</b>		<b>143.500</b>

Tabla 9 Gastos de personal de supervisión y mantenimiento

Otro de los gastos a tener en cuenta es el de los seguros, que se estima en un 0,5% de los costes de la maquinaria y los equipos. Por último, también es necesario contemplar gastos extra de administración por posibles contingencias que puedan surgir en el proceso. Esto se estima en un 0,05% sobre los costes totales directos. En la Tabla 10 se pueden ver todos los costes anuales de operación.

<b>COSTES ANUALES</b>	
<b>COSTES DIRECTOS (€)</b>	
Salarios	143.500
Abastecimiento de agua	17.331
Electricidad	73.734
Materia prima (estiércol)	223.780
<b>Total</b>	<b>458.345</b>
<b>COSTES INDIRECTOS (€)</b>	
Seguros	3.500
Gastos extras de administración	2.292
<b>Total</b>	<b>5.792</b>
<b>TOTAL COSTES INVERSIÓN</b>	<b>464.137</b>
<b>TOTAL COSTES INVERSIÓN + IVA</b>	<b>561.606</b>

Tabla 10 Costes anuales

### 5.8.2 Análisis de ingresos

El único ingreso de la planta será la venta de energía. Esta se ha calculado en base al precio actual de la energía (0,335 €/kW) [54] y la cantidad total generada (5.916,69 kW/día), obteniéndose así unos ingresos de 723.463 €/d.

### 5.8.3 Análisis de rentabilidad

Se calcula la rentabilidad de la planta desde el año que se realiza la inversión (siendo el año 0) hasta 8 años después, aplicando un interés del 4%.

En la tabla que se muestra a continuación se reflejan los flujos de caja y así como el VAN calculado con la siguiente fórmula:

$$VAN = I_0 + \sum_0^{\text{años}} \frac{(Q_n)}{(1 - k)^n}$$

Donde:

$I_0$  es la inversión inicial

$Q_n$  son los flujos de caja correspondientes al año

$k$  es el tipo de interés

En la Tabla 11 se muestra la evolución del VAN y el TIR para 8 años de vida útil de la planta.

VIABILIDAD DEL PROYECTO	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Costes de inversión	-1.203.708								
Costes anuales		-561.606	-561.606	-561.606	-561.606	-561.606	-561.606	-561.606	-561.606
Ingresos por venta de energía		723.463	723.463	723.463	723.463	723.463	723.463	723.463	723.463
Flujos de caja	-1.203.708	161.857	161.857	161.857	161.857	161.857	161.857	161.857	161.857
<b>VAN</b>	<b>1.855.510</b>								
<b>TIR</b>	<b>2%</b>								

Tabla 11 Viabilidad del proyecto sin subvención

El TIR es la Tasa Interna de Retorno, es decir, el porcentaje de beneficio o pérdida de la inversión. En el caso en el que se debe asumir el total de la inversión, el TIR indica que el beneficio de la planta es muy bajo (2%).

Debido al bajo beneficio de la planta se va a analizar otro supuesto, en el que se tengan en cuenta ayudas estatales. Si se aplican las subvenciones de la “Orden TED/706/2022 (que aprueba las bases reguladoras y programas de incentivos para la concesión de ayudas a proyectos singulares de la instalación de biogás en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia)”, el supuesto 2 contaría con una reducción del 70% de los costes. Además, en esta orden se otorga una ayuda extra relacionada al tamaño de la empresa, siendo del 10% a empresas medianas y del 20% a grandes empresas. En cómputo global la planta de biogás contaría con una subvención del 90%. Los costes que quedan subvencionados y los que se deberían pagar son los mostrados en la Tabla 12:

<b>Financiación del gobierno (90%)</b>	895.320
<b>Coste de inversión contando con la financiación</b>	99.480

Tabla 12 Subvención del proyecto

Teniendo en cuenta estas ayudas aportadas por el Gobierno de España, se ha recalculado el VAN y el TIR del proyecto (Tabla 13):

VIABILIDAD DEL PROYECTO	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Costes de inversión	-99.480								
Costes anuales		-561.606	-561.606	-561.606	-561.606	-561.606	-561.606	-561.606	-561.606
Ingresos por venta de energía		723.463	723.463	723.463	723.463	723.463	723.463	723.463	723.463
Flujos de caja	-99.480	161.857	161.857	161.857	161.857	161.857	161.857	161.857	161.857
<b>VAN</b>	<b>1.855.510</b>								
<b>TIR</b>	<b>163%</b>								

Tabla 13 Viabilidad del proyecto con subvención

Como se puede comprobar, el TIR final de la planta es mucho mayor que en el caso de no aplicar la subvención llegando al 163%.

Como conclusión meramente económica de estos resultados, se puede señalar que el principal escollo del biogás en España es que, sin subvenciones, la rentabilidad de las plantas es muy reducida en un plazo “corto” de 8 años. Gracias a subvenciones esta tecnología puede desarrollarse en mayor medida al resultar más atractiva para las empresas.

Sin embargo, teniendo en cuenta la contribución de esta tecnología en el ámbito medioambiental como fuente de energía renovable, así como su valor dentro de la economía sostenible y circular, la instalación de plantas de biogás como la que planteamos resulta altamente interesante. Además, se inscribe dentro de la agenda medioambiental europea a medio y largo plazo.

## 5.9 Análisis DAFO

Con el fin de resumir los aspectos clave de este apartado, y teniendo en cuenta el contexto y los aspectos mencionados anteriormente, se realiza un análisis de las debilidades, fortalezas, amenazas y oportunidades del biogás como fuente de energía.

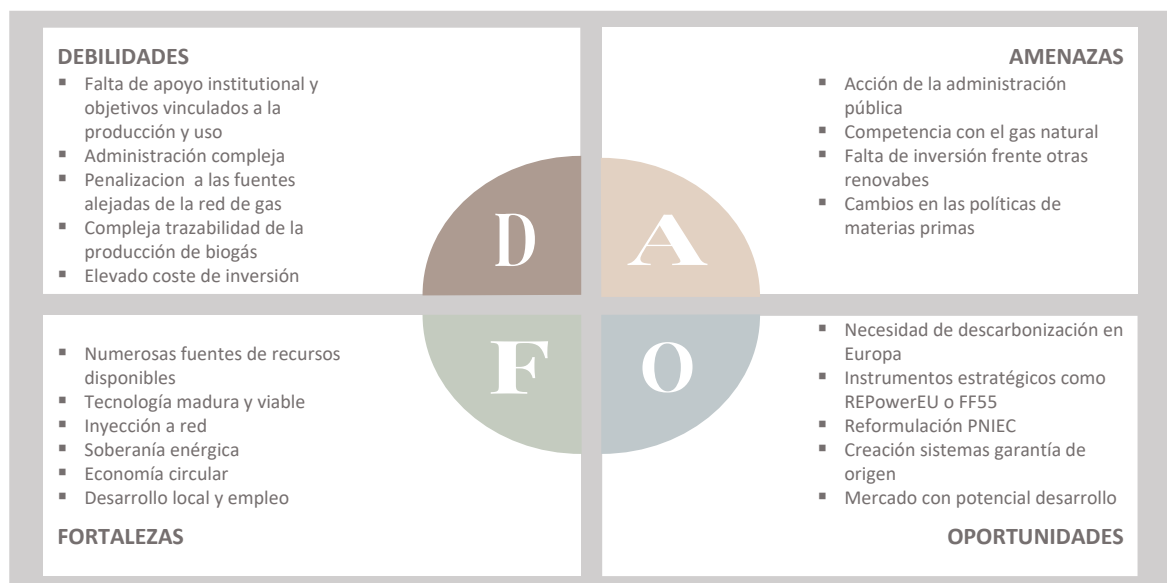


Figura 30 Análisis DAFO

De forma detallada se explican las 4 claves del análisis.

El biogás cuenta con bastantes **puntos fuertes**. El principal de todos es la variedad de biomasa disponible, ya que, como se ha descrito en la teoría, son varias las materias primas que se pueden emplear. Además, debido al carácter rural España y su potente industria alimentaria, existen muchas explotaciones susceptibles de acoger una instalación de biogás. Otro de los factores positivo es la extensa red gasística del país, por lo que el biometano puede ser utilizado también lejos de la planta y para diversas aplicaciones. La tecnología es madura y viable económicamente, más que otras tecnologías como el hidrógeno. Otra de las cuestiones más importantes es la economía circular que poner en marcha gracias al proceso de valorización de residuos y el subproducto generado.

Algunas **debilidades** son la falta de apoyo político e institucional en España. Aunque se haya realizado ya la mencionada “Hoja de Ruta” hace falta un mayor respaldo. También se considera necesario establecer unos objetivos de uso del digestato generado. La tramitación es compleja y los promotores a día de hoy no disponen de la formación suficiente ni de recursos humanos dedicados al desarrollo de los proyectos. La trazabilidad de la producción también es complicada, lo que supone un problema para estimar la huella de carbono producida, además que esta varía en función de las materias primas. Entre los puntos desfavorables del biogás destaca el elevado coste de inversión, lo que hace que pierda competitividad frente al gas natural, así como la falta de incentivos económicos.

Como tercer punto a tratar se habla de las **debilidades**. A día de hoy el contexto en el que se desarrolla esta tecnología es favorecedor en el sentido de que la descarbonización es cada vez es más importante en Europa. Debido a la guerra de Ucrania, la inversión en tecnologías que ayuden a la independencia energética es cada vez es mayor. Esto ha dado lugar a Planes de Acción como *Fit for 55* o *REPowerUE*, además de la Hoja de Ruta del Biogás a nivel nacional. Cabe mencionar la publicación de las garantías de origen del biogás en 2022, asegurando que el gas generado es renovable. El mercado favorece ya que tiene gran potencial y se puede utilizar la infraestructura gasista ya instalada y operativa. A nivel político, el biogás también se ajusta a la economía circular que marcan las agendas medioambientales y cuenta con la posibilidad de utilizar el CO<sub>2</sub>eq generado.

Por último, queda mencionar las **amenazas** a las que se enfrenta el biogás. Los dos principales problemas son la Administración pública y la competencia directa con el gas natural. Los cambios en la legislación promovidos por entidades públicas son muy lentos debido a todos los trámites necesarios y a los pocos actores realmente expertos en esta materia, sumado a que ya de por si la formación en esto es escasa. Además, en relación a residuos y materia orgánica, la legislación es distinta en cada comunidad autónoma. En cuanto a la competencia con el gas natural, al compararlos, se considera que frente a éste el biogás no es rentable. Ante esto una posible propuesta sería que el biogás recibiese una valoración extra por aportar cuestiones positivas como la economía circular o la sostenibilidad. A nivel económico son necesarias más ayudas comparado con otras energías renovables como la solar y la eólica, o incluso frente al hidrógeno. Otra de las muchas amenazas son los recurrentes cambios en la legislación de la materia prima, como puede ser cambios en la política de desperdicio de alimentos o la ganadera.

## 6 CONCLUSIONES

Como se expuso al inicio de este trabajo, España tiene un gran potencial en la producción de energía basada en el biogás y el biometano. El Gobierno de España, siguiendo directrices europeas, ha previsto subvenciones en apoyo de esta y otras energías renovables. Entre los países vecinos destaca Alemania con una superior densidad de plantas de biogás, mientras que Francia y Reino Unido las multiplican a buen ritmo en los últimos años.

Aunque en España ya se están tomando medidas para la promoción del biogás y biometano, conscientes de que favorecen la economía circular y contribuye a la descarbonización de la industria,

un mayor impulso de la biogeneración generaría efectos positivos también en el empleo. De hecho, los objetivos en esta materia marcados en la Agenda 2030 y 2050 son ambiciosos, pero los expertos aseguran que, dado el ritmo de crecimiento que ya experimentamos, podríamos ser aún más sobresalientes.

Gracias a la gran cantidad de RSU, restos orgánicos de animales o biomasa forestal, la excelente infraestructura de conexión a red eléctrica, las ayudas económicas ofrecidas por las entidades competentes y el interés que ya muestran numerosas empresas que ya comienzan a desarrollar proyectos en el sector, el biogás y el biometano ocupan una posición estratégica. Y más teniendo en cuenta que este mercado no está tan saturado como el de la energía fotovoltaica.

En base al estudio realizado que nos ha permitido una buena aproximación a la situación energética actual en España, podemos concluir que el biogás y el biometano son energías renovables con un gran potencial que se ajustan a los parámetros del modelo energético que plantean las políticas medioambientales y tienen un largo camino por recorrer.

Tras el análisis DAFO descubrimos algunas debilidades de esta tecnología, como la difícil trazabilidad de su producción o el elevado coste de inversión en las infraestructuras necesarias. Sin embargo, presenta fortalezas sólidas, como la gran disponibilidad de recursos para su generación. Este es un factor especialmente ventajoso ya que, a diferencia de la biomasa para combustión térmica o eléctrica donde el suministro es más limitado -caso de la producción de pellets y su dificultad para conseguirlos, la instalación de una planta de biogás es una tecnología especialmente adecuada a la industria agroalimentaria en España. Con ella da salida a gran parte de los residuos que genera y tiene un retorno en energía y fertilizantes, impulsando así su economía circular y cadena de valor. En el caso de la industria química el caso es parecido, ya que el uso de gases de origen renovable como el biometano o el hidrogeno son muy demandados.

Además, otra de las ventajas que hacen que esta tecnología sea muy competitiva respecto a las demás, es que, a pesar de sus elevados costes de inversión, puede aprovechar la infraestructura gasista ya operativa.

La digestión anaerobia y consecuente obtención de biogás es considerada reciclaje integral gracias a la valorización de los residuos orgánicos de la zona geográfica donde son localizados. Las ventajas del proceso son la obtención de biogás, considerado una fuente de energía renovable, y el digestato que se genera el proceso como subproducto y que puede actuar como fertilizante orgánico en usos agrícolas. Sin embargo, la digestión anaerobia no elimina por completo la concentración de nitrógeno o fósforo, por lo que antes de utilizar este digestato debe ser estudiado. En todo caso, a la facturación proveniente de la generación de energía, se puede sumar la que podría provenir del digestato convenientemente tratado. Además, el hecho de poder concentrar en una sola instalación todos los residuos de una zona para su tratamiento permite ahorrar en costes de inversión y operación si se compara con el tratamiento de cada uno por separado.

En definitiva, el biogás podría convertirse en una gran oportunidad en España, ya que minoraría el problema de la gestión de residuos convirtiéndolos en una gran fuente de energía sometiéndose a la



valorización energética. El hecho de que esta tecnología favorezca la economía circular y la descarbonización, y cuente con grandes ayudas por parte del Gobierno, hacen que resulte una fuente de energía realmente estratégica.

La instalación de la planta de biogás, por su parte, puede ser una solución eficiente para la producción de energía aprovechando residuos. Sin embargo, como se ha visto en los resultados, sin contar con las correspondientes ayudas del Gobierno, el elevado coste de la instalación apenas podría ser amortizado en un periodo de 8 años y sería poco rentable. A pesar de tener un VAN positivo (1.855.519), un TIR del 2% es muy bajo. Contando con las subvenciones estatales del 90% el TIR alcanza, lógicamente, un valor mucho más elevado, del 163%, por lo que el proyecto es más rentable.

Esto hace pensar que las plantas de biogás son soluciones eficientes, pero con los elevados costes de inversión para la energía que se puede extraer de ellos.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de industria, turismo y comercio (2010), *La energía en España*. Secretaría de Estado y energía ([https://energia.gob.es/balances/Balances/LibrosEnergia/Energia\\_Espana\\_2010\\_2ed.pdf](https://energia.gob.es/balances/Balances/LibrosEnergia/Energia_Espana_2010_2ed.pdf)). Accedido el 4 de noviembre de 2022. Accedido Nov 4, 2022.
- [2] La Moncloa (Febrero, 2019). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (<https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/Paginas/enlaces/220219-plan.aspx#:~:text=Para%20el%20año%202030%2C%20se,cantidades%20menores%20de%20otras%20tecnolog%C3%ADas>). Accedido Nov 4, 2022.
- [3] Secretaría de Estado de Energía, (Marzo, 2022). *Hoja de Ruta del Biogás* ([https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/00HR\\_Biogas\\_V6.pdf](https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf)). Accedido Nov 6. 2022
- [4] PwC (Julio, 2022). *El biogás y el biometano como palanca clave en la descarbonización de la economía española* (<https://www.fundacionnaturgy.org/publicacion/el-biogas-y-el-biometano-como-palanca-clave-en-la-descarbonizacion-de-la-economia-espanola>) Accedido Nov 6. 2022
- [5] Ministerio de Agricultura, Pesca y Ganadería (2022). *Sección VI Plantas de biogás* ([https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/sanidad-animal-higiene-ganadera/06\\_pbiogas\\_2022\\_tcm30-442924.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/sanidad-animal-higiene-ganadera/06_pbiogas_2022_tcm30-442924.pdf)) Accedido Nov 8. 2022.
- [6] El País (Octubre, 2022), *El biogás pone de acuerdo a todos* (<https://elpais.com/sociedad/repensemos/2022-10-10/el-biogas-pone-de-acuerdo-a-todos.html>). Accedido Nov 11. 2022.
- [7] RETAMA Revista Técnica de Medio Ambiente (Enero, 2022) *España contará con 64 plantas de biometano en 2024* (<https://www.retama.es/actualidad/espana-contara-64-plantas-biometano-2024>) Accedido Nov 15 2022.
- [8] AEBIG Asociación Española de Biogás, *Biometano* (<https://www.aebig.org/biometano/>) Accedido Nov 17. 2002.

- [9] IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (Octubre, 2007), *Biomasa, digestores anaerobios* ([https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones\\_idae/documentos\\_10737\\_biomasa\\_digestores\\_anaerobios\\_a2007\\_0d62926d.pdf](https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_digestores_anaerobios_a2007_0d62926d.pdf)). Accedido Nov 20. 2022.
- [10] CORDIS (Servicio de Información Comunitario sobre Investigación y Desarrollo) (Noviembre, 2020), *Biomasa de algas: favorecer sus nuevos usos como alimento, pienso y carburante* (<https://cordis.europa.eu/article/id/423112-algae-biomass-unlocking-new-uses-as-food-feed-and-fuel/es>). Accedido Nov 22.2022.
- [11] E-Ficiencia (Julio, 2022) *¿Qué es la biomasa?- Conoce los tipos de biomasa* (<https://e-ficiencia.com/que-es-la-biomasa/>). Accedido Nov 24. 2022.
- [12] Archana Kasinatha, Sylwia Fudala-Ksiazekb, Malgorzata Szopinskaa, Hubert Bylinska, Wojciech Artichowicz, Anna Remiszewska-Skwarek, Aneta Luczkiewicz (2021), *Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion* (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121007887>). Accedido Dic 2.2022.
- [13] Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, *El Sector del Biogás Agroindustrial en España* ([https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010\\_tcm30-110139.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm30-110139.pdf)). Accedido Dic 4.2022
- [14] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, *Listado exhaustivo de los subproductos animales incluidos en cada categoría de SANDACH*, ([https://www.ulpgc.es/sites/default/files/ArchivosULPGC/Servicio%20de%20Prevencion%20de%20Risgos/clasificacion\\_sandach.pdf](https://www.ulpgc.es/sites/default/files/ArchivosULPGC/Servicio%20de%20Prevencion%20de%20Risgos/clasificacion_sandach.pdf)). Accedido Dic 4.2022
- [15] Digestión anaerobia ([https://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04\\_42.htm](https://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04_42.htm)). Accedido Dic 4.2022
- [16] Química.es, *Demanda Química de Oxígeno* ([https://www.quimica.es/enciclopedia/Demanda\\_qu%C3%ADmica\\_de\\_ox%C3%ADgeno.html](https://www.quimica.es/enciclopedia/Demanda_qu%C3%ADmica_de_ox%C3%ADgeno.html)). Accedido Dic 7.2022
- [17] Wikipedia, *Poder calorífico* ([https://es.wikipedia.org/wiki/Poder\\_calor%C3%ADfico](https://es.wikipedia.org/wiki/Poder_calor%C3%ADfico)). Accedido Dic 7.2022
- [18] Wikipedia, *Energía primaria* ([https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_primaria](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_primaria)). Accedido Dic 7.2022
- [19] Agencia Energética del Gobierno Vasco, *Biometano* (<https://www.eve.eus/Actuaciones/Actuaciones/Biometano?lang=es-es>). Accedido Dic 7.2022
- [20] Energías renovables (Diciembre, 2022) *El biogás cubre el 4,5% del consumo de gas de la Unión Europea en 2021* (<https://www.energias-renovables.com/bioenergia/mas-de-700-alegaciones-a-la-planta-20221209-1>). Accedido Dic 7.2022.
- [21] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile (2011), *Manual del Biogás*. Accedido Dic 9.2022
- [22] Genia Bioenergy, *Qué es la economía circular y por qué es la solución para la industria alimenticia* (<https://geniabienergy.com/economia-circular-para-industria-alimenticia/>) Accedido Dic 9.2022

- [23] Real Decreto 47/2022 de 18 de enero sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias (BOE» núm. 17, de 20 de enero de 2022) (<https://www.boe.es/buscar/pdf/2022/BOE-A-2022-860-consolidado.pdf>). Accedido Dic 10.2022
- [24] Servimedia (Junio, 2023), *Castilla y León, Andalucía, Castilla-La Mancha, Cataluña y Aragón, las comunidades con mayor potencial para producir biogás* (<https://www.servimedia.es/noticias/castilla-leon-andalucia-castilla-mancha-cataluna-aragon-comunidades-mayor-potencial-para-producir-biogas/3713195>). Accedido Dic 10 .2022
- [25] Genia Bioenergy, *¿Qué residuos son los mejores para obtener biogás?* (<https://geniobioenergy.com/residuos-mejores-obtener-biogas/>). Accedido Dic 14.2022
- [26] Instituto Nacional de Estadística (2020), *Explotaciones ganaderas por tipo de ganado y tamaño según unidades ganaderas totales (UGT)* (<https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?tpx=51256&L=0>). Accedido Dic 7.2022
- [27] RETAMA Revista Técnica de Medio Ambiente (Febrero, 2022) *Cataluña trabaja en un plan para fomentar la producción de biogás* (<https://www.retema.es/actualidad/cataluna-trabaja-un-plan-fomentar-produccion-biogas>). Accedido Dic 16. 2022
- [28] Energías Renovables (Marzo, 2023) *El nuevo Plan de Biogás de Cataluña quiere crear 90 plantas antes de 2030* (<https://www.energias-renovables.com/bioenergia/el-nuevo-plan-de-biogas-de-cataluna-20230331>) Accedido Mar 23. 2023
- [29] Universitat de Vic (Abril, 2023) *El auge del biogás abre la puerta a un nuevo modelo de planta centralizada para gestionar y valorizar las deyecciones ganaderas en Osona* (<https://www.uvic.cat/es/noticias/el-auge-del-biogas-abre-la-puerta-a-un-nuevo-modelo-de-planta-centralizada-para-gestionar>) Accedido Abr.24. 2023
- [30] Idescat (Abril, 2023) *Vic, Osona* (<https://www.idescat.cat/emex/?lang=es&id=082981>) Accedido Abr 24. 2023
- [31] Gencat Instituto Catalán de Energía, *Consumos energéticos por municipio i sector* (<https://icaen.gencat.cat/es/energia/estadistiques/resultats/anuals/page/>) Accedido Abr 24.2023
- [32] Red Eléctrica Española (Diciembre, 2005) *Sistema eléctrico ibérico* (<https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/maptra2005.pdf>) Accedido Feb 18. 2023
- [33] Recytrans, Soluciones integrales para el reciclaje (Octubre, 2020) *¿Cómo funcionan las plantas de biogás?*( <https://www.recytrans.com/blog/como-funcionan-las-plantas-de-biogas/>) Accedido Feb 23.2023
- [34] Fundación Aquae (Marzo, 2021) *Descubre todos los detalles acerca del biodigestor* (<https://www.fundacionaquae.org/wiki/biodigestor/#:~:text=Existen%20diferentes%20tipos%20de%20biodigestores.%2C%20semicontinuo%2C%20continuo%20y%20familiar>) Accedido Feb 10.2023
- [35] Residuos profesional (Julio, 2022) *¿cómo conseguir una alimentación óptima del digestor de una planta de biogás?* (<https://www.residuosprofesional.com/alimentacion-digestor-planta-biogas/>) Accedido Feb 10.2023
- [36] Genia Bioenergy, *Sistemas de inyección de biogás en la red* (<https://geniobioenergy.com/sistemas-de-inyeccion-de-biogas-en-la-red/>) Accedido Feb 12.2023

- [37] Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO), *Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales*
- [38] Dicciomed, *significado sintrofia* (<https://dicciomed.usal.es/palabra/sintrofia>) Accedido Feb 12.2023
- [37] Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO), *Valorización energética:*
- [39] Wikipedia, significado de “*hidrólisis*” (<https://es.wikipedia.org/wiki/Hidrólisis>) Accedido Feb 12.2023
- [37] Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO), *Valorización energética:*
- [40] Wikipedia, significado de “*acidogénesis*” (<https://es.wikipedia.org/wiki/Acidogénesis>) Accedido Feb 12.2023
- [37] Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO), *Valorización energética:*
- [41] Quimipedia, *Alcalinidad* (<https://www.vadequimica.com/quimipedia/a/alcalinidad/>) Accedido Feb 12.2023
- [37] Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO), *Valorización energética:*
- [42] Genia Bioenergy, *¿Qué es un digestor y para qué sirve?* (<https://geniabienergy.com/que-es-un-digestor/>) Accedido Feb 12.2023
- [37] Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO), *Valorización energética:*
- [43] IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (2011), *Situación y potencial de generación de biogás* ([https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e16\\_biogas\\_db43a675.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf)) Accedido Feb 12.2023
- [37] Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO), *Valorización energética:*
- [44] Agencia Andaluza de la Energía (Septiembre, 2011) *Estudio básico del biogás* ([https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/estudio\\_basico\\_del\\_biogas\\_0.pdf](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/estudio_basico_del_biogas_0.pdf)) Accedido Feb 15.2023
- [37] Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO), *Valorización energética:*
- [45] Aguas claras energía, *Reactor UASB: sepa que es y como funciona* (<https://aguasclarasengenharia.com.br/reactor-uasb-sepa-que-es-y-como-funciona/>) Accedido feb 20. 2023
- [46] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, *Lodos de depuración de aguas residuales* (<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/>) Accedido Feb 21.2023
- [47] RETAMA Revista Técnica de Medio Ambiente (Marzo, 2021) *Los planes europeos para el biogás deben incluir el digestato* (<https://www.retama.es/actualidad/los-planes-europeos-para-el-biogas-deben-incluir-el-digestato>) Accedido Mar 3. 2023
- [48] Genia Bioenergy, *¿Qué son los sustratos?* (<https://geniabienergy.com/que-son-los-sustratos/>) Accedido Abr 10.2023
- [49] Idescat (2021), *Cabezas de ganado bovino. Provincias* (<https://www.idescat.cat/indicadors/?id=aec&n=15428&lang=es>) Accedido Abr 10.2023

[50] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, *Hojas divulgadoras: El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente* ([https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd\\_1994\\_01.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1994_01.pdf)) Accedido Abr 10.2023

[51] Transporterra, *Abono orgánico (estiércol)* (<https://www.transporterra.com/es/abono/54-estiercol.html>) Accedido Abr 11. 2023

[52] Liliana del Pilar Castro-Molano\*; Yilber Alexander Parrales-Ramírez; Humberto Escalante-Hernández, Revista ION (Noviembre, 2019) *Co-digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos* Accedido Abr 13.2023

[53] Tarifasdeagua, *¿Cuánto cuesta el agua en España?* (<https://tarifasdeagua.es/info/precio>) Accedido Abr 15.2023

[54] Datosmacro (Diciembre, 2022) *Crece el precio de la electricidad en España* (<https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-precio-hogares/espana>) Accedido Abr 15.2023

[55] Valoración Fincas (Abril, 2021) *Precios de los terrenos rústicos en Cataluña* (<https://valoracionfincas.es/precios-terrenos-rusticos-cataluna/>) Accedido Abr 15.2023