



UNIVERSIDAD PONTIFICIA
COMILLAS ESCUELA
TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA ICAI

Trabajo Fin de Grado

Estudio del potencial del biogás en el mercado
energético español y del desarrollo de
certificados verdes de biometano.

Caso de aplicación al análisis coste beneficio de
una instalación estándar de biometano

Autor: Ricardo San Martín Ríos

Supervisor: Daniel Fernández Alonso

+34 633869108

+34 608093892

201801141@alu.comillas.edu

daniel.fernandez@engie.com

Madrid

11 de julio 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título: **Estudio del potencial del biogás en el mercado energético español y del desarrollo de certificados verdes de biometano**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico ...**2021-22**... es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada

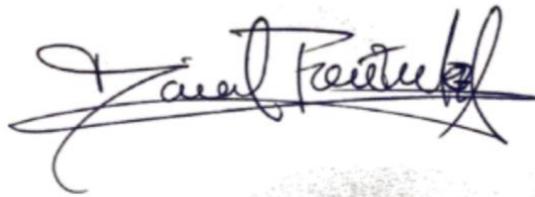
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Ricardo San Martín Ríos Fecha: 11/ 07/ 2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Daniel Fernández Alonso Fecha: 11/ 07/ 2022



UNIVERSIDAD PONTIFICIA
COMILLAS ESCUELA
TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA ICAI

Trabajo Fin de Grado

Estudio del potencial del biogás en el mercado
energético español y del desarrollo de
certificados verdes de biometano.

Caso de aplicación al análisis coste beneficio de
una instalación estándar de biometano

Autor: Ricardo San Martín Ríos

Supervisor: Daniel Fernández Alonso

+34 633869108

+34 608093892

201801141@alu.comillas.edu

daniel.fernandez@engie.com

Madrid

11 de julio 2022

ESTUDIO DEL POTENCIAL DEL BIOGÁS EN EL MERCADO ESPAÑOL Y DEL DESARROLLO DE CERTIFICADOS VERDE DE BIOMETANO.

CASO DE APLICACIÓN AL ANALISIS COSTE BENEFICIO DE UNA INSTALACION ESTANDAR DE BIOMETANO

Autor: Ricardo San Martín Ríos.

Director: Daniel Fernández Alonso

Entidad Colaboradora: Engie

RESUMEN DEL PROYECTO:

La sociedad actual vive sometida a una dependencia absoluta de electricidad. Desde el encendido de una lámpara hasta el control automático de una central nuclear, la electricidad se ha convertido en una necesidad capaz de someter al mundo al colapso en caso de escasez de la misma. Sin duda ninguna el desarrollo social y el crecimiento económico pasa por un acceso cada vez más global a la energía, y más en concreto a la electricidad.

En el universo existen múltiples fuentes de energía muy poderosas que podrían abastecer con energía suficiente para alimentar de electricidad a toda la población mundial. El problema reside en la transformación de esa energía en electricidad.

A día de hoy, la tecnología utilizada para transformar energías como la solar o la eólica en electricidad presenta todavía grandes barreras tecnológicas a la hora de almacenar la producción y de garantizar su disponibilidad todas las horas del año. A causa de esto,



Figura 1: Generación mundial de electricidad según su fuente en 2018 (total 26,7 PWh)

nos vemos todavía absolutamente dependientes de fuentes de energía no renovables con impactos muy adversos a la ecología y al bienestar climático. El 61% de la generación mundial de electricidad proviene de recursos no renovables como la procedente de combustibles fósiles.

Existe pues, una gran demanda de métodos de generación de energía innovadores, ecológicos, sostenibles y eficientes para crear una transición hacia un mundo de energía verde. No es suficiente con la generación eólica, hidráulica o solar. De ahí el atractivo de estudiar soluciones de generación de electricidad partiendo de residuos naturales como el biogás.

La generación de electricidad a partir de biomasa permite, en paralelo, dar viabilidad a gran problema con la gestión de residuos. En una sociedad de consumo como la actual, los residuos se ven multiplicados de una manera que puede considerarse insostenible. Hoy en día, se generan alrededor de 242 millones de toneladas de residuos plásticos al año. Existe una isla en mitad del océano pacifico de residuos de entre 710 000 km² y 17 000 000 km². En consecuencia, no debe sorprender observar el alza en popularidad de las tecnologías de reciclado y de empresas que fabrican bienes con materiales reciclados.

De estos dos problemas surge un marco regulatorio europeo y gubernamental basado en el desarrollo y en el impulso de incentivos y planes de ayuda a toda actividad económico que contribuya a la gestión de residuos o a la descarbonización de la industria. Este marco regulatorio crea un escenario idílico para el desarrollo de una tecnología que se basa en el uso de residuos orgánicos para la producción de un recurso energético altamente valorado.

En efecto, la generación de biogás se produce a través del uso de sustratos orgánicos procedentes de numerosas industrias como son las de gestión y tratamiento de aguas residuales, la industria agropecuaria o la industria agroalimentaria. Estas industrias en su actividad económica usual producen un subproducto residual que se convierte en materia prima de la actividad económica de generación de biogás. Contribuyendo de esta forma a una economía circular.

En cuanto al aspecto técnico de la generación de biogás, se produce en un digestor anaerobio en el que se introducen los sustratos orgánicos recolectados. En este digestor, se establecen unas condiciones de presión y temperatura óptimas para el desarrollo de las 4 fases encargadas de generar el biogás. La hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis. Unas sucesivas a las otras, la hidrólisis se encarga de descomponer los compuestos moleculares orgánicos en azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Posteriormente, la acidogénesis y la acetogénesis son procesos bacterianos en los que se descomponen los productos de la hidrólisis en ácidos acéticos y dióxido de carbono,

elementos que servirán como alimento a la metanogénesis. La metanogénesis es la fase más importante de la generación de biogás, en ella se produce el último paso de la digestión generando biogás compuesto por metano y dióxido de carbono.

Como subproducto de la generación de biogás también se tiene el digestato. El digestato es un compuesto orgánico altamente mineralizado resultante del sustrato orgánico inicial tras haberle extraído el biogás por digestión. Este componente puede ser tratado y convertido en fertilizante de alto rendimiento.

Tras la generación de biogás y para conseguir un biogás puro en metano, se somete dicho gas a distintos tratamientos de upgrading. Los tratamientos de upgrading tienen como objetivo el enriquecimiento de metano del biogás gracias a la extracción del CO₂ que lo forma. Numerosas técnicas de extracción como la extracción por membranas, PSA, lavado con agua, adsorción química o criogenia, son capaces de separar los dos elementos generando así un biogás con una concentración de entorno al 99% de metano llamado biometano. Como subproducto de esta actividad, el CO₂ extraído tiene también valor comercial y puede ser utilizado como fuente de ingresos.

Este biometano tiene un gran interés económico ya que puede ser utilizado como alternativa al gas natural importado tras su inyección en la red de distribución de gas natural. En efecto, España importa un 46% del gas natural consumido a Rusia. Con una generación de biometano, no solo se reduciría la importación de países extranjeros, sino que además se reduciría el poder de influencia que tiene el gigante ruso sobre Europa. Adicionalmente, con valores de gas natural en máximos históricos, 145 euros por megavatio hora, la introducción al mercado del biometano valorado a 55 euros por megavatio hora ocasionaría una estabilización de precios drástica en el mercado de gas natural.

El biometano tiene del mismo modo otras ventajas muy relevantes, se puede utilizar como biocombustible líquido tras someterlo a presiones altas o temperaturas muy bajas. En efecto de aquí al año 2050 se prevé lograr una descarbonización del sector de transporte del 97%. Una descarbonización que vendrá impulsada por la electrificación de los vehículos además de la incorporación del biocombustible renovable.

Por último, a través de un estudio económico de dos proyectos de inversión en plantas de generación y tratamiento de biogás se busca analizar costes y beneficios para comentar la viabilidad de la inversión de estos proyectos. El primero se basa en un proyecto simple de generación y tratamiento de biogás que cuenta con un CAPEX de 7 millones de euros y un OPEX a 10 años de 14 millones de euros. Este proyecto comercializa 40 GWh de biometano y 30 toneladas anuales de gránulos de digestato para obtener unos beneficios anuales de 0,27 millones de euros.

El proyecto complejo se basa en una planta de generación y tratamiento de mayor capacidad de biogás y de una planta de tratamiento del digestato. Este proyecto requiere unas inversiones mayores, CAPEX de 21,4 millones de euros y OPEX a 10 años de 63,2 millones de euros. Generando así cada año 24 kilo toneladas de fertilizante orgánico valorado en 140 euros por tonelada, 115 GWh de biometano y 20 kilo toneladas de CO2 valoradas a 36 euros por tonelada. Con estos valores de producción se conseguirían unos beneficios anuales de entorno a 3,5 millones.

STUDY OF THE POTENTIAL OF BIOGAS IN THE SPANISH MARKET AND THE DEVELOPMENT OF GREEN BIOMETHANE CERTIFICATES.

CASE OF APPLICATION TO THE COST-BENEFIT ANALYSIS OF A STANDARD BIOMETHANE INSTALLATION.

Today's society is dependent on electricity. From the lighting of a lamp to the automatic control of a nuclear power plant, electricity has become a necessity capable of bringing the world to collapse in the event of a shortage. There is no doubt that social development and economic growth depends on increasingly global access to energy, and more specifically to electricity.

There are many powerful energy sources in the universe that could provide enough energy to supply the entire world's population with electricity. The problem lies in the transformation of this energy into electricity.

Nowadays, the technology used to transform energy sources such as solar and wind power into electricity still has major technological barriers when it comes to storing production and guaranteeing its availability at all times of the year. Because of this,



Figure 1: Global electricity generation by source in 2018 (total 26.7 PWh)

we are still absolutely dependent on non-renewable energy sources with very adverse impacts on the ecology and climate welfare. 61% of the world's electricity generation comes from non-renewable resources such as fossil fuels.

There is therefore a great demand for innovative, environmentally friendly, sustainable and efficient methods of power generation to create a transition to a green energy world. Wind, hydro, or solar generation is not enough. Hence the attractiveness of exploring solutions for electricity generation from natural waste such as biogas.

The generation of electricity from biomass allows, in parallel, to give viability to a big problem with waste management. In today's consumer society, waste is multiplying in a

way that can be considered unsustainable. Today, around 242 million tonnes of plastic waste are generated every year. There is an island in the middle of the Pacific Ocean of waste of between 710,000 km² and 17,000,000 km². Consequently, it should come as no surprise to observe the rise in popularity of recycling technologies and companies manufacturing goods from recycled materials.

From these two issues arises a European and governmental regulatory framework based on the development and promotion of incentives and support schemes for any economic activity that contributes to waste management or the decarbonisation of industry. This regulatory framework creates an idyllic scenario for the development of a technology based on the use of organic waste for the production of a highly valued energy resource.

Indeed, biogas generation is produced using organic substrates from numerous industries such as wastewater management and treatment, the agricultural industry or the agri-food industry. These industries in their usual economic activity produce a waste by-product that becomes a raw material for the economic activity of biogas generation. Thus contributing to a circular economy.

Regarding the technical aspect of biogas generation, it is produced in an anaerobic digester in which the collected organic substrates are introduced. In this digester, optimal pressure and temperature conditions are established for the development of the 4 phases responsible for generating biogas. Hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis. Hydrolysis is responsible for breaking down organic molecular compounds into sugars, amino acids and fatty acids. Subsequently, acidogenesis and acetogenesis are bacterial processes in which the hydrolysis products are broken down into acetic acids and carbon dioxide, elements that will serve as food for methanogenesis bacteria. Methanogenesis is the most important phase of biogas generation, where the last step of digestion takes place, generating biogas composed of methane and carbon dioxide.

As a by-product of biogas generation, digestate is also produced. Digestate is a highly mineralised organic compound resulting from the initial organic substrate after the biogas has been extracted by digestion. This component can be treated and converted into high-yield fertiliser.

After the generation of biogas and in order to obtain a pure methane biogas, this gas is subjected to various upgrading treatments. The aim of the upgrading treatments is to enrich the methane in the biogas by extracting the CO₂ that forms it. Numerous extraction techniques such as membrane extraction, PSA, water scrubbing, chemical adsorption or cryogenics can separate the two elements, thus generating a biogas with a concentration

of around 99% methane, called biomethane. As a by-product of this activity, the CO₂ extracted also has commercial value and can be used as a source of income.

This biomethane is of great economic interest as it can be used as an alternative to imported natural gas after injection into the natural gas distribution network. Indeed, Spain imports 46% of the natural gas it consumes from Russia. With biomethane generation, not only would imports from foreign countries be reduced, but also the power of influence that the Russian giant has over Europe. In addition, with natural gas values at an all-time high of 145 euros per megawatt hour, the introduction of biomethane to the market at 55 euros per megawatt hour would lead to a drastic price stabilisation in the natural gas market.

Biomethane also has other significant advantages: it can be used as a liquid biofuel after being subjected to high pressures or very low temperatures. Indeed, a 97% decarbonisation of the transport sector is expected to be achieved by 2050. This decarbonisation will be driven by the electrification of vehicles in addition to the incorporation of renewable biofuel.

Finally, through an economic study of two investment projects in biogas generation and treatment plants, the aim is to analyse costs and benefits in order to comment on the viability of investment in these projects. The first is based on a simple biogas generation and treatment plant with a CAPEX of 7 million euros and a 10-year OPEX of 14 million euros. This project commercialises 40 GWh of biomethane and 30 tonnes per year of digestate pellets for an annual profit of EUR 0.27 million.

The complex project is based on a larger biogas generation and treatment plant and a digestate treatment plant. This project requires higher investments, CAPEX of 21.4 million euros and 10-year OPEX of 63.2 million euros. Thus generating each year 24 kilo tonnes of organic fertiliser valued at 140 euros per tonne, 115 GWh of biomethane and 20 kilo tonnes of CO₂ valued at 36 euros per tonne. With these production values, an annual profit of around 3.5 million euros would be achieved.

Índice

0. Anexo B	¡Error! Marcador no definido.
1. Introducción a la biomasa	16
a. Problema mundial	17
i. Contexto histórico:.....	17
b. Análisis de consumo de energías	19
i. Hidráulica	21
ii. Eólica	22
c. Origen de la biomasa.....	24
i. Ciclo de Carbono	24
ii. Del ciclo de carbono a la biomasa.....	26
2. Generación del biogás.....	28
a. Biogás, una oportunidad	29
i. Potencial de consumo de energía y descarbonización	29
ii. Marco regulatorio favorable	31
b. Bioquímica y generación del biogás.....	34
i. Hidrólisis.....	34
ii. Acidogénesis / acetogénesis	35
iii. Metanogénesis	35
c. Parámetros de producción del biogás.....	36
i. Velocidad del proceso	36
ii. Materia Orgánica.....	37
iii. Nutrientes e inhibidores.....	37
iv. Temperatura y pH	38
v. Tiempo de retención	38
d. Fuentes de biomasa o sustratos.....	39
i. Residuo Agropecuario	40
ii. Residuos procedentes de EDAR	42
iii. Residuos agroindustriales	44
iv. FORSU, Fracción orgánica de Residuos Sólidos Urbanos	46
v. Biogás de vertedero	48
3. Tecnologías de producción y uso del biometano.....	50
a. Producción del Biometano	51
i. Acondicionamiento previo	52
ii. Membranas	53

iii.	PSA, Pressure Swing Adsorption	55
iv.	Lavado con agua.....	56
v.	Absorción química.....	57
vi.	Criogenia	58
b.	Usos del biogás.....	59
i.	Inyección a la red	59
ii.	Gas natural vehicular.....	61
iii.	Producción de electricidad.....	62
iv.	Rol del biometano en la economía circular.....	63
4.	Oportunidad financiera España.....	65
a.	Potencial de desarrollo en España	66
i.	Contraste con Europa.....	66
ii.	Recursos disponibles en España.....	69
iii.	Análisis socioeconómico del mercado	71
b.	Análisis financiero	72
i.	Costes de producción del biometano	72
ii.	Valor del gas y coste de su inyección a la red	75
iii.	Oportunidades de inversión en un proyecto de biometano.....	77
5.	Conclusiones.....	84
6.	Bibliografía	89

1. Introducción a la biomasa

a. Problema mundial

El planeta tierra tiene como caparazón una atmosfera compuesta por 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y otros gases. Es llamado caparazón ya que esta sirve de protección frente a meteoritos y asteroides, pero también frente a la radiación solar. En efecto la densidad del aire contenido en la atmosfera actúa de disolvente, gracias a la fuerza de rozamiento causada por los gases de la atmosfera, frente a objetos cuyo rumbo acabarían en colisión con nuestro planeta. Además, esta también es la responsable de filtrar la radiación solar de rayos cuya longitud de onda imposibilitaría el desarrollo de vida en el planeta tierra. Más concretamente, la capa de ozono, que se extiende desde los 15km a los 50km de altitud, es la responsable de absorber entre el 97% y el 99% de la radiación ultravioleta. Una radiación altamente radiactiva, letal para la mayoría de las especies que conforman el ecosistema terrestre.

Sin embargo, la atmosfera cumple también un papel fundamental en cuanto al mantenimiento de la temperatura del planeta tierra. La tierra absorbe la radiación infrarroja proveniente del sol tras pasar a través de la atmosfera. Parte de esta radiación es reflejada, tanto por la propia atmosfera (antes de penetrarla) como por el suelo de la tierra. A su vez, esta radiación reflejada por el suelo tiende a escaparse de la tierra atravesando de nuevo la atmosfera. Sin embargo, una parte de esta es atrapada por la atmosfera. Este fenómeno conocido como “efecto invernadero” es el responsable de que la temperatura media global sea de entorno a los 14,5 °C. Insistiendo en el efecto de la atmosfera sobre dicha radiación. No solo la deja pasar en gran medida, sino que además la retiene de tal forma que la tierra absorbe múltiples incidencias de radiación energética.

¿A qué se debe?

La radiación infrarroja tiene un rango entre 0,7 y 1000 micrómetros, en la tierra se extiende desde los 3 a los 80 micrómetros, y es emitida por cualquier cuerpo cuya temperatura sea superior a los 0 kelvin, es decir, -273 °C. Es también conocida como energía térmica ya que provoca una agitación de las moléculas del cuerpo sobre el que incide. Esta agitación molecular se transmite en un aumento en la temperatura de dicho cuerpo. Este fenómeno es conocido como la transferencia de calor por radiación. Otros modos de transmisión de calor existentes son la convección y conducción.

En la atmosfera, a parte del oxígeno y del nitrógeno, gases como el CO₂, el CH₄ (metano) o el H₂O vapor se ven altamente afectados por la radiación térmica del sol. Estos gases poseen compuestos moleculares de masa importante y son los principales responsables de la absorción de la radiación calentando así de manera importante y generando el efecto invernadero. Es decir, estos gases son conocidos como los “gases de efecto invernadero”.

i. Contexto histórico:

El siglo XIX debutó con una transformación rural y urbana conocida entonces como la revolución industrial que posteriormente pasó a llamarse la *primera revolución industrial*. Gracias al descubrimiento del potencial y al aprendizaje del uso de las fuentes de energía fósil,

principalmente la del carbón, el hombre logró desarrollar una industria mecanizada y transformar la sociedad generando un fuerte éxodo rural. Además, la revolución industrial trajo consigo la creación de la máquina de vapor junto con el ferrocarril, primero en Gran Bretaña, y posteriormente se expandió a Europa. Pese a traer grandes avances y oportunidades de desarrollo, también trajo consigo el comienzo de lo que algunos científicos llaman nuestro fin.

Desde el año 1850 se ha observado un aumento del 48% de la concentración de CO2 en la atmosfera a raíz de actividades humanas. A continuación, se muestra la evolución en emisiones de CO2 de China, India, Rusia, Japón, Estados Unidos y del resto del mundo desde los años 1902 hasta el 2020.

Evolución en las emisiones de CO2 procedentes de combustibles fósiles en China, EEUU, India, Rusia, Japón y el resto del mundo

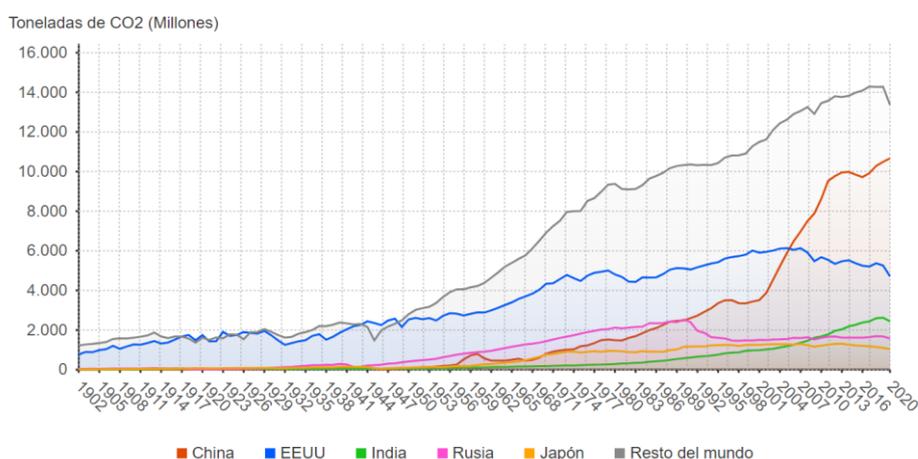


Figura 7 (Fuente: EPDATA)

Este gráfico enseña un fuerte aumento de los gases de efecto invernadero a partir de los años 40. Por consiguiente, al haber más gases de efecto invernadero, el mismo efecto invernadero se ve multiplicado e induce así, una notable variación de temperatura sobre el planeta tierra. A raíz de esto y de múltiples investigaciones y análisis, hoy en día existe una gran preocupación respecto al estado del planeta tierra.

Años después de constatar el problema, múltiples organizaciones y gobiernos han decidido tomar la iniciativa de frenar el efecto invernadero y luchar contra el calentamiento global. La transición hacia energías renovables, es decir, energías sostenibles se ha convertido en una necesidad para combatir el deterioro del medioambiente. Gracias al desarrollo de las COPs, Conferencias de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas, líderes mundiales se reúnen anualmente para tomar decisiones respecto al objetivo de reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Desde la primera en Río del año 92, se ha avanzado mucho en cuanto a investigación, información, y tecnología para luchar contra el calentamiento. En 2015 el acuerdo de París formalizó un tratado global en el que participaron casi 200 países con el objetivo de crear un plan de acción hacia el desarrollo de un modelo de gobierno bajo en emisiones.

Con estas preocupaciones tanto medioambientales como geopolíticas, existe un claro auge en los métodos de producción de energía. Buscando siempre a través de la innovación y del desarrollo, la sustitución de las fuentes de energía contaminantes por otras renovables como

pueden ser la hidráulica, la eólica o en nuestro caso la Biomasa. Para entender esta transición es necesario primero entender el reparto establecido de consumo de energías en el mundo actualmente y analizar posibles oportunidades de mercado.

b. Análisis de consumo de energías

El planeta tierra está repleto de fuentes de energía, unas más accesibles, otras más eficientes. Vivimos en una sociedad de consumo en la que la electricidad se ha convertido en un bien incuestionable sin el cual nos hundiríamos en la miseria. Desde el encendido de una lámpara, de un microondas o incluso desde el uso de nuestro teléfono móvil, la electricidad se usa en prácticamente todas las actividades del día a día de una persona. El problema reside en la manera de generar esta electricidad.

Una electricidad que ha sido generada de manera descontrolada desde la primera revolución industrial en los años 1850 provocando grandes humaredas negras como la emblemática Gran Niebla de Londres del 5 al 9 de diciembre de 1952. Este trágico episodio en la historia británica permitió concienciar al entonces primer ministro Winston Churchill de los peligros para la salud de las personas que constituían las industrias de carbón de la ciudad. No fue hasta muchos años después que se supo que también era nocivo para el medio ambiente.

A continuación, se muestra la distribución de fuentes de energía utilizadas para la generación de electricidad en el mundo.

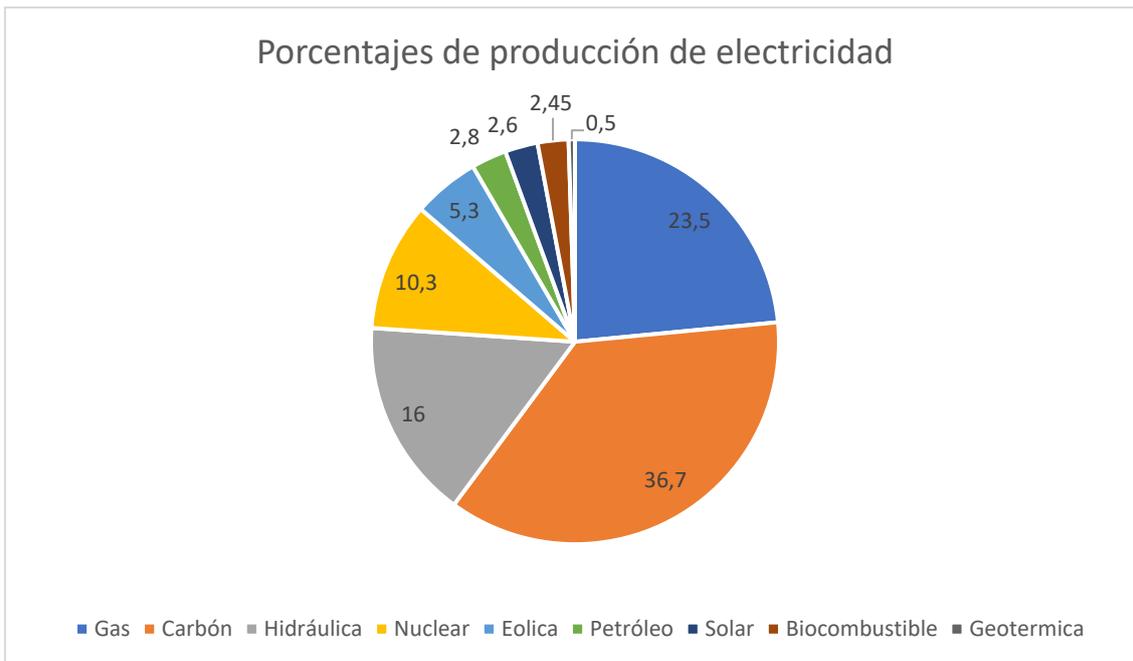


Figura 8: (fuente ENERDATA)

(Gas 23,5%, carbón 36,7%, hidráulica 16%, nuclear 10,3%, eólica 5,3%, petróleo 2,8%, solar 2,6%, biocombustibles 2,45%, geotérmica 0,5%)

Se puede observar que existe un claro dominio de las energías fósiles, el carbón, el gas y el petróleo son responsables del 63% de toda la producción de electricidad en el mundo. En cuanto a las renovables, la líder en producción de electricidad se trata de la hidráulica con un 16%. También vale la pena resaltar la poca cota de producción de electricidad que tiene la de los biocombustibles. Aquí está el reto de nuestra sociedad, ser capaces de reducir esa imponente dependencia del 63% a la energía fósil y reemplazarla por energías renovables. No solo por las, ahora, más populares sino también ser capaces de seguir con la investigación y desarrollo de nuevas formas de generar electricidad. Formas de generar electricidad menos explotadas hoy en día.

Durante los tiempos de la cuarentena causada por la COVID-19 en 2019 se produjo una ligera reducción de la demanda de electricidad, más concretamente, del 0,6%. Teniendo esto en cuenta y la recuperación posterior a este evento del mercado, podemos estimar un aumento medio anual de la generación de electricidad del 3% desde los años 2000 hasta 2018. Sin embargo, vale la pena comentar un descenso del 4,5% y del 3,5% de la generación de electricidad a partir del carbón y de tecnologías nucleares respectivamente. Esta caída de generación se vio compensada por el aumento de otras de origen renovables como son la eólica, con un 12% y la solar con un impresionante 20% de crecimiento.

Analizando la crisis causada por la pandemia, observamos como la principal fuente de energía que se ve afectada cuando se producen valles de generación es la del carbón. En efecto las renovables son de generación continua, una vez hecha la inversión todo watio generado contribuye a reducir el precio por unidad del producto y a rentabilizar los costes de desarrollo. En cabio, la generación de electricidad a partir del carbón requiere un combustible y en momentos de escasez de demanda se prefiere ahorrar dicho combustible y perder cuota de mercado frente a las energías verdes.

Además, esto también es una muestra de las intenciones de la sociedad de hoy en día, cuando hay una caída en la demanda se empieza cortando la producción proveniente de fuentes de generación de energía contaminantes. Demostrando así la intención de hacer la transición hacia las energías renovables. Siendo la biomasa una alternativa viable y con gran potencial sin explotar, es importante antes de pasar al desarrollo del proceso de generación de electricidad a través de biomasa de analizar a sus principales competidores. En este caso, la energía hidráulica, la eólica y la solar.

i. Hidráulica

Como primer puesto dentro de las energías renovables utilizadas para la generación de electricidad tenemos la hidráulica. Una fuente de energía inagotable y utilizada desde hace ya siglos. Se trata de un concepto bastante intuitivo de implementar. Existiendo ya ríos, pantanos y lagos que se forman de forma natural en la naturaleza, la idea de las centrales hidráulicas es aprovechar este estancamiento de agua para crear una diferencia de presión. Es decir, una central hidroeléctrica se sitúa entre dos fuentes de agua a distintas presiones. El agua estancada genera una presión en el embalse de $\rho g \Delta h$. Siendo “ ρ ” la densidad del agua, “ g ” la constante gravitacional de la tierra y “ Δh ” la profundidad del agua en el embalse. Controlado por una válvula el flujo que atraviesa la central acciona una turbina que genera electricidad.

Esta fuente de energía es valorada principalmente por su flexibilidad y control. Al tratarse de una fuente de energía fácil de almacenar, las centrales hidroeléctricas reaccionan de manera muy eficaz a los picos y valles de demanda del sistema. Tan solo con la apertura o cierre de la válvula se calcula el flujo con el que se quiere inyectar el agua a la turbina controlando así la potencia generada por esta última. Esto es un aspecto muy importante a tener en cuenta frente a sus competidores. Comparando la hidráulica con las centrales solares o las eólicas, esta posee la posibilidad de acumular la fuente de energía utilizada, es decir, el agua se almacena en el embalse. En cuanto al viento o a la radiación solar, estas no permiten el almacenamiento o acumulación de la energía haciendo así imposible la adaptación a la demanda exigida por una red interconectada con Europa en la que las variaciones suceden constantemente. Las fuentes de energía solar y eólica son de generación inmediata, si la fuente de energía deja de emitir (una nube que cubre el sol, o el parón del viento) se deja de producir electricidad.

A la hora de construir una central hidroeléctrica es necesaria una gran inversión que permita la construcción de un embalse con instalaciones hidroeléctricas. Actualmente se está planeando un proyecto de construcción de una central hidroeléctrica en Teruel valorado en 700 millones de euros. Un proyecto que contará con 1000 operarios de forma sostenida y más de 5 años de construcción. A pesar de necesitar una inversión importante, estas centrales suelen tener una larga vida útil haciendo así que los costes fijos por watio generado vayan disminuyendo según pasan los años hasta convertirse en insignificantes.

Sin embargo, la energía hidráulica tiene ciertas limitaciones. La más obvia de remarcar es la necesidad de tener una topología adecuada que permita la construcción y aprovechamiento de una central hidroeléctrica. No sorprende que países como Suiza, con una topología mayoritariamente montañosa (el país más montañoso de Europa) produzca 40,56 TWh en 2019. En otras palabras, la energía hidráulica es responsable del 69,8% del consumo eléctrico del país. Países con geografías más continentales, menos rugosidad en el territorio como podría ser el

reino unido tienen grandes dificultades para implementar este tipo de energía con un 2% de consumo eléctrico proveniente de la hidráulica.

Además, pese a haber resaltado que se basa en una fuente de energía almacenable, esta fuente de energía no es del todo constante. En periodos de sequías, la oferta de agua puede verse drásticamente reducida conllevando así a cortes en la producción de energía. Cortes de magnitud larga que no se verán retomados hasta que los ríos se vuelvan a llenar y se aumente el depósito de agua en el embalse. Hablamos de sequías del orden de 2 años de longitud, “ La duración total del evento de sequía en Europa también fue inusualmente larga, ya que comenzó en abril de 2018 y no terminó hasta diciembre de 2020: 33 meses. Solo la sequía entre 1857 y 1860 duró algo más, con un total de 35 meses.” Unas sequías que además se ven directamente relacionadas con el calentamiento global descrito anteriormente.

En cuanto a su papel con el medioambiente, es cierto que a día de hoy es la alternativa principal para luchar contra la producción de electricidad a partir de combustibles fósiles. Una electricidad que no contamina al ser producida, siendo utilizado el agua y la presión a la que está sometida como combustible. Sin embargo, es necesario comentar el impacto que tiene la construcción de la central en el medio ambiente. En efecto, al construir una central se crea un embalse. Este proceso de estancamiento del agua altera el ecosistema de la zona en cuestión. Creando así grandes problemas a los animales, plantas y aguas de la zona. El estancamiento del agua provoca cambios de temperatura, estratificación de sedimentos y proliferación de algas que provocan la reducción en el oxígeno del agua creando así condiciones inhóspitas para el ecosistema.

ii. Eólica

Energía eólica, del latín “Eolo”, dios griego de los vientos, es la energía proveniente de las corrientes de aires del planeta. Pero, ¿A qué se deben estas corrientes de aire?

La radiación infrarroja es la responsable de los cambios de temperatura en el planeta. Así mismo, estos cambios de temperatura inducen una variación en la densidad del aire y crean un movimiento de las partículas del aire creando así corrientes y vientos.

El planeta tierra está expuesto a distintas radiaciones según latitud, hora, estación y tipo de superficie. La radiación infrarroja emitida por el sol es de valor constante, sin embargo, la tierra la absorbe de formas distintas. Analizando la forma ovalada del globo terrestre se puede llegar a la conclusión de que la cantidad de radiación recibida por el planeta depende de la latitud. Zonas centrales del ecuador están mucho más expuestas a la radiación que las zonas polares. Además de la latitud, la inclinación de la tierra tiene un rol determinante a la hora de analizar la absorción de radiación del planeta. En efecto, esta inclinación hace que una parte del globo se encuentre más o menos cerca del sol, recibiendo así más o menos radiación. Esta inclinación es la responsable del desarrollo de las estaciones a lo largo del año. Además, es la que explica por qué el hemisferio norte y el hemisferio sur tienen una sucesión de estaciones inversas (cuando es verano en el hemisferio norte, es invierno en el hemisferio sur). Tanto la latitud como la inclinación de la tierra marcan la exposición de una zona a la radiación solar, más particularmente, a la infrarroja. Esta exposición de infrarroja es la responsable de los cambios de temperatura en el planeta.

Además de razones geográficas que explican la exposición a radiación infrarroja del planeta, es de igual importancia analizar el suelo que recibe estas radiaciones. La capacidad de absorción de dicho suelo es la que va a determinar su cambio de temperatura. El índice de Albedo, o el efecto albedo cuantifica el porcentaje de reflexión de radiación infrarroja de un cuerpo. Indirectamente, también cuantifica su grado de absorción ya que la radiación reflejada es complementaria a la absorbida, es decir, todo lo que no es reflejado es absorbido por la superficie en cuestión. Esta propiedad nos indica la propensión a la variación de temperatura de cada cuerpo. Como ejemplo se compara la nieve con un albedo de 0,85 frente al asfalto con un albedo de 0,04. El 85% de la radiación infrarroja será reflejado por la nieve mientras que el 96% de la incidente sobre el asfalto será absorbida. Esta absorción es directamente proporcional a la variación de temperatura del cuerpo, por esta razón, se siente esa sensación de calor al estar cerca de una carretera de asfalto expuesta al sol y el deslumbramiento de luz producido por la nieve.

Estos cambios de temperatura son los responsables de la creación de viento. Al calentarse el ambiente las moléculas de aire se calientan induciendo así una agitación molecular más importante. Esta agitación molecular provoca una separación entre moléculas, es decir, al ser excitadas térmicamente las moléculas se mueven con más intensidad. Este aumento en el movimiento de las moléculas hace que disminuya su densidad. Esto genera un flujo de convección en el que el aire frío tiende a descender y el caliente a aumentar. A escala macroscópica, estos flujos crean lo que conocemos como "viento" y es el responsable de girar las aspas de los molinos que generan electricidad.

Una vez entendido el proceso de creación del viento podemos llegar a la conclusión de que es un método de generación de energía que de manera indirecta depende de factores estacionales. Además, podemos concluir que depende una vez más, aunque sea de manera indirecta del sol y de la temperatura.

Otro inconveniente de la energía generada a partir del viento es la fragilidad de los molinos. En efecto, estos solo funcionan en vientos de entre 4 m/s y 25 m/s siendo las condiciones óptimas de 15m/s. Para condiciones de vientos superiores o inferiores a dichos valores, están programados para mantenerse apagados.

Otra desventaja es el factor geográfico, los molinos no se pueden situar en cualquier lugar ya que no se puede generar energía a partir del viento en cualquier lugar. Los molinos deben situarse en zonas de corrientes de aire prolongadas y estables, no en zonas con vientos huracanados. La mayoría de estos lugares se encuentran en alta mar, pero estas instalaciones conllevan un alto coste de producción.

c. Origen de la biomasa

i. Ciclo de Carbono

La generación de electricidad por biomasa es una forma de generar electricidad a través de compuestos orgánicos. Es necesario para entender el proceso, diferenciar términos básicos que serán utilizados a lo largo del trabajo. Biomasa se refiere a desechos orgánicos o biológicos como, por ejemplo, lodos en aguas residuales, residuos agrícolas, cultivos energéticos o residuos orgánicos domésticos. Un compuesto orgánico está caracterizado por la presencia de carbono en su composición molecular. Es decir, se trata de un compuesto químico formado por átomos de carbono entrelazados entre sí con átomos de hidrógeno. Las moléculas orgánicas naturales son sintetizadas de manera natural por seres vivos. También existen las moléculas orgánicas artificiales. Estas tienen estructuras compuestas por carbonos e hidrógenos, pero presentan la particularidad de haber sido creadas por el hombre. Es decir, no se sintetizan de manera autónoma en el medioambiente. Los compuestos orgánicos tienen la particularidad de ser fácilmente inflamables, es decir, tienen un alto potencial calorífico, cualidad muy interesante a la hora de generar electricidad.

El carbono se encuentra presente en la atmósfera bajo la forma de CO₂. ¿Cómo se transmite este carbono de la atmósfera en forma de gas al suelo y a la materia viva? Esto sucede en el ciclo de carbono.

El conocido ciclo de carbono es el responsable de explicar el movimiento circular del carbono en el ecosistema terrestre. De manera similar al ciclo del agua que, el ciclo del carbono pasa de la atmósfera a la tierra y de la tierra a la atmósfera por procesos un poco más complejos que la evaporación y la condensación. El proceso principal e inicial del ciclo de carbono es la fotosíntesis. ¿Cómo funciona la fotosíntesis y cómo absorbe de la atmósfera el carbono?

En una primera instancia, la radiación ultravioleta del sol es absorbida por los tilacoides. Esta radiación provoca una reacción química en las moléculas de agua (H₂O) rompiéndolas en átomos de oxígeno e iones positivos de hidrógeno. Esta reacción química es conocida como la fotólisis. Los iones de hidrógeno liberados por la fotólisis son usados en distintas ecuaciones de oxidación-reducción hasta generar ATP en la fosforilación fotosintética.

El ATP o Adenosín trifosfato, es una molécula compuesta por átomos de hidrógeno, oxígeno y fósforo. Se sintetiza a través de la aportación de energía radiactiva solar y sirve como almacenamiento de energía. En efecto, al romperse, esta molécula pasa a formar ADP soltando energía al sistema al que pertenece. Esta molécula es esencial para el ecosistema ya que es la que permite las transferencias de energía a nivel microscópico. En efecto, actúa como una especie de almacén de energía, como una batería. En el caso de la fotosíntesis, es la que aporta energía al Ciclo de Calvin.

El ciclo de Calvin, esquematizado a continuación, este compuesto por una serie de reacciones oxidación-reductoras concatenadas las unas con las otras. Estas reacciones son impulsadas por la aportación energética proveniente de la formación de ADP a partir de ATP.

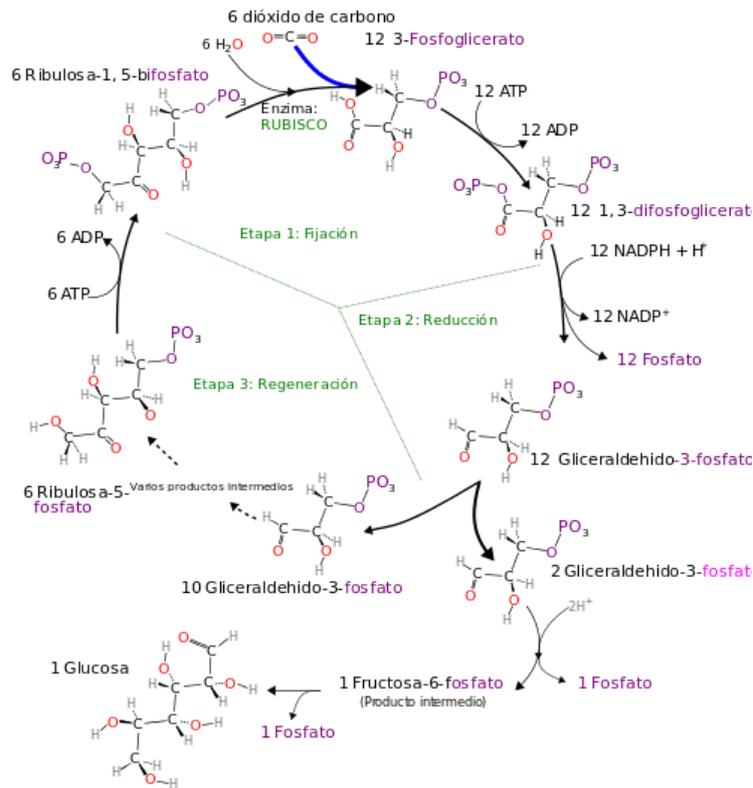


Figura 9: esquema del ciclo de Calvin (Fuente Wikipedia)

Se observa como dicho ciclo contiene sucesivas etapas en las que los productos de unas son los reactivos de otras. Sin embargo, existen tres reactivos-productos que no son reutilizados por el ciclo de Calvin. Se trata del ATP, sintetizado en los tilacoides en la etapa previamente explicada (la fotólisis), el CO₂ que es consumido por el ciclo de Calvin y la glucosa que se forma en la etapa de regeneración del ciclo. Por esta razón se puede considerar al ciclo de Calvin como un motor. Un motor encargado de producir glucosa gracias al aporte de CO₂, que actuaría como gasolina, y de una chispa de energía (que haga prender la gasolina), el ATP. Es decir, el ciclo de Calvin es el que se encarga de absorber CO₂ del ambiente y sintetizar glucosa gracias a la aportación de energía del ATP.

Gracias a la fotosíntesis, el carbono de la atmósfera pasa a formar parte de la materia viva y sólida del ecosistema. El carbono es lo que caracteriza a la materia orgánica del ecosistema. Los árboles, las plantas, los pétalos y las flores están compuestas por moléculas de materia orgánica sintetizadas por la absorción de carbono de la atmósfera gracias a la fotosíntesis. Al morir estos se convierten en residuos orgánicos. Con el paso del tiempo y gracias a agentes externos como bacterias, ocurre la putrefacción y la descomposición. En esta etapa, estos organismos bacterianos se encargan de descomponer las moléculas orgánicas en moléculas de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). De esta manera se completa el ciclo de carbono devolviendo así a la atmósfera los valores de carbono absorbidos por la fotosíntesis.

En la naturaleza existen principalmente dos procesos de descomposición, el primero se produce en la superficie de la tierra y está caracterizado por una abundancia de oxígeno. Las bacterias trabajarían de manera aerobia. El segundo ocurre tras siglos de espera en los que poco a poco se van sucediendo capas de sedimentación que se van acumulando sobre la materia orgánica. Esta sedimentación provoca un cambio en las condiciones de descomposición. En efecto, se

produce un aumento de presión y de temperatura que hace que las bacterias trabajen de manera anaeróbica. En los estómagos de animales rumiantes como las vacas sucede un proceso parecido. En el primer compartimento del estómago de las vacas conocido como el rumen, surge un proceso de fermentación responsable de liberar el carbono de las moléculas de la hierba ingeridas. Este carbono es liberado a través de los eructos y flatulencias de dichos animales. En el caso de las vacas, el 95% del metano sintetizado por fermentación en el rumen es liberado por eructos. Estos procesos se encargan de devolver a la atmosfera el carbono absorbido por las plantas en la fotosíntesis. La mayoría de los procesos devuelven a la atmosfera el carbono bajo forma de metano y de CO₂.

ii. Del ciclo de carbono a la biomasa

Como se acaba de analizar existe un ciclo circular del carbono. Este entraría a formar parte de la materia viva a través de la fotosíntesis y se liberaría a la atmosfera de nuevo a través de la descomposición y putrefacción de esta misma. Entra como gas, se solidifica en materia orgánica, y se devuelve como gas gracias a la actuación de bacterias y agentes patógenos. El objetivo de la producción de energía a través de la biomasa es aprovechar este flujo natural de carbono para generar electricidad. Más concretamente, sería aprovechar el proceso de liberación de gas de la materia orgánica, es decir la segunda parte del ciclo de carbono, para recolectar dicho gas y utilizarlo para generar electricidad. En efecto se trata de un flujo de gas continuo que se desperdicia y acaba en la atmosfera de una u otra manera. Gracias al control de la biomasa, podemos ser capaces de extraer dicho gas con alto valor calorífico y devolverlo a la atmosfera tras haberlo sometido a procesos de generación de energía.

Para ello, es importante diferenciar dos tipos de gas. Biogás se refiere al gas sintetizado tras la actuación de bacterias mediante la digestión anaeróbica de sustratos orgánicos, es decir, en ausencia de oxígeno. Biogás es el gas que resulta de la segunda etapa del ciclo de carbono, la encargada de devolver el carbono a la atmosfera. El eructo de la vaca es biogás. En cuanto a biometano nos referimos al biogás extraído de dicha digestión tras haber sido tratado por procesos de enriquecimiento de metano. Como hemos visto anteriormente, el biogás esta compuesto por metano CH₄ y dióxido de carbono CO₂. Este proceso se encarga principalmente de reducir la concentración de CO₂ del gas y enriquecerlo de metano. El objetivo de este enriquecimiento es aumentar el potencial calorífico del gas para aprovechar al máximo su potencial.

Resumiendo, la biomasa es un compuesto orgánico que proviene principalmente de desechos de la agricultura o de las aguas residuales. Esta biomasa pasa a ser tratada por procesos de digestión anaerobia, que veremos más detalladamente más adelante, para conseguir así generar biogás. Este biogás es posteriormente tratado de forma a conseguir un mayor rendimiento y pasa a llamarse biometano. Por último, el biometano será usado como combustible en una central térmica para la generación de electricidad por ciclo combinado.

Sabiendo esto, y antes de pasar a la explicación en detalle de cada proceso de generación de biometano, es conveniente analizar las razones que hacen del biometano un candidato potencial a tener en cuenta en la transición a energías renovables en el mundo. Como hemos visto antes, el calentamiento global se ve acentuado por gases de efecto invernadero como el metano. El metano (CH₄) es liberado de forma natural al ecosistema. Tanto la fermentación natural de

compuestos orgánicos o al estiércol liberado por animales son fuentes de metano en el planeta. A continuación, representamos un diagrama de la distribución de emisión de metano:

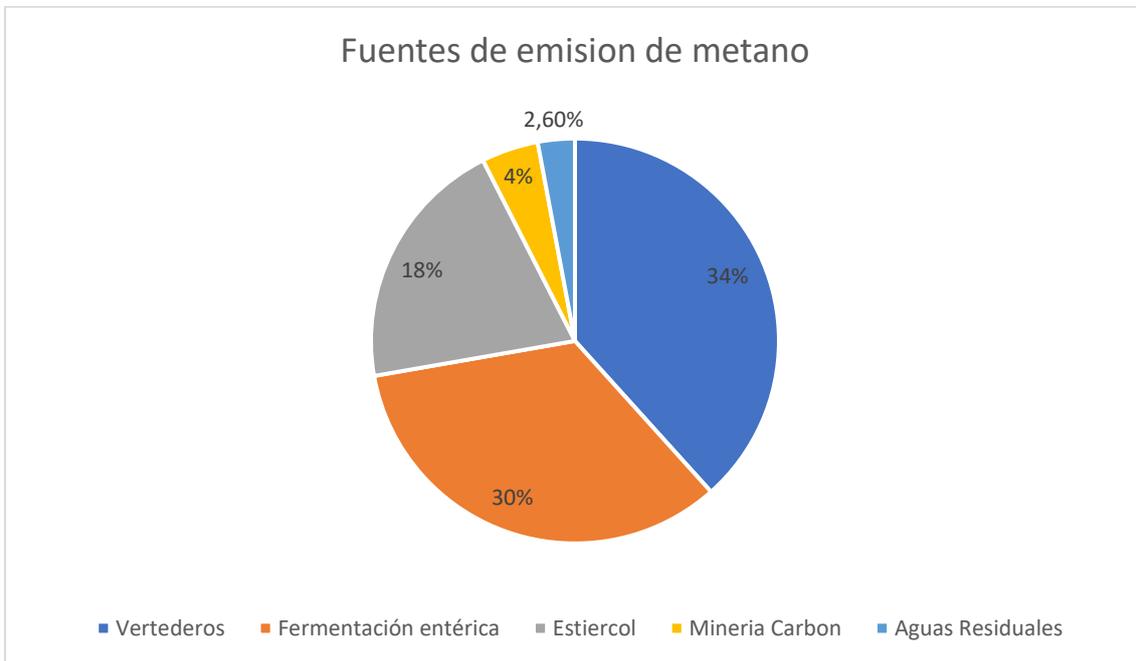
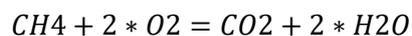


Figura 10: Fuentes de emisión de metano IDEEA, Balance of final energy consumption)

Se puede observar cómo el 48% de la producción de metano en el mundo proviene del mundo animal. 30% de la fermentación entérica y 18% del estiércol. Es decir, prácticamente la mitad de la producción de metano en la atmosfera proviene de animales de ganadería. Tan solo la especie vacuno genera en torno a 5,024 millones de toneladas de CO2.

Como se acaba explicar, de forma natural e ininterrumpida existen numerosos procesos que devuelven a la atmosfera el carbono. Tanto si hablamos de descomposición como de digestión el objetivo de la producción de energía a través de la biomasa es ser capaz de aprovechar el flujo de retorno a la atmosfera del carbono para generar electricidad. Es decir, utilizar residuos orgánicos y someterlos a procesos que generen metano. Haciendo así una simulación acelerada del proceso natural de descomposición. Este metano será posteriormente sometido a una combustión:



Cabe resaltar que el principal contribuyente a la formación de ozono a nivel del suelo es el metano, causante de 1 millón de muertes prematuras cada año. El programa de la ONU para el medio ambiente estima que, durante un periodo de 20 años, su capacidad de calentamiento es 80 veces más potente que la del dióxido de carbono. Convirtiéndolo así en un poderoso gas de efecto invernadero.

2. Generación del biogás

a. Biogás, una oportunidad

Una vez analizado la creación de la biomasa, su contexto histórico y su ciclo de carbono, se estudiarán los factores que hacen de este recurso, una fuente de energía con gran potencial todavía por desarrollar. El siguiente capítulo se centrará en el potencial del biogás en la sociedad y economía española.

i. Potencial de consumo de energía y descarbonización

A día de hoy, y como ya se ha visto en apartados anteriores, el modelo de energía en el que se basa la industria española depende en un 60% de las energías fósiles. Analizando el consumo de energías por sector se puede extraer la siguiente distribución:

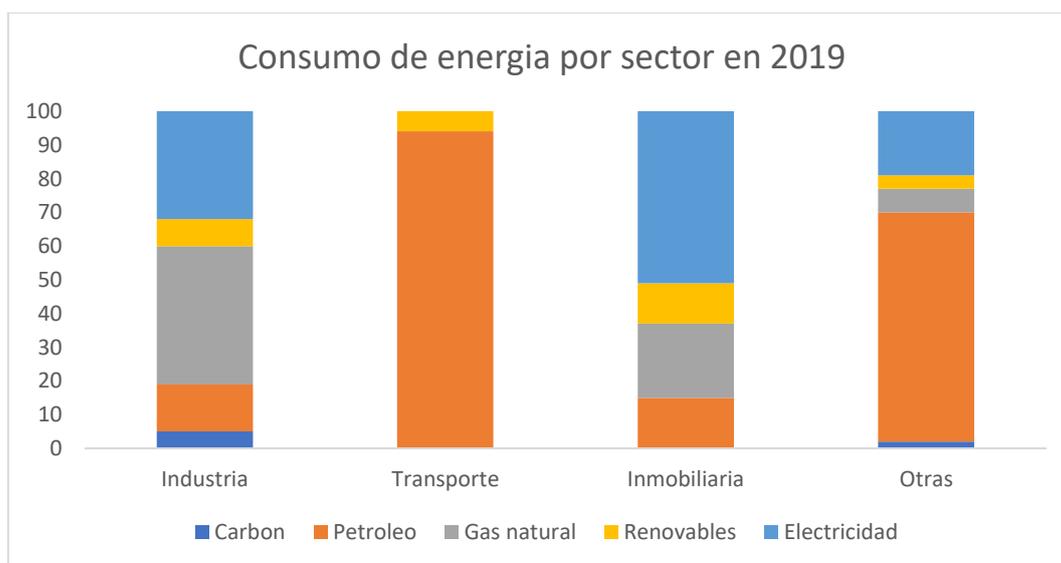


Figura 11: Distribución del consumo de energía según el sector en España 2019 (IDEA, Balance of final energy consumption)

Según un estudio de Arthur D Little de estos sectores, se estima que el biometano robe una gran parte de la cuota de energía consumida. Más concretamente se prevé que el biometano se imponga con un 60 % de utilización en los sectores de transporte e industria y cerca de un 26% en el sector inmobiliario. Reemplazando así una parte muy importante de la energía fósil consumida. La distribución del consumo de energías por sector quedaría de esta forma:

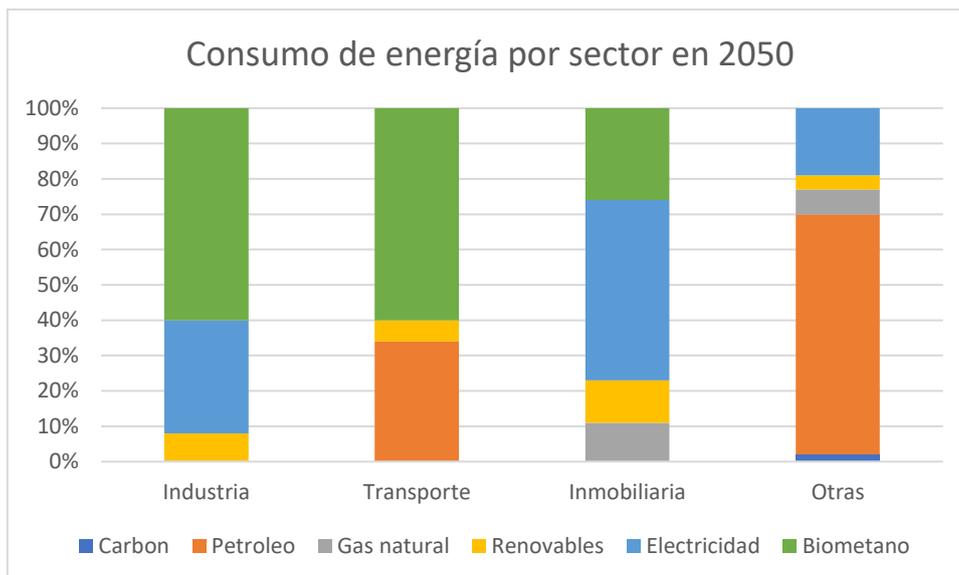


Figura 12: Distribución del consumo de energía según el sector en España 2050 (IDEA, Balance of final energy consumption)

Rol del biometano en el transporte:

El sector de transporte parece ser el más afectado junto con el de la industria, en efecto, la comisión europea esta enfocada en reducir drásticamente las emisiones de CO2 en el mundo automovilístico. En 2015, el sector de transporte emitió a la atmosfera 1.028 tnCO2/eq, es decir, unos valores iguales al 23% del total de emisión de gases de efecto invernadero en Europa. No sorprende que a partir del 2035, la comisión europea pretenda prohibir la venta de cualquier vehículo nuevo impulsado por gasolina o diésel. Con semejante incentivo (o prohibición), se pretende llevar el mundo automovilístico al fin de los motores de combustión.

La DGT, dirección general de tráfico, publicó en octubre de 2021 un estudio sobre los objetivos de descarbonización del sector de transporte. Apoyado por las iniciativas de la comisión europea se muestran a continuación los niveles de electrificación a los que se pretende llegar de aquí a 2030 y a 2050:

	2030	2050
Motocicleta	1 248 612 (30%)	5 722 803 (100%)
Coches	4 320 000 (20%)	20 900 000 (70%)
Furgonetas	543 712 (10%)	6 252 693 (70%)
Autobuses	20 160 (30%)	57 750 (70%)
Camiones	16 210 (5%)	36 959 (10%)
Trailers	11 893 (0%)	24 024 (0%)

Figura 13: Electrificación de la red de transporte (AdL, Deloitte y otros estudios)

Además de la electrificación del sector de transporte, también se pretende utilizar biocombustibles como el biometano para contribuir a la descarbonización del sector. Entre la

electrificación y el empleo de combustibles renovables se llega a valores de descarbonización muy altos:

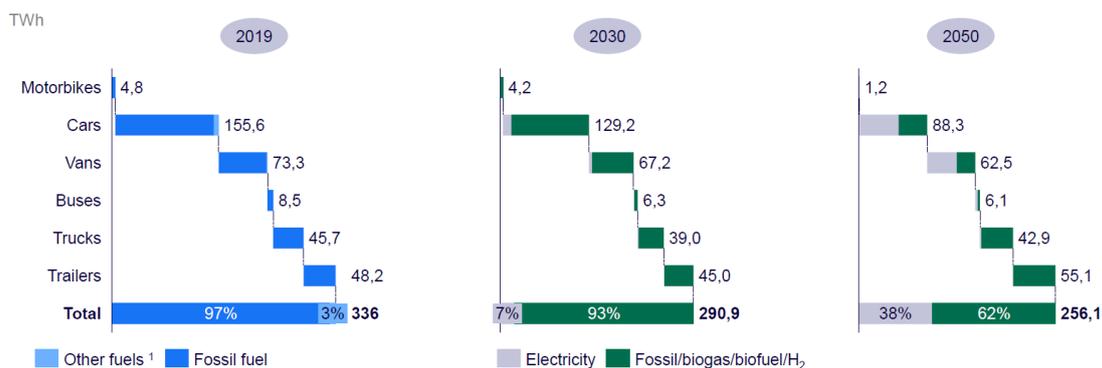


Figura 14: proyección del consumo anual de combustible de origen fósil y eléctrico en el sector del transporte (Asociación española de H₂ y de biometano, AdL)

Como se puede ver en el posterior estudio realizado por la empresa Arthur D. Little, se estima que de aquí al 2030, se habrá conseguido una descarbonización del 93% en el sector de transporte.

ii. Marco regulatorio favorable

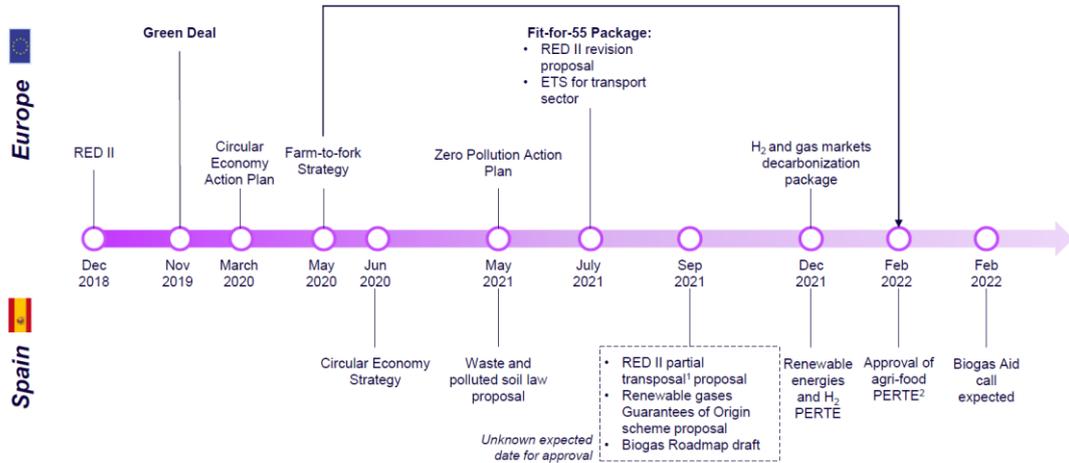
Los objetivos de descarbonización de los sectores económicos en España vienen envueltos en un cuadro regulatorio mucho más amplio. Como se ha comentado en apartados iniciales a partir de la COP-21 de París, se han desarrollado múltiples planes de transición energética. Estos planes están compuestos por una serie de incentivos y prohibiciones regulatorias que pretenden impulsar el desarrollo de energías renovables como es la del biogás.

Entre ellas, el plan “Fit for 55” marca las pautas a seguir para conseguir una reducción del 55% de los gases de efecto invernadero de aquí a 2030. Este proyecto tiene tres objetivos principales, el primero y más importante, conseguir la reducción de la emisión de los gases de efecto invernadero. El objetivo, es el comentado antes, conseguir unos niveles de emisión reducidos un 55% con respecto a los emitidos en los años 1990. Además, se pretende, en este objetivo afectar a varias industrias como son las del transporte por carretera, transporte marítimo e incluso inmobiliaria.

Como segundo objetivo, se pretende provocar un aumento en la producción de energía renovable que sea capaz de reemplazar las energías fósiles hasta ahora utilizadas. Si se cuantifica este objetivo, se pretende llegar al 40% de consumo de energías renovables en el año 2030. Para esto se propone reforzar el criterio de sostenibilidad de la bioenergía y promocionar su uso. Para esto se plantea la idea RED II que clasifica los criterios mínimos que debe tener el biometano utilizado como combustible líquido para contribuir a la reducción de producción de gases de efecto invernadero. La iniciativa RED II se centra, dentro de los objetivos de la reducción de las emisiones de gas a efecto invernadero. En el rol que debe tener el biometano.

Como último objetivo, se pretende aumentar la eficiencia energética para alcanzar niveles de 36-39% de reducción para el consumo de energía primario y final. A continuación, adjuntamos

un esquema del desarrollo regulatorio impuesto por la unión europea y como pretende el gobierno español implantarlo en el país:



Source: European Commission; BOE; Arthur D. Little
 (1) Transposal related to sustainability criteria and GHG emissions reduction for bioenergy; (2) This mechanism includes initiatives to boost sustainable agriculture

Figura 15: Contribución del biogás y biometano a los objetivos del plan europeo del Fit -for-55 pasados al contexto español (AdL Deloitte y otros estudios)

RED-II

Volviendo a la iniciativa RED II propuesta por la unión europea, esta especifica de manera más precisa y concisa los objetivos esperados del biometano para el futuro. Objetivos alineados con el Fit For 55. Principalmente esta iniciativa pretende aumentar la penetración en el mercado europeo del consumo de energía renovables por en un 32% de aquí al año 2030. Con respecto al sector del transporte, RED II pretende llegar a consumos del 14% encada comunidad autónoma para el año 30. Además, para conseguir estos objetivos esta iniciativa plantea el desarrollo de un sistema integrado de gas que facilite su intercambio entre países de la unión europea. Desarrollando un sistema de control que permita verificar la naturaleza renovable del gas y creando una red de información europea para poder llevar contabilidad y registrar la creación de biocombustibles en el continente.

Iniciativas para el desarrollo del biometano

Actualmente ya se han lanzado iniciativas que ayudan e incentivan el desarrollo del biometano. El programa de ayuda al biogás esta compuesto por un presupuesto inicial de 50M euros y consiste en un concurso de selección organizado por IDAE. Este concurso busca proyectos de desarrollo y producción de biogás y se basa en criterios económicos, técnicos y posibles externalidades. Como posibles proyectos para obtener el presupuesto concursado, se estudia la creación o aprovechamiento de plantas de generación de biogás por digestión anaerobia, el desarrollo de centrales de tratamiento y enriquecimiento del biogás o plantas de tratamiento del digestato.

Además, como iniciativas más generales se busca facilitar la integración de estos gases a la red de distribución de gas natural disminuyendo tarifas de intercambios fronterizos y recortando costes hasta un 75% de la entrada de gas en las plantas de inyección. Junto con esta reducción de precios, también se busca la creación de un amplio mercado europeo para los gases

renovables. Todo esto asegurando el acceso a la red de distribución de gas de empresas e instalaciones más pequeñas. Estas dos iniciativas tienen logran crear una red de distribución de gas natural transparente justa y precisa que facilita el consumo de gas natural renovable. Esto facilita y atrae a industrias y particulares que quieran consumir gas renovable y contribuye al objetivo de reducir el consumo de energías no renovables.

Tratamiento de residuos

Junto con las medidas de descarbonización y reducción de producción de gases a efecto invernadero, la unión europea trae consigo un paquete de regulación normativa busca reducir y controlar el flujo de residuos actual. Estas normativas establecen medidas cuyos objetivos son la preservación y la protección del medio ambiente y de la salud humana incluyendo iniciativas como los siguientes:

3. Responsabilidad del ciudadano en cuanto a la gestión de residuos
4. Recuperación, reutilización y reciclaje de residuos
5. Planes de gestión de residuos
6. Planes de contaminación 0

Estas iniciativas han sido rápidamente adoptadas por el gobierno español y se ven reflejadas en los siguientes decretos/leyes y planes o programas:

1. Ley 22/2011: Regula residuos y suelos contaminados
2. RD 306/202: Establece reglas para la gestión de granjas de cerdos
3. RD 646/2020: Regula la eliminación de residuos en vertederos
4. RD 980/2017: evita la descarga de purines al campo mediante sistemas de placas, ventiladores o cañones
5. Plan Marco Estatal de Gestión de Residuos (PEMAR)
6. Plan Estatal de Inspección de Transfronterizos Traslados de Residuos (PEITTR)
7. Plan Nacional Integral de Residuos (PNIR)

Como se va a ver a continuación en más detalle, la generación de biometano y de gas natural renovable proviene del uso exclusivo de residuos orgánicos. Por esta razón, el biometano y su generación es una alternativa tan atractiva a la hora de luchar por la descarbonización de la sociedad. No solo participa en la reducción de consumo de gases a efecto invernadero sino que además permite la reutilización y reciclaje de residuos obtenidos de distintos tipos de industrias. Con un marco jurídico tan centrado en imponer incentivos, planes, programas y en promover el desarrollo de energías renovables y de gestión de residuos, Europa, y más concretamente España parecen el lugar idílico en el que implantar las tecnologías de digestión anaerobia.

b. Bioquímica y generación del biogás

Como hemos visto antes, el biogás proviene de la biomasa, más particularmente, proviene de un proceso biológico en el que se descompone la materia orgánica en productos gaseosos, (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.) y en una mezcla de minerales (N, P, K, Ca, etc) llamado digestato. Este proceso de descomposición se hace de manera anaerobia y tiene un alto atractivo en numerosos sectores del mercado rural. Tanto en el mundo de la ganadería como en el de la gestión de aguas residuales, la materia orgánica abunda y su digestión es crucial. Es importante resaltar, que actualmente la digestión de estos residuos orgánicos trae muchos beneficios a la planta de ganadería o de aguas residuales. La digestión anaerobia reduce enormemente los malos olores mineralizando los residuos. Además, facilita el transporte de estos aligerándolos y compactándolos. La mayor ventaja de esta digestión, y la que es motivo de interés en este trabajo es la capacidad de generación de productos gaseosos. Unos productos gaseosos con concentraciones de en torno a 50-70% de metano. El digestor anaerobio es capaz de convertir desechos y residuos orgánicos de la industria en fertilizante mineralizado y en biogás contribuyendo así a una economía circular. Por esta razón es una práctica tan interesante.

¿Cómo es generado este biogás? ¿Qué procesos son responsables de la digestión de dicha biomasa?

En una primera estancia se centrará en el proceso de digestión anaerobia. Esta como el nombre indica se realiza de manera anaerobia, es decir con ausencia de oxígeno O_2 . Esta digestión, a nivel molecular conlleva tres fases, la hidrólisis, la acidogénesis y la metanogénesis. Cada una de ellas encargadas en ir descomponiendo la materia orgánica poquito a poco en biogás y digestato.

i. Hidrólisis

La hidrólisis proviene del griego hidro: hydor, agua y de lisis: lyein, soltar. Es decir, hidrólisis significa disolución en el agua. Al mojar una sustancia se lleva a cabo una reacción química entre las moléculas de agua y las macromoléculas de la sustancia mojada. La molécula de agua tiende a dividirse y a romper los enlaces químicos de la macromolécula en cuestión. En el caso de la digestión anaerobia, este proceso se inicia con los polímeros orgánicos de inicio.

A menos que procedan de la misma planta, los residuos orgánicos que sirven como combustible a las centrales de generación de biogás suelen transportarse de manera deshidratada. Una estación de depuración de aguas residuales, EDAR, se encarga de depurar las aguas residuales. Existe en ella dos líneas de trabajo, la línea de agua, en la que se trata, desinfecta y depura el agua y la línea de fangos en la que se tratan los residuos orgánicos extraídos de la línea de agua. En la línea de fangos, podemos encontrar dos alternativas, o se incluye un reactor anaerobio en el que se realiza la digestión y se extrae el biogás, o se realiza un tratado para el transporte de dichos residuos.

En el caso del transporte de los residuos, se procede a una deshidratación del fango. Esta deshidratación permite reducir la masa del residuo además del volumen pudiendo así

compactarlo en bloque de mayor facilidad a la hora de ser transportados. Sin embargo, una vez transportados a una central de generación de biogás, es necesaria un pretratamiento antes de inyectarlos en el digestor. Este pretratamiento consiste en una rehidratación al 4-6%. Una rehidratación esencial ya que sin ella no tendría lugar la primera etapa del proceso de generación del biogás, la hidrólisis.

De manera más precisa, la hidrólisis, consiste en la transformación de compuestos orgánicos insolubles en compuestos adecuados para las siguientes etapas. Transforma las proteínas, los glúcidos y los lípidos en aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes. Estos compuestos serán posteriormente de lo que se nutrirán las bacterias acidogénicas. Además, vale la pena resaltar que en esta primera descomposición ya existe una producción de CO₂.

ii. Acidogénesis / acetogénesis

La acidogénesis es el proceso bacteriano de transformación de materia biodegradable en compuestos de peso molecular intermedio. Las bacterias acidogénicas se alimentan de los productos de la fase de la hidrólisis y convierten los aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes en dióxido de carbono, hidrógeno, ácidos alifáticos, sulfhídrico y amoníaco. Los valores de la DQO en este proceso no se ven alterados. Esto se explica por el hecho la transformación producida en la acidogénesis no conlleva consumo o reducción en materia orgánica. Tan solo rompe compuestos de cadena complejos en unos de cadena más corta.

En la acetogénesis se produce una nueva transformación, los ácidos y alcoholes producidos por la acidogénesis son degradados de manera a producir ácido acético, del grupo CH₃-COOH. Al realizar esto se libera simultáneamente hidrógeno y dióxido de carbono.

iii. Metanogénesis

Por último, tiene lugar la fase de la metanogénesis. Esta se encarga de transformar los compuestos orgánicos empuqueñecidos por las fases anteriores en metano CH₄, dióxido de carbono CO₂, e hidrogeno H₂.

Existen dos tipos de bacterias metanogénicas, las bacterias metanogénicas acetoclásticas y las bacterias metanogénicas hidrogenófilas.

Las bacterias metanogénicas acetoclásticas son las encargadas de, en condiciones anaerobias, transformar ácidos propenoicos, fórmico y acético, provenientes de la fase de acetogénesis, en metano CH₄ y dióxido de carbono CO₂.

En cambio, las bacterias metanogénicas hidrogenófilas, se encargan de, a partir del CO₂ generado y del hidrógeno producido en la fase de acetogénesis, producir simultáneamente metano CH₄ y agua H₂O. En esta etapa se produce el 90% del metano producido en el proceso de digestión anaerobia. A continuación, se representan las ecuaciones de la metanogénesis:

Metanogénesis acetoclásticas: $\text{CH}_3\text{OOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{O}_2$

Metanogénesis hidrogenófilas: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$

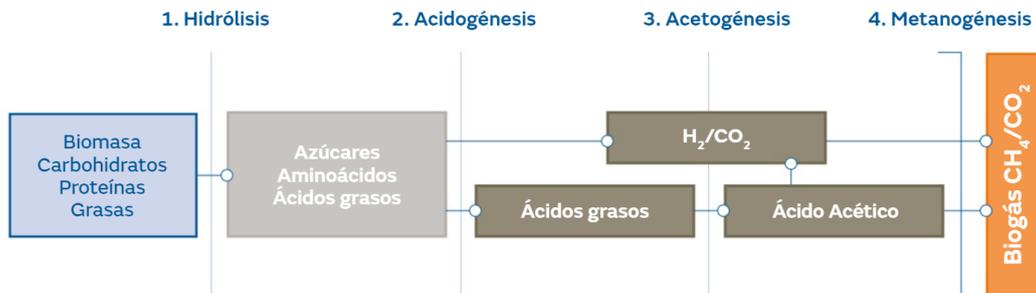


Figura 16: esquema de la digestión anaerobia (fundación naturgy)

d. Parámetros de producción del biogás

La producción del biogás depende absolutamente de organismos vivos, las bacterias. Es decir, el proceso de digestión anaerobia requiere de una constante supervisión y cuidado para atender a las bacterias y que puedan trabajar de manera eficiente. Estas bacterias son controladas por distintos parámetros como la velocidad del proceso, la materia orgánica disponible (recordamos que esta es la que alimenta a las bacterias y la que se descompone gradualmente en biogás), los nutrientes e inhibidores, tiempo de retención y las condiciones ambientales a las que están sometidas las bacterias, es decir, temperatura y pH.

i. Velocidad del proceso

Si hablamos de la velocidad del proceso, esta se ve fuertemente condicionada por las fases de generación de biogás. Como hemos visto antes, las fases se suceden entre sí, es decir, los productos de una son posteriormente utilizados por la siguiente fase para generar sus propios productos y así sucesivamente. Por esta razón podemos llegar a la conclusión de que la velocidad del proceso se ve condicionada por la etapa del proceso más lenta.

Dependiendo del sustrato introducido en el digestor, los procesos serán más o menos largos. Si hablamos de sustratos solubles, la hidrólisis tendrá una actuación más leve ya que los sustratos son solubles. En esta situación será la metanogénesis la etapa más lenta. Para agilizar este proceso se puede aumentar la concentración de organismos metanogénicos en el reactor para que contribuyan a una digestión más rápida y eficaz.

En cuanto a residuos cuya materia orgánica sea compuesta por partículas, la fase inicial de disolución, la hidrólisis será la fase más lenta. El agua tardará de dos a tres semanas en disolver la materia orgánica en ácidos grasos, alcoholes, aminoácidos y azúcares. Una solución sencilla y muy intuitiva para aumentar la velocidad de digestión conlleva triturar o disminuir el tamaño de las partículas para facilitarle el trabajo a la hidrólisis y que esta se lleve a cabo más rápidamente.

ii. Materia Orgánica

El biogás proviene de la digestión de la biomasa, la biomasa es materia orgánica. Existen dos tipos de materia orgánica distintos. Como comentado anteriormente, es de esencial importancia la hidratación a la que está expuesta la materia orgánica antes de entrar en el sistema de digestión anaerobio. Podemos diferenciar dos tipos de materia orgánica, la Materia Seca (MS) y la Materia Orgánica Seca (MOS). La diferencia entre estas dos es la siguiente:

La materia seca se refiere a la materia restante tras haber sometido al sustrato a 103-105 °C. Mientras que la materia orgánica seca es el material orgánico descompuesto a 550°C. Esta diferenciación es de esencial importancia ya que las bacterias metanogénicas crecen y trabajan de forma eficiente si el contenido de materia seca es inferior al 50%. Esto crea un factor a tener en cuenta a la hora de cargar los digestores. Se busca maximizar el contenido en materia orgánica sin sobrepasar los valores máximos de materia orgánica seca. De esta manera maximizamos la producción de biogás sin alterar el desarrollo de la bacteria metanogénicas. Según un estudio de la fundación Naturgy, “la carga orgánica óptima debería estar comprendida en el intervalo 2,0 – 5,0 kg MOS/(m³d)”, es decir entre dos y cinco kilogramos de materia orgánica seca por cada metro cúbico disponible.

iii. Nutrientes e inhibidores

Igual que con la materia orgánica, la clave para el funcionamiento eficaz de la digestión anaerobia es el desarrollo de las bacterias que se encargan de generar el biogás, las bacterias metanogénicas. Para su correcto desarrollo ya se ha hecho hincapié en la cantidad máxima de materia orgánica a introducir en el digestor. Sin embargo, también se debe tener en cuenta la disponibilidad de los nutrientes con los que las bacterias se alimentan.

Los principales nutrientes de las bacterias metanogénicas son el carbono y el nitrógeno. Según el mismo estudio realizado por la fundación Naturgy, “se sugiere que la tasa de carbono – nitrógeno (C:N) esté en un rango de 16:1 – 25:1”. De esta manera se asegura el correcto desarrollo de las bacterias. Una tasa inferior a esta desencadenaría en una producción de amonio por parte de las bacterias. El amonio en el digestor actúa como inhibidor, es decir, las bacterias no podrían digerir el sustrato y el biogás no se produciría. Por lo contrario, una tasa demasiado alta de carbono-nitrógeno, es decir, un aumento del carbono con respecto al

nitrógeno afecta directamente a la producción de proteínas por parte de la bacteria. Esta producción de proteínas ralentiza enormemente el proceso evitando una multiplicación y desarrollo de proteínas.

Además, se debe prestar especial atención a productos como desinfectantes, antibióticos y ácido orgánicos ya que actúan como inhibidores matando a las bacterias y haciendo la digestión imposible.

iv. Temperatura y pH

Una vez más, el objetivo del control de la temperatura y del pH es adecuarlo para que las bacterias metanogénicas actúen en condiciones óptimas. Como se puede ver, todos los ajustes que se van a llevar a cabo en el digestor están enfocados con el mismo objetivo, que las bacterias trabajen en condiciones óptimas. Este enfoque es lógico ya que son estas las que se encargan de consumir la materia orgánica y transformarla en biogás. Tras la actuación de las acidogénicas y de la hidrólisis, dos procesos mucho menos exigentes en cuanto a parámetros que las metanogénicas.

Las bacterias metanogénicas viven en temperaturas en el intervalo de 0°C a 70°C. Dentro de esas condiciones de vida estas bacterias trabajan de forma óptima en temperaturas de entre 35 °C y 60 °C. Se pueden diferenciar dos zonas de trabajo según la temperatura a la que están sometidas las bacterias, la primera, de 35-40°C conocida como la digestión mesófila y la segunda de 55-60°C conocida como la digestión termófila. Pese a tener nombres particulares no es de mayor relevancia a nuestro estudio explicar la diferencia entre las dos.

En cuanto al pH de desarrollo óptimo de las bacterias, este rondaría entre los 6,6 y 7,6, pH neutro. En condiciones superiores o inferiores a dicho pH la metanogénesis se ve inhibida. Los digestores requieren de un sistema de sensores realimentado capaz de controlar de manera constante los valores de temperatura y pH para asegurarse que las bacterias metanogénicas están en condiciones óptimas de desarrollo.

v. Tiempo de retención

La biomasa introducida en el digestor debe permanecer en el digestor hasta que se realicen los 4 procesos detallados anteriormente. Y sean residuos orgánicos o sustratos, estos deben de estar sometidos a las condiciones óptimas explicadas en los apartados superiores para que las bacterias actúen de manera eficiente y rápida. Hasta que no se acaben estos procesos no se sacará la materia orgánica del digestor. Alrededor de 35 días son necesarios para que estas 4 fases se lleven a cabo. El objetivo es extraer la máxima producción de gas del combustible insertado en el digestor. A continuación, se muestra la evolución de los sólidos volátiles contrastado con la producción de gas según pasan los días en un reactor continuo de mezcla completa:

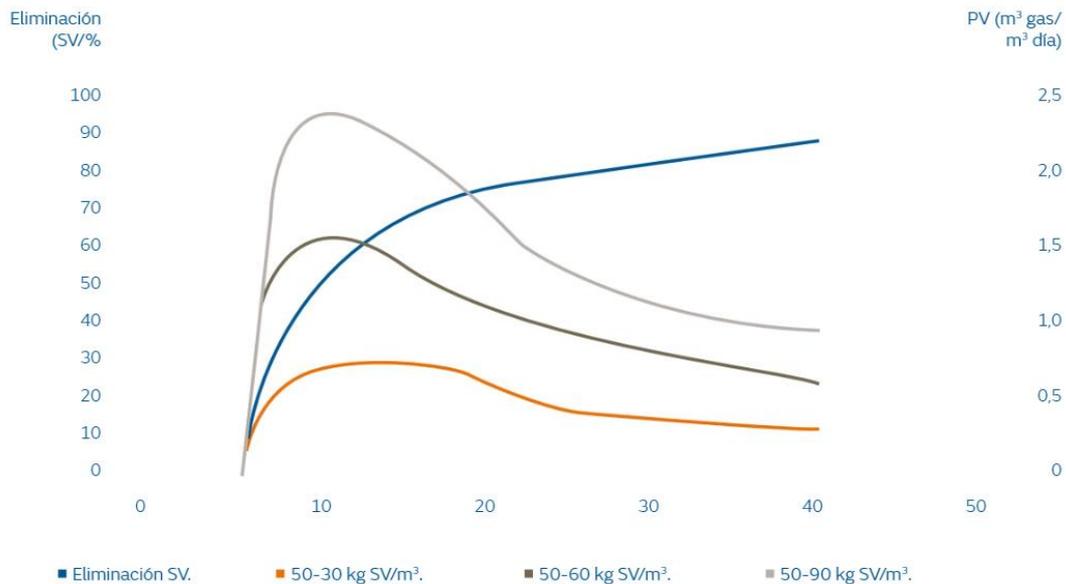


Figura 17: eliminación de los sólidos volátiles y producción volumétrica de gas en función del tiempo de retención para un reactor continuo de mezcla completa. Fuente:GIRO

d. Fuentes de biomasa o sustratos

Como se acaba de ver la generación de biogás depende esencialmente de parámetros que afectan al desarrollo de las bacterias responsables de transformar (o digerir) la biomasa en biogás. En efecto, se trata de mantener siempre las condiciones óptimas para que los procesos de hidrólisis, de acidogénesis, de acetogénesis y de metanogénesis se produzcan de la manera más eficiente posible. Principalmente se atiende a cinco variables detalladas anteriormente que se pueden modificar en el digestor, la velocidad del proceso, la temperatura y pH del digestor, el tiempo de retención, la materia orgánica seca que limita la producción máxima y la presencia o no de inhibidores.

Dicho esto, existen distintos tipos de sustratos que introducir en el digestor anaerobio. Se diferencian unos de los otros por el origen de la materia orgánica que los forma. Distintas fuentes de extracción de biomasa generan distintos tipos de biomasa que serán utilizados como sustratos en los digestores. A continuación, se pretende presentar un estudio sobre los principales productores de biomasa en el mercado y la disponibilidad que presentan en el mercado. A partir de ellos se podrá generar distintos tipos de biogás:

1. Biogás agropecuario
2. Biogás proveniente de EDAR
3. Biogás agroindustrial
4. Biogás proveniente de vertederos
5. Biogás procedente FORSU (fracción Orgánica de residuos sólidos urbanos)

i. Residuo Agropecuario

Según la Real Academia Española, RAE, la definición de agropecuario es la siguiente: “Que tiene relación con la agricultura y la ganadería”. A través de esta definición extraemos que los residuos agropecuarios son los procedentes de la agricultura y la ganadería.

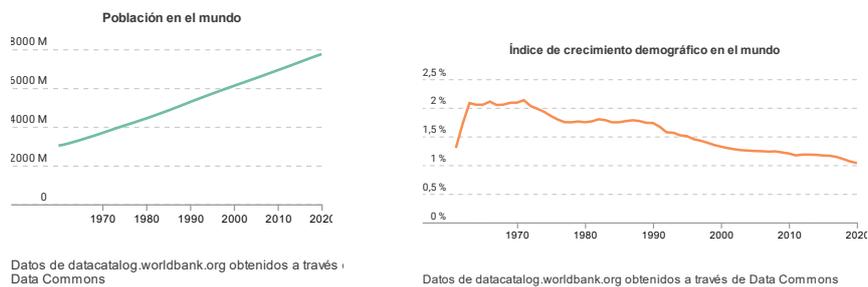
El estiércol es el residuo agropecuario que más nos interesa. En efecto, todo animal de ganadería se puede considerar como una maquina incesante de producción de estiércol. A continuación, se presenta un gráfico indicando la cantidad de animales de ganadería en España:



Figura 18: (Fuente: Estadísticas del gobierno (CONAMA; MAPA; INE))

Tras analizar esta tabla se puede comprobar la abundancia de granjas en España y por consiguiente la abundancia de generación de residuos orgánicos producidos por estas. Con 6,7 millones de animales de ganadería, 32,6 millones de cerdos y 0,8 millones de aves sacrificadas en 2020, existe una gran abundancia de recursos orgánicos en el sector agropecuario. No solo abundan, sino que además se pueden considerar como recursos inagotables ya que su producción y la de estiércol consiguiente es constante e ininterrumpida.

La industria agropecuaria está fuertemente relacionada con el cambio climático. La población mundial tiene una tasa de crecimiento anual positiva, esto se traduce en una evolución demográfica del mundo positiva. Es decir, un aumento sustancial de las personas que viven en el mundo como podemos comprobar a continuación:



Figuras 19 y 20

Esto ha generado numerosos problemas de alimentación en el planeta. Una alimentación que se ve directamente relacionada con la producción agrícola. En efecto, el 40% del alimento procedente del sector agrícola es de origen animal. Un aumento tan marcado de la densidad demográfica del planeta conlleva un aumento de la producción agrícola y una dependencia importante del sector agropecuario.

Como se ha visto anteriormente, el estiércol contiene cantidades importantes de nitrógeno, fósforo y potasio. Tres nutrientes que son utilizados hoy en día como fertilizantes en la agricultura. Sin embargo, un abuso en las concentraciones de estos nutrientes puede desembocar en la contaminación del suelo, agua y aire. La tierra tiene un límite de absorción de nutrientes. Sucede que una vez alcanzada la capacidad máxima de captación de nutrientes estos pasan a filtrarse por flujos de agua o a depositarse sobre los cultivos que son ellos mismos consumidos por el hombre o la ganadería. Estos nutrientes como el nitrógeno en forma de nitrato o de nitrito pueden causar la intoxicación del ganado. Otros microorganismos patógenos procedentes del estiércol pueden a su vez ser dañinos para el sistema endocrino y puede desarrollar malformaciones en el cuerpo humano.

En cuanto al exceso de nutrientes que sufre infiltraciones y escurrimientos por flujos de agua también tienen un impacto negativo para el medio ambiente. El fósforo, pese a no ser tóxico para el medio ambiente actúa como nutriente en fondos acuáticos y impulsa la eutrofización de estos fondos. La eutrofización hace referencia al desarrollo masivo de algas y plantas submarinas, estas consumen con mayor abundancia el oxígeno del agua y hacen variar el pH de esta contaminando el agua y afectando fuertemente a la biodiversidad marina.

Tipo de animal	Deyecciones (Kg/día)	Sólidos totales (%)	Producción Máxima de gas (L/Kg SV)	% CH4
Ternereros	21	13	220 – 200	55- 60
Vacas	45	13	220 – 400	55 – 60
Porcino eng.	5	6 – 10	300 – 400	68 – 70
Gallinas	0,1	30 – 50	350 – 450	65 – 70

Si nos centramos en la contaminación atmosférica, el estiércol participa en la producción de gases de efecto invernadero. Efectivamente, el estiércol sufre una fermentación aerobia que descompone la materia orgánica soltando a la atmosfera malos olores, metano entérico, metano de estiércol y óxido nitroso en cantidades del orden de 113, 40 y 10 Tg CO₂ Eq (EPA, 2005).

La introducción de controles ambientales para evitar los problemas descritos ha generado una abundancia de estiércol, una reducción en el coste de obtención y un incentivo más para utilizarlo como combustible de biomasa. Al introducir residuos agropecuarios en el digestor anaerobio, se estarían aprovechando los elementos responsables de contaminar suelo, agua y aire para generar biogás. Es decir, se estaría usando una fuente de contaminación para convertirla en una fuente de generación de biogás y por consecuente de electricidad.

Para garantizar un control óptimo de la digestión anaeróbica del estiércol es necesario controlar los parámetros discutidos en el apartado C. de este trabajo. Sin embargo, podemos resaltar que es de gran importancia con este preciso sustrato el control de la temperatura y del pH del digestor. Se busca una temperatura mesofílica de entorno a los 37 °C. Además, la relación de carbono-nitrógeno del estiércol es del orden de 25:1 valor compatible con los márgenes de 20:1 a 30:1 que garantizan el desarrollo de las bacterias metanogénicas. Como principal obstáculo a la generación de biogás por parte del estiércol, la abundancia de agua y de nitrógeno que puede convertirse en inhibidor de las bacterias reduciendo así el potencial de producción de gas. Como comentado anteriormente, el estiércol en contacto con el aire sufre un proceso de fermentación en el que se libera metano. Esto dificulta enormemente el almacenaje de dicho sustrato. Con almacenajes superiores a los 3 meses se ven reducciones de producción del 70% de biogás. Dato a tener en cuenta. A continuación, se adjunta una tabla de la capacidad de extracción de gas en función del tipo de animal:

Figura 21: Valores aproximados de producción de gas según el tipo de animal (fundación naturgy)

No olvidar los residuos agrícolas, es decir, restos agrícolas procedentes de cultivos de consumo y cultivos energéticos para la industria alimentaria. Estos forman un sustrato adecuado para la generación de biogás en la digestión anaerobia. Sin embargo, están suscritos a la estacionalidad del cultivo.

ii. Residuos procedentes de EDAR

Por residuos procedentes de EDAR nos referimos a los lodos extraídos de las aguas residuales tratadas en las EDAR. Una EDAR es una Estación Depuradora de Aguas Residuales, esta se encarga de tratar aguas que han sido contaminadas por el uso humano, es decir, uso doméstico, uso urbano o industrial. A diferencia de la ETAP (Estación de Tratamiento de Agua potable), que trata aguas provenientes del entorno natural para introducirlas en la red de agua potable del estado en cuestión. La EDAR constituye de diferentes procesos en los que se va limpiando el agua hasta descontaminarla lo suficiente como para volver a introducirla en el sistema de potabilización ofrecido por la ETAP.

El agua residual se enfrenta en una primera instancia con un proceso de pretratamiento con el objetivo de eliminar materias gruesas, arenas, objetos flotantes y así evitar dañar los aparatos usados a continuación. Después, pasan por el tratamiento primaria, este consiste de un tratamiento físico-químico (dependiendo del estado de las aguas residuales) junto con una decantación primaria. Posteriormente las aguas residuales, cada vez menos contaminadas, transcurren su viaje por el tratamiento secundario y por la decantación secundaria. Pueden llegar a tener un tratamiento terciario dependiendo de las condiciones iniciales del agua. Los tratamientos tienen como objetivo reducir los valores de DQO y de DBO por debajo de 25 mg/L y 125 mg/l respectivamente, además se encargan de minimizar los sólidos en suspensión por debajo de un valor de 35 mg/L y de estabilizar la concentración de fósforo P y nitrógeno N en valores entre 1-2 mg/L y 10-15 mg/L respectivamente. Esto lo consiguen con procesos químicos y físicos que alteran las propiedades del agua tratada

En cuanto a la decantación, el objetivo es estabilizar el agua y filtrarla de forma a condensar la materia orgánica. La materia orgánica en el tratamiento es tratada químicamente de forma a generar flóculos que son posteriormente recolectados en la decantación. A partir de la decantación primaria y secundaria surge una nueva línea de tratamiento en la EDAR. Esta es la línea de fangos, que es la que interesa a nuestro estudio. Esta línea es, en efecto, la que se encarga de tratar los residuos orgánicos extraídos de las aguas residuales. Entre los tratamientos de fango ofrecidos por las EDAR existe la posibilidad de incluir en el proceso un digestor anaerobio. De esta forma se obtendría una central completamente capacitada con su sistema de depuración del agua y su realimentación energética con el gas obtenido del fango extraído tras pasar por el digestor. A partir de los residuos extraídos del agua residual se podría alimentar la central con el gas producido. Además, numerosos modelos de negocio plantean aprovechar los biodigestores ya instalados en estas centrales para generar su propio biogás vendiendo a la central el combustible biomásico. Cabe resaltar que el digestor anaerobio no solo permite la generación de biogás que abarata costes, sino que además trae ventajas de deshidratación y posterior uso del digestato producido.

Adjuntamos a continuación un esquema de una EDAR con realimentación energética por biogás:

1. Agua&Biogás: La Biofactoría

Contribución de la Biofactoría a la Transición Ecológica en España

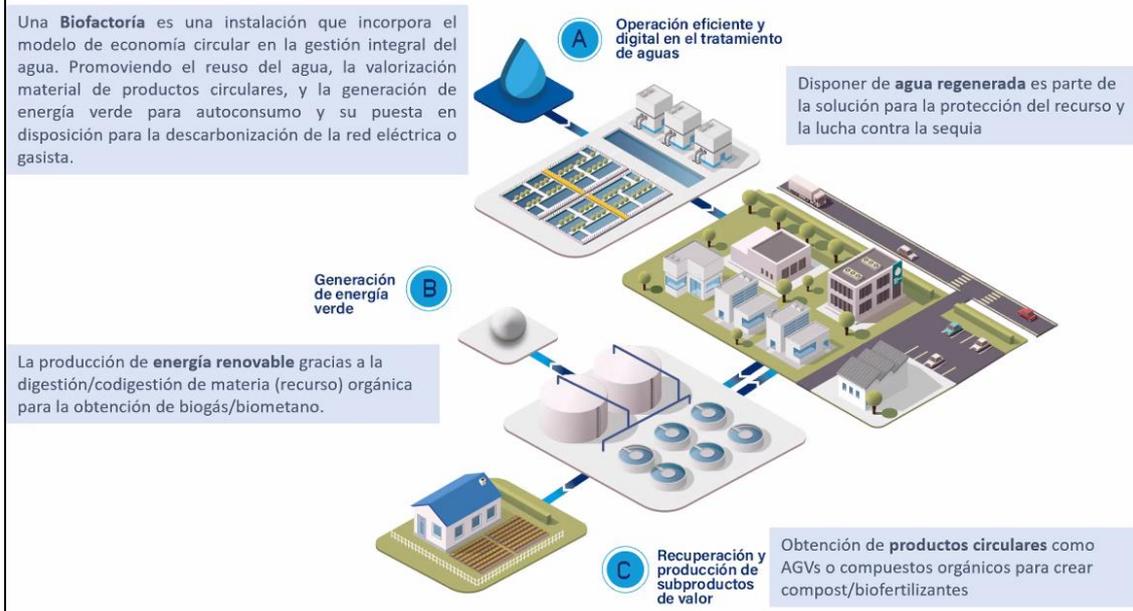


Figura 22: EDAR con realimentación energética por (veolia)

Además, se añade una tabla que expresa la cantidad de biogás que se puede extraer de los distintos tipos de fangos extraídos de la EDAR:

Tipo	Sólidos Volátiles (%)	Producción de biogás (m3/tonelada)
Fangos de flotación	13-18	90-130
Fangos residuales	3-4	17-22
Fangos residuales concentrados	15-20	85-100

Figura 23 (Fuente: Fundación naturgy)

iii. Residuos agroindustriales

Por residuos agroindustriales se entiende a cualquier residuo orgánico generado en cualquier punto de la cadena de suministro de alimentos. Ya sea en las etapas de producción, tras la cosecha, en el procesamiento industrial, en la distribución de la mercancía o en el consumo doméstico. La industria agroalimentaria genera grandes cantidades de residuos orgánicos. Son de particular interés las industrias cárnicas, cerveceras, azucareras, lácteas, conservas y

similares. Estas producen residuos con alta carga de materia orgánica y extraen un mayor potencial de biogás.

Se adjunta a continuación una tabla con el potencial de extracción de biogás en función del tipo de industria agroalimentaria:

Tipo	Contenido orgánico	Sólidos volátiles (%)	Producción de biogás (m3/ton)
Intestinos + contenidos	Hidratos de carbono, proteínas, lípidos	15-20	50-70
BBO (tierras filtrantes de aceites, con bentonita)	80% lípidos 20% otros orgánicos	40-45	350-450
Aceites de pescado	30-50% lípidos	80-85	350-600
Suero	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	7-10	40-55
Suero concentrado	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	18-22	100-130
Hidrolizados de carne y huesos	70% proteínas 30% lípidos	10-15	70-100
Mermeladas	90% azúcares, Ácidos orgánicos	50	300
Aceite soja/margarinas	90% aceites vegetales	90	800-1000
Bebidas alcohólicas	40% alcohol	40	240

Figura 24 (Fuente: INE)

En este apartado tienen interés todos los residuos orgánicos producidos por la industria agroalimentaria. Del instituto nacional de estadística sacamos los siguientes datos:

	2015		
	TOTAL GENERAL	NO PELIGROSOS	PELIGROSOS
Comercio al por mayor e intermediarios del comercio. División 46			
07.7 Residuos que contienen PCB	16	0	16
09 Residuos animales y vegetales	541.774	541.774	0
11 Lodos comunes	2.190	2.190	0
12 y 13 Residuos minerales y residuos solidificados y vitrificados	10.196	10.024	172
Comercio al por menor. División 47			
07.7 Residuos que contienen PCB	0	0	0
09 Residuos animales y vegetales	137.918	137.918	0
11 Lodos comunes	20	20	0
12 y 13 Residuos minerales y residuos solidificados y vitrificados	2.702	2.615	87
Transporte y almacenamiento. División 49 a 53			
07.7 Residuos que contienen PCB	19	0	19
09 Residuos animales y vegetales	24.950	24.950	0
11 Lodos comunes	1.698	1.698	0
12 y 13 Residuos minerales y residuos solidificados y vitrificados	6.261	5.487	774
Hostelería. Divisiones 55 y 56			
07.7 Residuos que contienen PCB	0	0	0
09 Residuos animales y vegetales	318.420	318.420	0
11 Lodos comunes	709	709	0
12 y 13 Residuos minerales y residuos solidificados y vitrificados	1.073	1.064	10

Figura 25 (Fuente: INE)

Dentro de la cadena de consumición de los residuos agroindustriales entra también en juego los residuos domésticos de cada comunidad. Sin embargo, para este apartado se va a analizar de manera independiente a dicho residuos urbanos.

iv. FORSU, Fracción orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

En cuanto a la rama de residuos domésticos se observa que existe una gran producción anual de dichos residuos. Una vez más basándonos en el instituto nacional de estadística podemos extraer la siguiente tabla de las toneladas de residuos recolectados por zona en España:

	2019				
	Total nacional	Andalucía	Cataluña	Madrid, Comunidad de	Navarra, Comunidad Foral de
09. Residuos animales y vegetales	1.168.659	99.242	500.742	228.635	36.856
11 Lodos comunes (secos)	0	0	0	0	0
12 Residuos minerales (incluye residuos de construcción y demolición)	521.572	91.308	97.781	32.732	75

Figura 26 (Fuente: INE)

Se puede observar que una cifra de 1 168 659 toneladas de residuos animales y vegetales al año representa una fuente a considerar a la hora de alimentar el biodigestor anaerobio. El estudio vigente se interesa a la fracción orgánica de residuos municipales, también conocida como FORM. Vale la pena resaltar que existen distintos tipos de FORM y que, dependiendo de su procedencia, de su estado y de su recolección estos tendrán más o menos potencial energético a la hora de generar biogás. A continuación, se adjunta una tabla representando el componente residual y su potencial de generación de biogás:

Componente	L CH ₄ /Kg SV	Referencia
FORM separada en origen	240-280	Kübler et al, 1999
Residuos de cocina	600-700	Kübler et al, 1999
FORM separada en origen 2	200-300	Ahring et al, 1992
FORM recogida selectiva	477	Mata et al, 1991
Papel prensa	84-100	Clarkson, 1999

Figura 27 (Fuente: Fundación naturgy)

Estos residuos son tratados en ecoparques. Un ecoparque es una instalación de recogida de residuos selectiva. Es una instalación en la que se tratan los residuos de manera a reaprovechar los materiales que puedan ser aprovechados. Del mismo modo que las estaciones de depuración de aguas residuales, muchos ecoparques poseen incorporados biodigestores de materia orgánica. En efecto uno de los principales residuos a reutilizar en los ecoparques son los residuos orgánicos. En una primera instancia, en el ecoparque se procede a un tratamiento mecánico en el que se separan los materiales recuperables de los orgánicos. Materiales recuperables como envases, plásticos, bricks, metales etc.

Una vez se separan estos materiales de los orgánicos se procede al tratamiento de estos últimos. Los materiales orgánicos recolectados de los residuos sólidos urbanos pasan por un proceso de metanización en un digestor anaerobio. De aquí se extrae biogás que sirve para generar electricidad de manera limpia y renovable. Vale la pena resaltar que este tipo de generación de

biogás contribuye directamente a la gestión de residuos urbanos. Es decir, no solo es una fuente de generación de electricidad limpia y renovable, sino que además contribuye al tratamiento y cuidados del medio ambiente reduciendo residuos y disminuyendo la aportación de estos a vertederos. El digestato extraído de la digestión anaerobia procede posteriormente a un proceso de fermentación aeróbica.

v. Biogás de vertedero

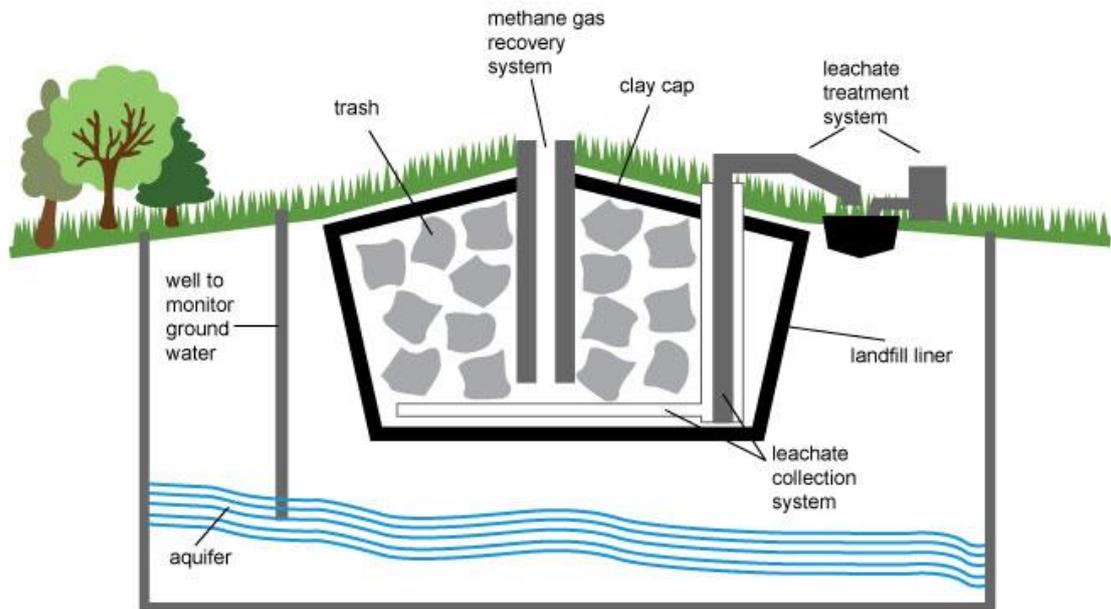
Todos los residuos que por cualquier razón no se han podido separar o no han llegado a los Ecoparques no son tratados como FORSU. Es decir, no acaban en un digestor anaerobio. Con una tasa de reciclaje del 35% en 2021 en España, porcentaje muy lejos del objetivo marcado por la comisión europea del 50% (Epe), se deduce que un 65% de las personas en España no recicla. Es decir, existe una gran proporción de materia orgánica que no es tratada en ecoparques. Esta materia orgánica junto con otros residuos se verá vertida en un vertedero municipal.

Sin embargo, existe la posibilidad, mucho menos eficiente de generar biogás en los vertederos. Un vertedero es un espacio de dimensiones considerables repleto de residuos de todo tipo, entre ellos de un 55-65% orgánicos. En el vertedero los residuos orgánicos se someten a una descomposición natural muy similar a la analizada en el ciclo de carbón.

Hay que definir el vertedero como un lugar de descomposición con flujo constante de aportación de residuos, es decir, cada x tiempo se añade una capa más de residuos a la superficie, simulando así el efecto de sedimentación producido en la naturaleza, pero a menor escala temporal. En una primera instancia, y como sucede en el ambiente natural con los residuos orgánicos, estos sufren una descomposición aerobia. Los residuos orgánicos, RO, se sitúan en las capas superficiales del vertedero y están en contacto con el aire. Dicha etapa suele durar entorno a un año, duración mucho más corta que la que sufren los RO en la naturaleza (del orden de cientos de años). Al cabo de este periodo y debido a la acumulación de capas de residuos en el vertedero, estos se van compactando y ganando profundidad. Esto conlleva un agotamiento del oxígeno disponible. En este momento comienza la descomposición anaeróbica. Se puede considerar el entorno de los ROs como un pequeño digestor anaerobio. Sin aportación de calor ni control de ninguno de los parámetros analizados, de manera natural, y mucho más lenta, los ROs pasan a sufrir una descomposición anaerobia como sufrirían en capas profundas de sedimentación en la naturaleza. De este proceso se produce un gas conocido como el gas de vertedero. Este proceso de descomposición dura en torno a 20 años, sin embargo, el gas se produce con una tase considerablemente estable durante más de 50 años.

Este gas es recolectado por una serie de tuberías establecidas en el vertedero. Es un gas menos rico en metano que el producido por el digestor anaerobio ya que contiene O₂ y N₂ debido a la entrada de aire en las tuberías. A continuación, se propone un modelo de vertedero con recolección de biogás:

Modern landfill



Source: Adapted from National Energy Education Development Project (public domain)

Figura 28: esquema de un vertedero con recuperación de biogás (EIA)

3. Tecnologías de producción y uso del biometano

Analizando el origen de la biomasa, se ha podido llegar al detalle sobre los procesos químicos envueltos en la digestión anaeróbica encargada de transformar dicha biomasa en biogás. Además, se ha descrito con detalle los parámetros clave a tener en cuenta a la hora de maximizar la eficiencia de extracción de biogás a partir de un sustrato de biomasa. Por último, se han recogido y discutido los lugares idóneos para la producción y recolección de biomasa así como sus potenciales de extracción de biogás. El biogás tiene una composición química que consiste en un 50% a 75% de metano CH₄, un 25% a 50% de dióxido de carbono y vapor de agua H₂O y trazas de oxígeno O₂, nitrógeno (N₂) y ácido sulfhídrico (SH₂). Sin embargo, para poder inyectarlo a la red de gas natural, este biogás tiene que pasar por un proceso de acondicionamiento. Este proceso conlleva un tratamiento que busca aumentar el porcentaje de metano del gas en cuestión eliminando, casi por completo, las trazas de CO₂. De esta forma se consigue un gas que cumple los estándares de calidad del gas natural, con un porcentaje de metano por encima de los 96%. Este biogás acondicionado pasará a llamarse biometano.

a. Producción del Biometano

Como se acaba de mencionar, el biogás es un gas formado por cantidades importantes de metano y CO₂ además de trazas de N₂, O₂, H₂, vapor de agua H₂O, COVs (cuerpos orgánicos volátiles) y siloxanos. El biometano resulta del biogás enriquecido en metano, obteniendo una concentración en metano del orden de 95-99%.

Para conseguir dicha concentración se hace empleo de dos etapas principales:

1. El acondicionamiento previo, consiste en la limpieza y pretratamiento del biogás. El objetivo es eliminar todos los compuestos del biogás que puedan interferir en las etapas posteriores. Más concretamente, se trata de proceder a una limpieza inicial del biogás eliminando los compuestos orgánicos volátiles y el ácido sulfúrico H₂S así como poner el biogás en condiciones óptimas para los siguientes tratamientos.
2. Posteriormente se procede al tratamiento conocido como “upgrading” en el que se consigue enriquecer el biogás y aumentar el porcentaje de metano de este. Al cabo de este proceso, el biogás pasa a llamarse biometano.

Existen múltiples tecnologías capaces de conseguir este upgrading. Entre ellas varían parámetros biológicos como la recuperación final de metano, las pérdidas de metano, la posibilidad o no de recuperar el CO₂ extraído y la eliminación de O₂ y de N₂. Además, también influye en la elección de la tecnología parámetros relacionados al consumo y a la inversión necesaria. Son procesos que requieren de un consumo de electricidad, de agua, de calor y de productos químicos. Dependiendo del uso final que se le va a asignar al biometano, se escogerá una u otra de las tecnologías que se comentarán a continuación.

i. Acondicionamiento previo

Como mencionado antes, este acondicionamiento tiene 2 objetivos principales. El primero es tratar el biogás de tal forma a eliminar los compuestos que puedan dañar o afectar a los utensilios y tratamientos posteriores, es decir, los tratamientos de upgrading. Más concretamente, se trata de eliminar el ácido sulfúrico H_2S , el vapor de agua H_2O , el amoníaco y los compuestos orgánicos volátiles, todos estos, además de carácter nocivo frente al medio ambiente. El segundo objetivo es llevar el biogás a condiciones de temperatura y presión óptimas para el desarrollo eficiente del upgrading. A continuación, se verán los distintos procesos por los que se trata al biogás en el acondicionamiento previo.

Tratamiento de humedad

Al salir del digester anaerobio, el biogás contiene una alta saturación en vapor de agua. Este vapor de agua no solo es un problema en cuanto a que afecta a la calidad del biogás reduciendo su porcentaje en metano, sino que, además, trae consigo el riesgo de dañar los equipos utilizados en los siguientes procesos. El vapor de agua trae consigo problemas de corrosión que acortan la vida de los aparatos empleados para enriquecer el gas. Para tratar con este problema, la solución es muy simple, enfriando el biogás extraído a temperaturas alrededor de los $6-8^{\circ}C$ se consigue el cambio de fase del agua de vapor a estado líquido generando así su condensación y separando el agua del biogás. Otra opción para conseguir esta separación es el proceso de incrementar la presión del gas. Al aumentar la presión también se consigue la condensación del agua.

Tanto para los pretratamientos posteriores como para el proceso de enriquecimiento, el biogás debe tener unas condiciones de presión y temperatura específicas. Debe estar a presión alta y temperatura baja. Por termodinámica básica, el ciclo de Carnot (representado a continuación) nos enseña que un aumento de presión de un gas conlleva un aumento en su temperatura:

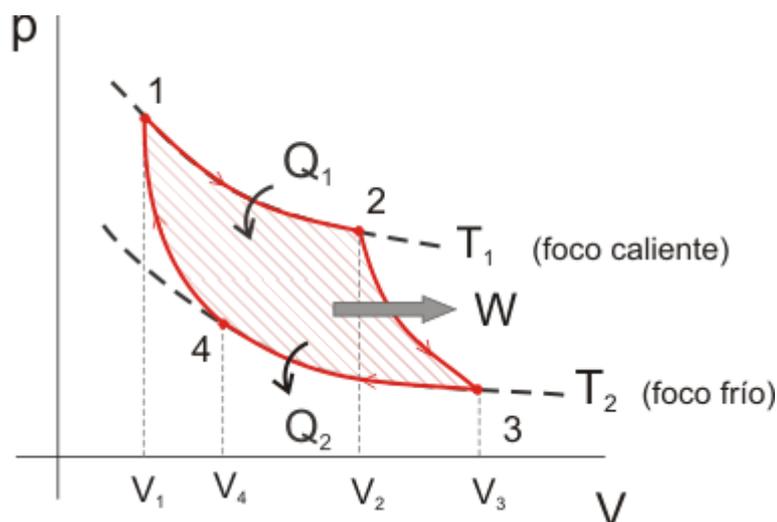


Figura 29: Ciclo de Carnot (Fuente: Google)

Por esta razón para conseguir las condiciones de temperatura y presión necesarias, se utilizan intercambiador de calor y compresor simultáneamente.

Eliminación de partículas y amoniaco

Las partículas presentes en el biogás pueden ocasionar daños mecánicos a cause de la erosión en los equipos de tratamiento del gas. Estas son retiradas con el empleo de filtros mecánicos instalados antes del proceso de upgrading. En cuanto al amoniaco, este es generado por la degradación de las proteínas del compuesto orgánico dentro del reactor. La concentración de dicho elemento viene muy relacionada con el tipo de sustrato introducido en el reactor y con el pH al que se mantiene el digestor. Este elemento no tiene especial peligro y suele ser eliminado durante el proceso de eliminación del vapor de agua o directamente en el upgrading.

Tratamiento frente al ácido sulfúrico (H₂S) y a los compuestos orgánicos volátiles (COVs)

El ácido sulfúrico proviene de compuestos sulfurados. En el biodigestor estos compuestos sufren una reducción biológica que genera H₂S. Estos pueden ser tratados dentro del mismo biodigestor o posteriormente a través de filtros. A través del uso de microorganismos como los Thiobacillus y Sulfolobus se puede conseguir la degradación del ácido. Estos microorganismos requieren de oxígeno para degradar el ácido sulfúrico por lo que vendrían acompañados de pequeñas aportaciones de oxígeno ya sea o no dentro del biodigestor. Sin embargo, también puede ser tratado por las tecnologías empleadas para eliminar los COVs como la adsorción con carbón activo.

El principal compuesto orgánico volátil que se busca eliminar es el siloxano, proveniente de la unión entre sílice y oxígeno. Este compuesto se forma principalmente en los digestores cuyos sustratos provienen de aguas residuales ya que la sílice es un elemento muy recurrente en productos de aseos utilizados en el ámbito doméstico. Más concretamente, se utiliza la sílice en geles y desodorantes. Estos compuestos cuando combustionan se convierten en polvo de color blanco, un polvo que puede ser causante de la obstrucción de equipos de upgrading debido a su acumulación.

Una vez conseguido un pretratamiento adecuado, el biogás pasa a la fase de upgrading en la que se procede a enriquecerlo en metano y extraer el CO₂. A continuación, se verán los procesos de upgrading posibles y sus características.

ii. Membranas

El objetivo del upgrading es lograr el enriquecimiento en metano del biogás extraído del biodigestor. Para ello es necesaria la separación del CO₂ del metano del biogás. La técnica basada en membranas consigue esta separación de manera muy eficaz y con muy pocas perdidas. En efecto, con esta técnica se consigue gas de concentraciones superiores a los 99,5% de metano y perdidas de tan solo 0,5%. ¿En qué consiste dicha técnica?

La separación de gases con membrana tiene como fundamento la diferencia de permeabilidad entre el CO₂ y el CH₄. En efecto el procedimiento es el siguiente, la molécula de metano tiene

mayor tamaño que la de CO₂, esto hace que el metano sea menos permeable. Se selecciona entonces una membrana con una permeabilidad específica. Esta permeabilidad será elegida de manera a que la difusión por la membrana sea de manera rápida para el CO₂ y lenta para el metano (por su mayor tamaño le cuesta más avanzar a lo largo de la membrana). A causa de una diferencia de presión importante entre la entrada y la salida de la membrana, al atravesar esta última, se crean dos corrientes de difusión. Una creada por los elementos de rápida difusión como el CO₂, el agua o el amonio, y otra de lenta difusión creada por el CH₄. Esta diferencia de corrientes permite extraer y recolectar el CO₂ del biogás. Para conseguir un mayor rendimiento se suele pasar el biogás por sucesivas etapas de membrana. De esta forma se consiguen los valores de pureza mencionados anteriormente.



Figura 30: Módulo de membranas (Bright Biomethane)

Esta técnica tiene costes altos debido a la compresión necesaria del biogás, del orden de 14/16 bar, sin embargo, permite la extracción y reutilización del CO₂ como recuperador de calor aumentando así la eficiencia del sistema.

iii. PSA, Pressure Swing Adsorption

Esta técnica de upgrading también se basa en la diferencia de tamaño molecular entre el metano y el CO₂. Para conseguir el enriquecimiento de biometano, se emplean materiales como el carbón activo y las zeolitas. Estos materiales, sometidos a presiones de entorno a 6 bar, son capaces de absorber los compuestos moleculares de menor tamaño, es decir, CO₂, H₂S, N₂ y O₂. A causa de su porosidad, las moléculas de metano, más grandes que las anteriores no llegan a penetrar el material y deslizan por él. De esta forma conseguimos la absorción del CO₂ y otros componentes.

Más concretamente, el proceso es el siguiente. Se preparan 4, 6 o 9 tanques con el material responsable de la adsorción. Se introduce el biogás a una presión de 6 bar. El CO₂ y el resto de los componentes de menor tamaño penetran por los poros del material y se quedan atrapados. De esta manera se consigue un flujo de salida de biogás enriquecido, es decir, de biometano. Cuando se alcanza el máximo de saturación del material, se para el flujo de biogás y se procede a la extracción del CO₂ y otros componentes sometiendo el tanque a una despresurización que genera una succión de dichos componentes. De esta forma se consigue la regeneración del material responsable de la adsorción.

Como aspectos a tener en cuenta de esta tecnología, hay que resaltar su fragilidad frente al vapor de agua y al ácido sulfúrico H₂S. El ácido sulfúrico es absorbido por el material de manera prácticamente irreversible evitando así el proceso de regeneración del material ya que se iría saturando en ácido poquito a poco hasta inutilizarlo. En cuanto al vapor de agua, este reacciona con el material adsorbente destruyéndolo. Como puntos positivos, este proceso de enriquecimiento es idílico para biogases con altas concentraciones de oxígeno y N₂ ya que estos componentes son fácilmente adsorbidos y retirados por el material adsorbente.

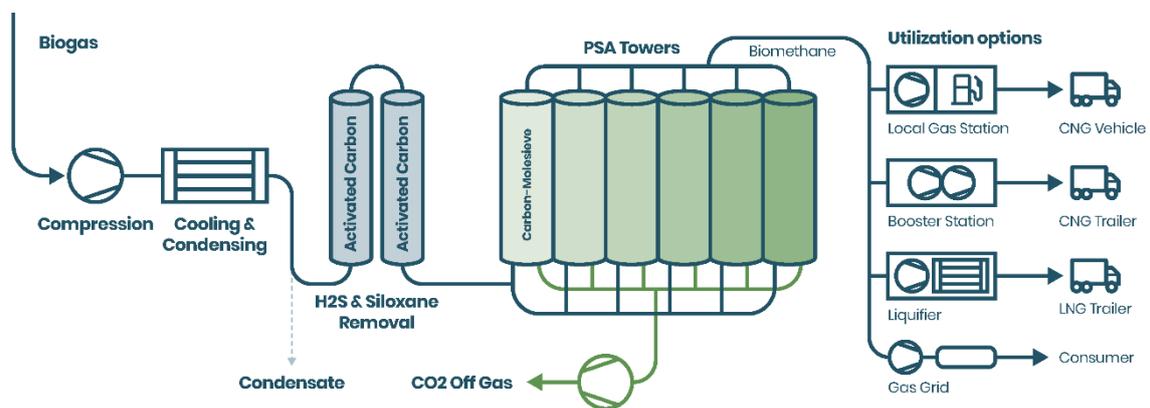


Figura 31: Esquema de una central de enriquecimiento por PSA (biovoima)

iv. Lavado con agua

Esta técnica de enriquecimiento se basa en la diferencia de solubilidad del CO₂ y del metano en el agua. Consiste en inyectar el biogás en columnas con agua presurizada llamadas “scrubber”. En estas columnas el CO₂ y una pequeña parte del metano serán absorbidas por el agua obteniendo así un flujo de salida de biogás fuertemente enriquecido en metano. A su vez, se somete el agua de la columna a un proceso de descarga en el que se consigue disolver el gas extraído. Este gas, formado por CO₂ y una pequeña parte de metano se vuelve a inyectar en los scrubbers junto con el biogás para conseguir rendimientos más altos. Este proceso requiere un secado posterior del biogás ya que sale con una saturación importante de agua. El agua del proceso es reciclada en una columna de desorción llamada “stripper”, donde se pone en contacto con un flujo de aire a presión en sentido contrario que provoca la liberación del CO₂.

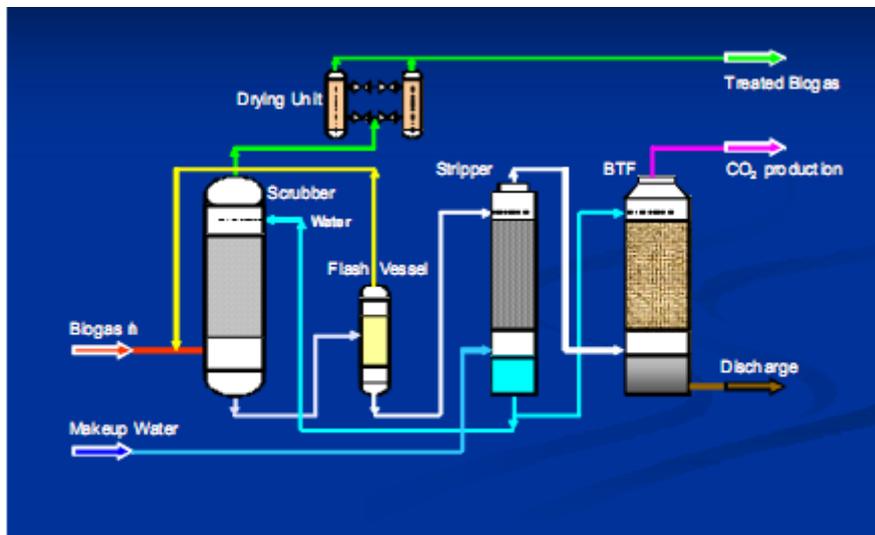


Figura 32: esquema de un sistema de enriquecimiento de lavado con agua (Fuente Google)

v. Absorción química

Este proceso es muy similar al de absorción con agua que se acaba de comentar. En lugar de utilizar agua y las características de solubilidad del CO₂, en este proceso se procede al empleo de solventes de amina como son el mono etanol amina (MEA) y el di-metil etanol amina (DMEA). Estos solventes reaccionan con el CO₂ en un absorbedor o scrubber, a 1-2 bar, como el del lavado con agua y liberan el CO₂ en un lavador o stripper a 1,5-3 bar. El CO₂ no solo es absorbido por el solvente, sino que además reacciona con él. Las aminas se pueden regenerar por calentamiento, aunque gran parte de ellas suelen necesitar ser regeneradas. En este proceso se consigue un biometano de purzas por encima al 99,5%.

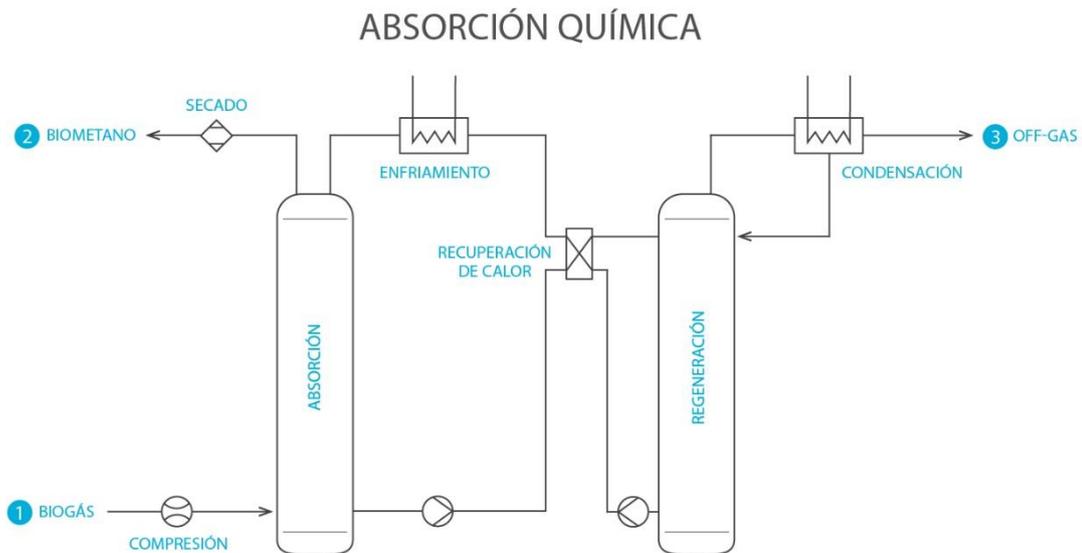


Figura 33: Esquema de un sistema de absorción químico de biogás (Fuente Google)

vi. Criogenia

La criogenia se basa en la diferencia en los puntos de ebullición entre el metano CH₄ y el dióxido de carbono CO₂. El metano tiene un punto de fusión de -184°C a 1 bar y el CO₂ de -78 °C a 1 bar. El proceso es el siguiente, se enfría el biogás hasta una temperatura alrededor de -120 °C. A esta temperatura el CO₂ precipita y se convierte en estado líquido mientras que el metano se mantiene en estado gaseoso. Esta etapa es conocida como la destilación criogénica y permite la extracción del CO₂ del biogás, convirtiéndolo en biometano. A continuación, se procede a la etapa de licuefacción del biometano. En esta etapa, se enfría a -184°C el biometano, el biometano en estado líquido facilita la separación con otros componentes como el N₂ u O₂. Gracias a estas etapas se consiguen purzas por encima de los 99,5% de biometano.

Como ventajas de este proceso, vale la pena resaltar el hecho de que se obtiene biometano líquido conocido como BioGNL, es decir, biogás natural líquido. Además, también se puede obtener CO₂ como hielo seco, producto reciclable y fácilmente comerciable. Como desventajas, se observa que para enfriar un gas hasta -184°C se requiere de un aporte de energía muy importante.

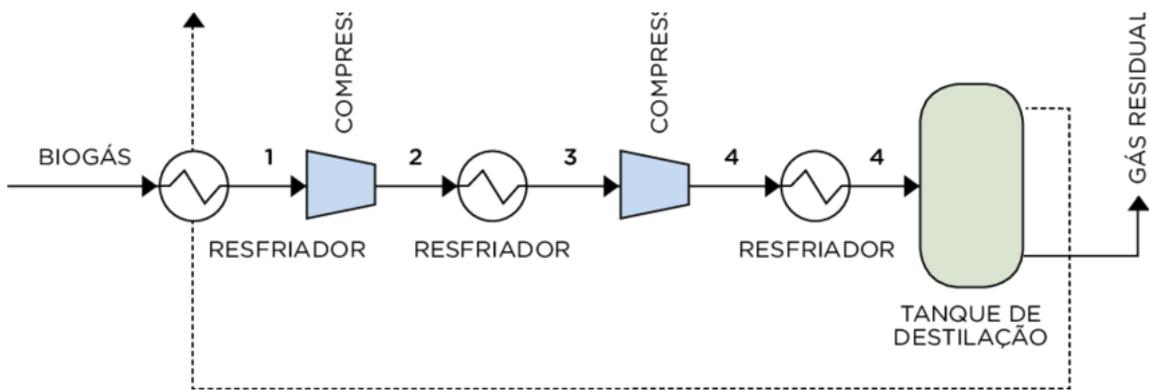


Figura 33: Esquema del proceso de criogenia (Research Gate)

Se adjunta a continuación una tabla resumen sobre los distintos procesos de enriquecimiento del biogás:

Sustrato	Membranas	Lavado con agua	Absorción química	PSA	Separación criogénica
Recuperación CH ₄ (%)	96-99,5	96-98	96-99,5	96-98,5	>99
Pérdidas CH ₄	0,5-2	0,5-2	0,1	1,5-2	0
Recuperación CO ₂	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Eliminación O ₂	Sí (aproximadamente 50%*)	No	No	Sí (aproximadamente 70%)	Sí 100%

Eliminación N2	No	No	No	Sí (aproximadamente 50%)	Sí 100%
Consumo de electricidad (kWh/Nm3)	0,2-0,3	0,2-0,3	0,5-0,6**	0,2-0,3	0,6-0,7
Consumo de agua	No	Sí	Sí	No	No
Consumo de calor	No	No	Sí	No	No
Consumo de productos químicos	No	No	Sí	No	Sí

Figura 34 (Fuente: Fundación Naturgy)

b. Usos del biogás

Como se acaba de detallar, existen diversos métodos para enriquecer y purificar el biogás obtenido de la digestión anaerobia de la biomasa. De distintas formas, unas más originales y complejas que otras, el objetivo final es el de, partiendo de un biogás compuesto por metano CH₄, dióxido de carbono CO₂, y otros compuestos como el vapor de agua H₂O, COVs, N₂, ácido sulfúrico H₂S etc., se consigue un gas con una concentración casi mayoritaria de metano. Del orden de un 99 % de metano. Una vez analizado estos procesos, se procede al análisis de los usos que se le pretenden dar a dicho biometano. Es decir, ¿Qué se puede hacer con este biometano? ¿Es compatible con la red de distribución de gas natural? ¿Es compatible como combustible para impulsar los vehículos motorizados de hoy en día? ¿Se puede producir electricidad con dicho biometano? ¿Sale rentable?

i. Inyección a la red

En una primera instancia, se discute la inyección de dicho gas a la red de distribución de gas natural. En España, en 2015, la red de distribución de gas natural alcanzó los 83 830 kilómetros alimentando así a más de 7,3 millones de clientes, según datos del ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Hablando de temas técnicos, la red de distribución de gas lleva unos requisitos muy estrictos en cuanto a la calidad del biometano a inyectar. Según el protocolo de detalle PD-01, el biometano debe cumplir una serie de controles de calidad antes de ser inyectado a la red de distribución de gas natural. A continuación, se adjunta una tabla que lista los límites de composición del biometano según el protocolo de detalle PD-01:

Parámetro	Unidades	Cantidad
Metano CH4	%mol	>90
O2	%mol	<0,3
CO2	%mol	<2
Índice Wobbe	kWh/m3	13,403-16,058
PCS	kWh/m3	10,26-13,26
Densidad relativa		0,555-0,7
Punto de rocío	°C	<-8
S total	Mg/m3	0-50
H2S + COS (como S)	Mg/m3	0-15
RSH (como S)	Mg/m3	0-17
Polvo/partículas		Técnicamente puro
CO	%mol	0-2
H2	%mol	0-5
Flúor/cloro	Mg/m3	0-10/1
NH3	Mg/m3	0-3
Hg	Microg/m3	0-1
Siloxanos	Mg/m3	0-10
BTX	Mg/m3	0-500
Microorganismos		Técnicamente puro

Figura 35: (Fuente EBA)

El biometano se inyecta a la red a través de una planta de inyección de gas. En dicha planta se realizan constantes controles en los que se asegura que el gas cumplimenta con los valores establecidos por el protocolo de detalle PD-01. Para asegurarse de esto, estas plantas tienen unidades de:

1. Análisis de calidad del gas, mediante cromatógrafo de gases
2. Medida de la cantidad del gas, mediante caudalímetro
3. Filtrado, para filtrar impurezas sólidas y líquidas que se pudieran haber quedado en el gas
4. Regulación de presión, a través del uso de válvulas reguladoras
5. Odorización del gas
6. Inyección de biometano

ii. Gas natural vehicular

El gas natural vehicular es gas natural empleado como combustible para alimentar motores de vehículos. Con una concentración alta de hidrógeno por átomo de carbono, \$hidrógenos por carbono, este combustible se posiciona en primera posición entre los combustibles más limpios ya que produce menos dióxido de carbono. Según el ministerio de transporte e infraestructura digital alemán, este combustible es el único combustible sostenible que se presenta como alternativa al diésel. Si se utiliza como gas natural vehicular un gas procedente de fuentes renovables, es decir, biometano este combustible es considerado como “combustible de emisiones cero” llegando incluso a considerarse como de emisiones de CO2 negativas. Otra de sus ventajas es el precio de dicho combustible, considerado en hasta un 50% más barato que el de los combustibles habituales.

El gas natural vehicular es utilizado especialmente por empresas transportistas, camiones, autobuses y servicios de reparto. Para su utilización por dichos vehículos se debe utilizar como Gas Natural Comprimido GNC. A presiones de entre 200 y 250 bar, este gas se transporta en fase líquida. A cambio, el Gas Natural Líquido es un gas que se utiliza a presión atmosférica, pero a una temperatura de aproximadamente -161 °C convirtiéndolo así en líquido. Tanto el GNC como el GNL son combustibles procedentes de gas natural en estado líquido. El GNC tiene su estado líquido debido a su compresión, mientras que el GNL debe su liquidez a la temperatura en el que es utilizado.

Además, el GNC posee una menor autonomía que el GNL de entorno a unos 400 km por depósito. Sin embargo, este combustible tiene ventajas en cuanto a su instalación en el vehículo convirtiéndolo así en un combustible ideal para vehículos que no hagan largos recorridos como vehículos de reparto dentro de la ciudad. En cuanto al mercado de vehículos propulsado por gas natural, desde el año 2014 se ha producido un fuerte aumento, del orden de un 300% pasando de cifras entorno a los 4500 parques de vehículos frente a 18 000 en 2019:

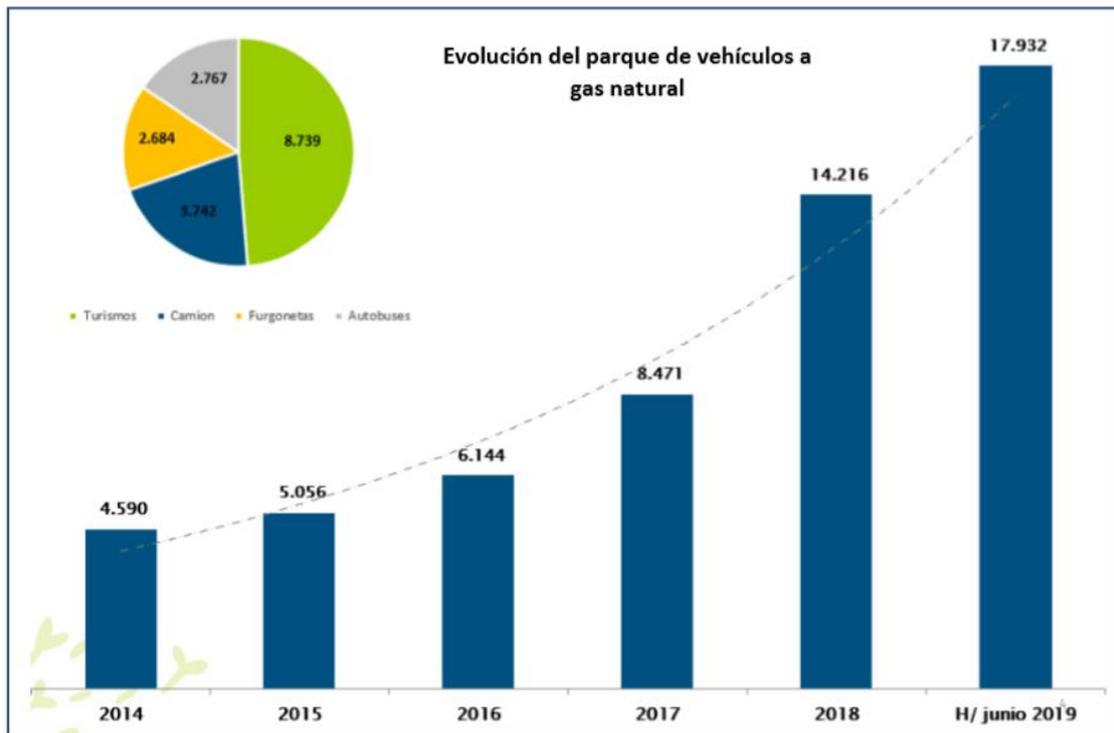


Figura 36: Evolución del parque de vehículos a gas natural de 2014 a 2019 (Transporte 3)

El GNL como ya se ha visto, se transporta a presión atmosférica, pero a temperaturas de -161°C . Con un volumen mucho menor que el del GNC el GNL ha ganado mucha popularidad en vehículos que recorren largas distancias como camiones. Esta ventaja en cuanto a volumen se ve principalmente reflejada en la capacidad de almacenamiento en un depósito de combustible que es directamente proporcional a la autonomía potencial del vehículo. Una autonomía que oscila entre 700 y 1000 km.

iii. Producción de electricidad

El biometano puede a su vez ser utilizado como combustible en motores de cogeneración. Un motor de cogeneración es un motor del cual a través de un único combustible se extrae energía eléctrica y energía térmica. Tienen un funcionamiento muy sencillo, como cualquier central térmica de ciclo combinado. En una primera instancia se introduce el gas a presión en la central a través de una turbina. Una vez el gas en la central se procede a su combustión. Esta combustión desprende calor que convierte un circuito de agua en vapor a través de un intercambiador de calor. Este vapor a presión hace girar otra turbina que es la encargada de transmitir la energía mecánica (la del movimiento de las palas) a energía eléctrica gracias a un alternador. El calor producido por la combustión del gas se transmite a otro intercambiador de calor en el que pasa un flujo de agua. Esta agua calentada puede ser posteriormente utilizada por cualquier vivienda.

Si se recuerda el análisis inicial del trabajo en el que se discutía sobre los puntos fuertes y débiles de la producción de energía de otras fuentes renovables como la eólica y la hidráulica, se extraían estas conclusiones:

1. La generación de electricidad en centrales hidráulica tiene la ventaja de poder almacenar la energía como agua embalsada, sin embargo, requiere de unas condiciones topográficas específicas además de una inversión importante.
2. En cuanto a la eólica, depende absolutamente de un recurso variante e imposible de almacenar: el viento.

Si se contrasta con el biometano, se tiene una fuente de energía inagotable (como se ha visto en otros apartados, las fuentes de materia orgánica generan dicha materia de manera incesante), fácilmente almacenable (tanto inyectándola en la red de distribución como almacenándola en bombonas) y compatible con centrales de ciclo combinado ya existentes. Es decir, se ha encontrado una alternativa para la producción de electricidad fósil, que no solo es renovable, sino que, además, comparte todas las ventajas y propiedades de los combustibles de los cuales tenemos hoy en día tanta dependencia.

iv. Rol del biometano en la economía circular

Como ya se ha comentado, el biometano procede de la biomasa que es recolectada en numerosos sectores de la industria. Ya sea en la industria agropecuaria, en la industria alimentaria o en las plantas de tratamiento de aguas residuales, todas estas tienen algo en común: la biomasa recolectada es considerada un residuo para estas industrias. Es decir, es el producto residual resultante de otra actividad económica. Todas estas industrias tienen objetivos diferentes, cosechar cultivos, limpiar aguas residuales, comercializar carne, producir alimentos... Al llevar a cabo la producción del elemento que pretenden comercializar, surge un producto residual que hasta hace poco no tenía ningún valor y se despreciaba. Con la aparición de las tecnologías de digestión anaerobia y de enriquecimiento de metano se consigue dar valor a un producto residual que se consideraba como deshecho. Como dice la Fundación para la Economía Circular, “la economía circular es una estrategia que engloba un nuevo sistema económico y social que tiene como objetivo la producción de bienes y servicios al tiempo que reduce el consumo y el desperdicio de materias primas, agua y fuentes de energía”.

En efecto, según esta definición se observa cómo el objetivo de la producción de biometano es la utilización de residuos considerados como de valor nulo, para aprovecharlos como fuentes de energía. Es decir, se está considerando el producto residual de una actividad económica como materia prima de otra actividad económica. Una actividad económica que, a su vez, sirve como alimentación a la primera en términos energéticos. De esta forma se ve como se cierra el bucle económico y ecológico de los recursos empleados. Oponiéndose así al antiguo régimen basado en la extracción, producción, consumo y eliminación. Se reemplaza la eliminación como reutilización.

De forma más exacta, se ha visto como a través de residuos de diferentes sectores económicos se puede extraer múltiples tipos de biomasa que servirán de sustratos para la digestión anaerobia. Como producto de dicha digestión se consigue biogás, que será tratado y enriquecido en metano para su uso en la red de gas natural, y digestato. El digestato es el material residual que se genera a partir de la digestión anaerobia. Este digestato, puede ser reutilizado como fertilizante en la industria agrícola o como materia prima en la obtención de bioproductos como la producción de biopesticida gracias al empleo de la bacteria *Bacillus thuringiensis*.

Como se puede observar el producto de todas las actividades económicas realizadas en estos sectores (fuentes de biomasa) sirve como materia prima a la siguiente actividad económica (generación de biogás). El residuo de esta segunda actividad económica (biometano y digestato) sirve a su vez como materia prima de la primera actividad económica, creando así una economía circular perfecta.

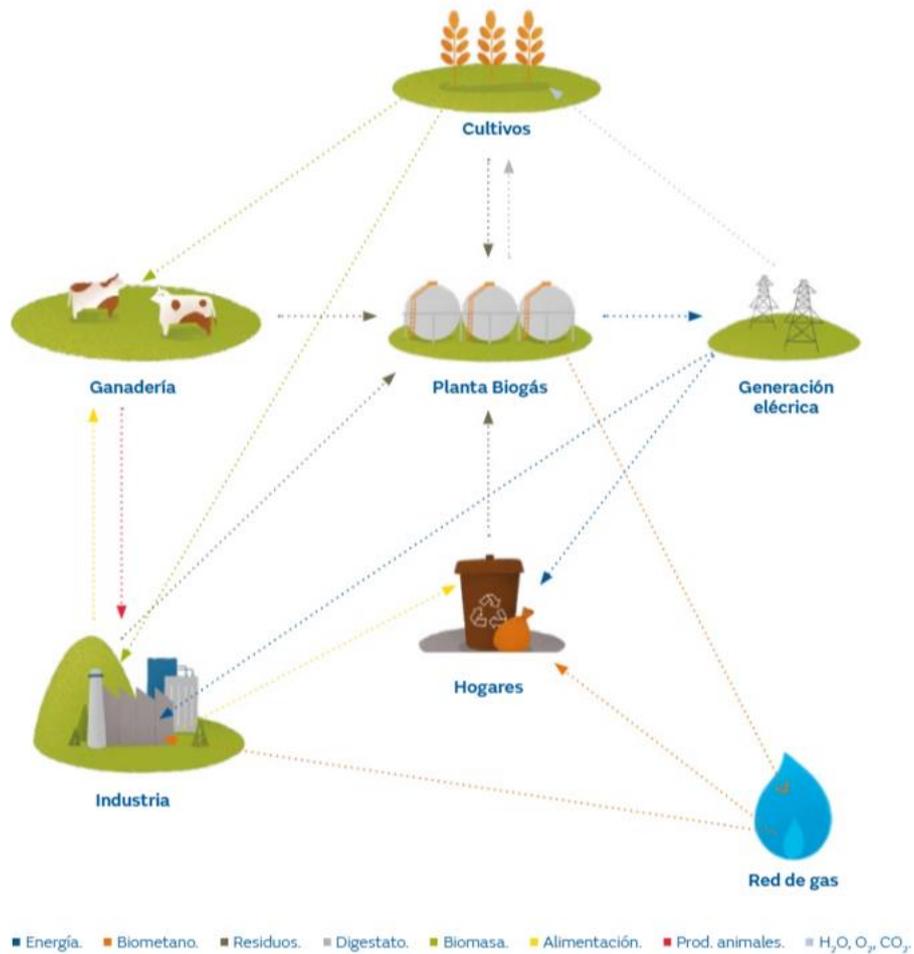


Figura 37: Ciclo de producción y uso del biometano dentro del concepto economía circular (Fundación Naturgy)

4. Oportunidad financiera España

Una vez entendido el marco regulatorio europeo, todos los procesos de generación de biometano y enriquecimiento del biometano y los usos que se le dan y que se le puede dar al biometano, se procede a realizar un estudio financiero. El objetivo de este estudio es comentar el potencial económico del biogás en España. A través de un análisis basado en costes de obtención de biomasa, costes de producción de biogás, costes de enriquecimiento del biometano, oportunidad económica en el mercado español, se conseguirá llegar a una conclusión. ¿Es o no rentable invertir en biogás?

a. Potencial de desarrollo en España

i. Contraste con Europa

Para entender el potencial de desarrollo del biogás en España conviene entender el desarrollo que ha ido teniendo en Europa los últimos años. Esto sirve como punto de apoyo ya que se analiza si el mercado del biogás está teniendo o no éxito en países envueltos en el mismo plan de incentivos y marco regulatorio de la Unión Europea. Además, también sirve como punto de comparación, para observar si España está en una situación más o menos atractiva para el desarrollo de dichas tecnologías.

En una primera instancia se analiza la producción de biogás/biometano en Europa desde el año 2017. A continuación, se adjunta un gráfico que muestra esta evolución en TWh a lo largo de los años:

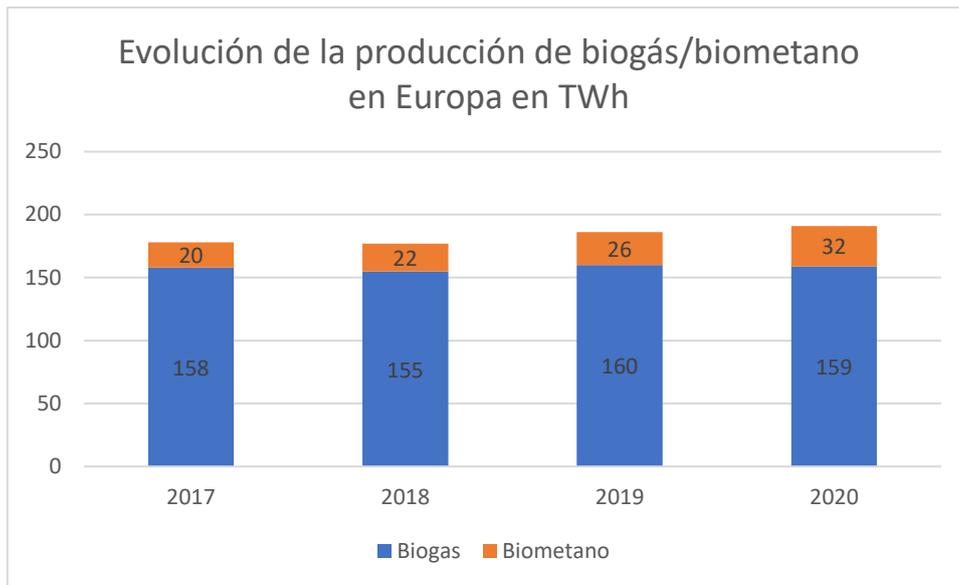


Figura 38, fuente (IDEA, EBA, GIE, AdL)

Se puede considerar una evolución estable del 2% anual. En cuanto al número de plantas de producción de biometano por país en Europa, a continuación se adjuntan los resultados:

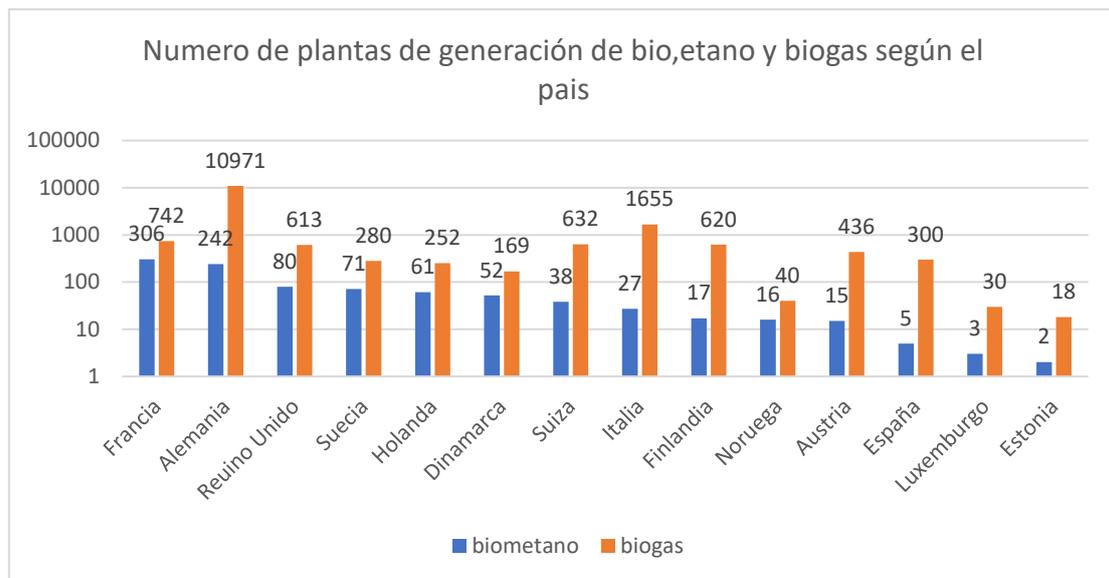


Figura 39: (fuente IDEA, EBA, GIE, AdL)

Se observa en la siguiente gráfica una gran desigualdad en cuanto al desarrollo de plantas de producción de biometano en Europa. Francia lidera la generación de biometano en Europa con un número de 306 plantas. Alemania se sitúa en segunda posición con 242 plantas. Muy por detrás de estas dos potencias europeas se encuentran países como Reino Unido, Suecia u Holanda. En la cola de la lista y con un número de 5 plantas de producción de biometano se sitúa España.

Sin embargo, si contemplamos las plantas de generación de biogás, menos Alemania que domina claramente en Europa con cerca de 11 000 plantas, España se mantiene en valores

intermedios de alrededor de 300 plantas. Habiendo entendido la diferencia entre las plantas de generación de biogás y de biometano gracias a apartados anteriores de este trabajo, se analizan los siguientes datos.

Según European Biogás Association, (EBA), en Europa, actualmente hay en torno a 19 000 plantas de biogás, 2 800 de lodos, 1600 de basuras del vertedero y 14 600 agroindustriales. Contrastado con 725 plantas de generación de biometano menos de la mitad. Estos números muestran el potencial de expansión del biometano frente a unas instalaciones ya existentes de biogás. Actualmente el volumen total de biogás en Europa se estima en torno a 2 000 millones de euros. Según la EBA, existe un “fuerte consenso” de la industria para duplicar la producción en los sectores de biometano y biogás de aquí a los años 30. En cuanto a los años 50, se prevé un aumento de producción de cuatro veces el actual.

Una vez comentado estos datos se puede llegar a una conclusión, en Europa existe un gran potencial de crecimiento que todavía no se ha visto reflejado en los años anteriores. Hasta ahora el desarrollo de producción de 2% anual aproximadamente no es una muestra del potencial del biometano en Europa. Sin embargo, el contraste entre la cantidad de centrales de producción de biogás y la escasez de centrales de enriquecimiento de biometano es sin duda una muestra de la cantidad de biometano que se podría estar generando. ¿Por qué razón existe esta diferencia entre plantas de producción de biogás y plantas de upgrading de biometano?

Actualmente, el proceso de digestión anaerobia se utiliza mayoritariamente para tratar residuos. Se tiene una visión de reducción de residuos en digestatos más fáciles de comercializar y utilizar. El biogás extraído del proceso sale como valor añadido al fin último que es el de tratar los residuos. El objetivo a futuro es ser capaces de cambiar el enfoque de estas 19 000 plantas de biogás, o más concretamente, de las 300 que hay en España, para que en vez de ser plantas de tratamiento de residuos con extracción de biogás se conviertan en plantas de extracción de biogás para su posterior enriquecimiento y comercialización (o inyección a la red) de biometano. Orientando la producción de biogás hacia la obtención de un biometano puro que cumpla los requisitos mínimos para ser inyectado en la red de distribución de gas natural se consigue una oportunidad económica muy interesante. No solo en el desarrollo de nuevas centrales de biometano y de biogás sino también en la optimización de recursos y procesos para conseguir un objetivo final opuesto al de la gestión de residuos que se tiene hoy en día:

Generar biometano a través del enriquecimiento del biogás extraído de un proceso de gestión de residuos.

ii. Recursos disponibles en España

Desde un punto de vista más local y a escala nacional, España es un país con gran potencial de extracción de biogás. Actualmente se generan en España 49 millones de toneladas de residuos ganaderos, 7 millones de toneladas de residuos alimentarios y 9 millones de toneladas de residuos de agricultura según un estudio realizado por Smallops. Con todos estos recursos, o más bien, residuos disponibles, España tan solo genera 2,74 TWh de energía con el biogás

En el supuesto de poder aprovechar dichos residuos, según la comisión europea y el IDEA, se estimaría un potencial de 134 TWh de producción de biogás, es decir, se estaría hablando de un potencial de producción de casi 50 veces el actual. Un valor que se podría aumentar hasta 140-145 TWh si se implementasen mejoras en las técnicas de producción de este biogás. A continuación, se detalla un gráfico exponiendo los residuos con más potencial de aprovechamiento:

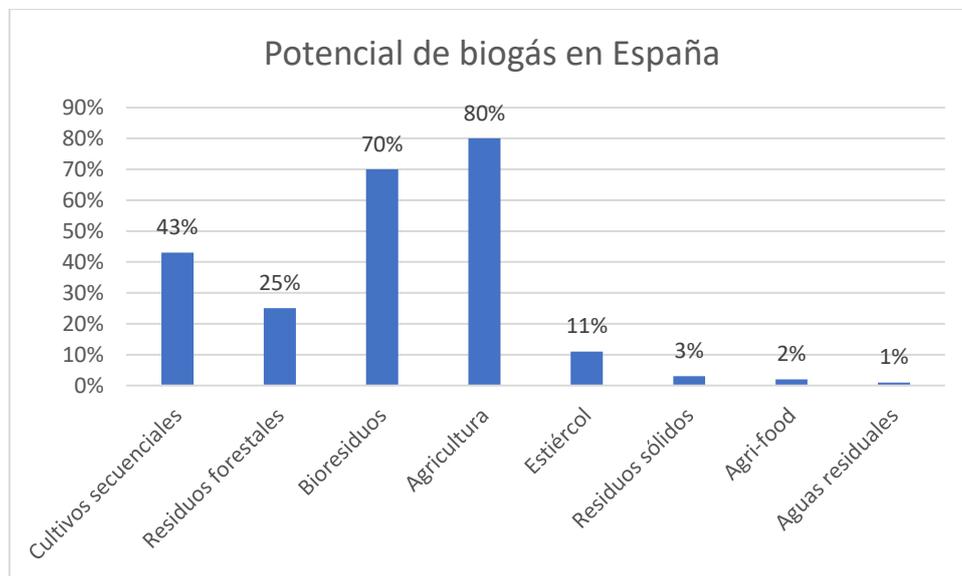


Figura 40: (Fuente IDEA y comisión europea)

Distribución de recursos en España

Se procede a analizar las zonas con mayor potencial de desarrollo en España. Esta decisión se hará en función a las zonas con mayor disponibilidad de sustrato. A continuación, se muestra un mapa de España con las distribuciones de recursos según comunidad autónoma:

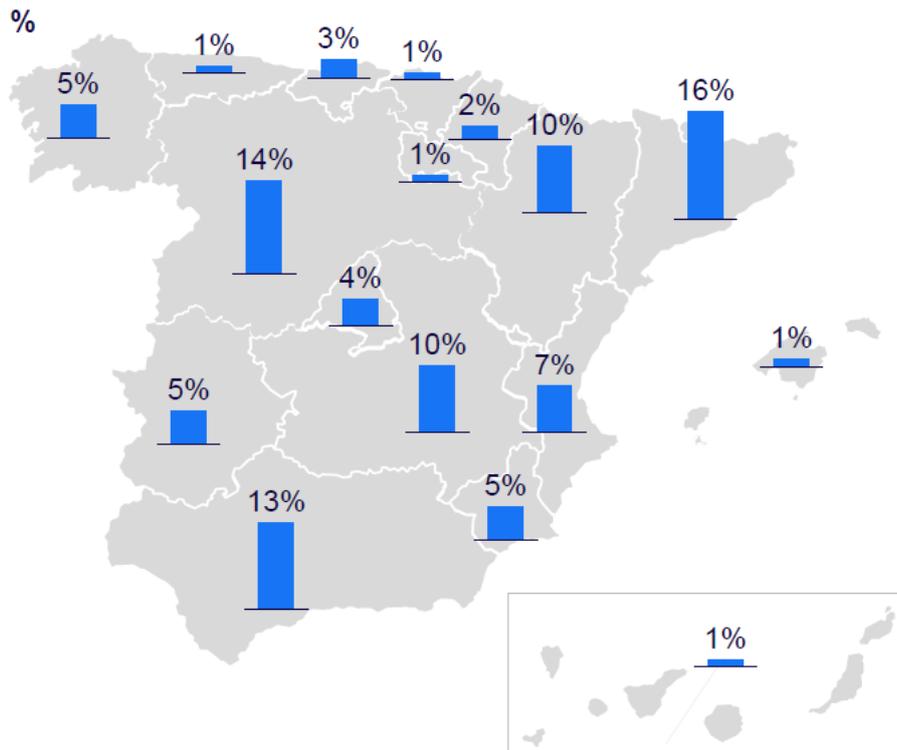


Figura 41: Distribución de recursos orgánicos en función de la comunidad autónoma (fuentes: IDEA, GASNAM, NEDGIA, ENAGAS, Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento, Foro de los generadores de Energía de Residuos, comisión europea, SEDIGAS, Arthur D. Little)

Las zonas con más disponibilidad de recursos en España son las zonas de Aragón, Cataluña y Castilla y León.

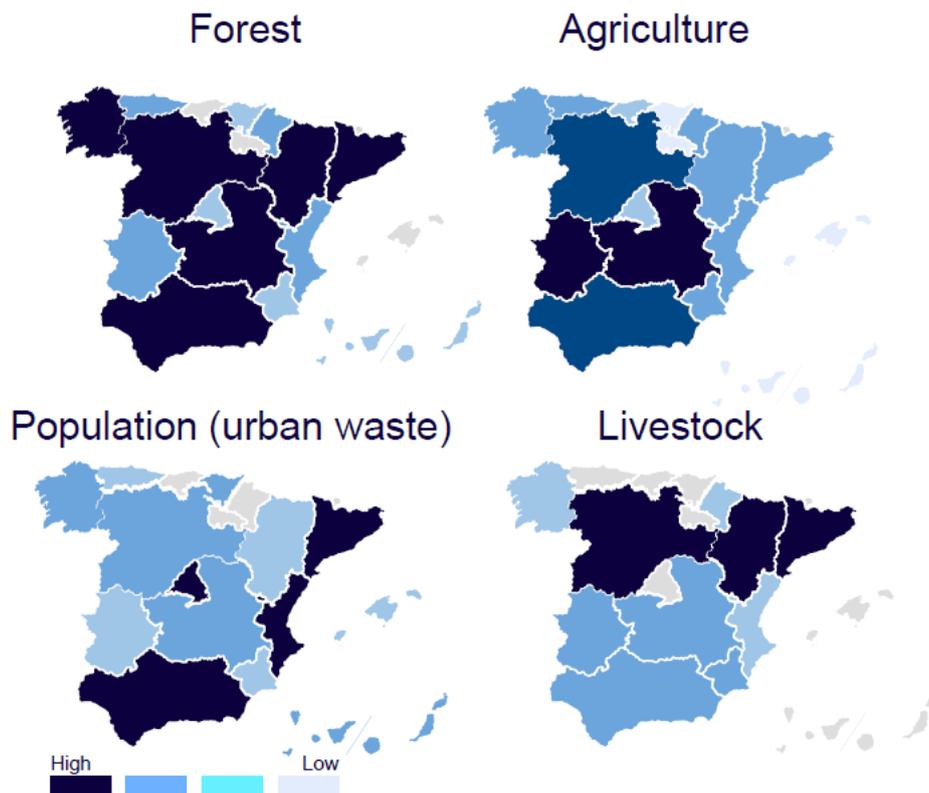


Figura 42: Distribución de recursos por sector y comunidades autónomas (Fuente: estadísticas del gobierno, CONAMA; MAPA; INE)

Según la Comisión Europea “A Clean Planet for All”, la producción de biogás en España puede aumentar entre un 15 y un 30% CAGR hasta el año 2030 con el impulso de regulaciones e incentivos de reducción de costes como los analizados anteriormente en este trabajo, como principales motores de desarrollo.

iii. Análisis socioeconómico del mercado

Desde un punto de vista socioeconómico, la generación de biometano tiene hoy en día un atractivo especial. Actualmente en Europa existe un monopolio absoluto del gas. Con unas reservas de gas del orden de 4,9 billones de metros cúbicos de gas, Rusia controla el mercado de gas de Europa. Europa en cambio posee unas reservas de 1,9 billones de metros cúbicos de gas, es decir menos de la mitad. Este control masivo del gas en Europa ofrece a Rusia un comodín con el que manipular, chantajear y controlar a los países que dependen de su gas. Hablando de España particularmente, este importa un 46% de gas desde Rusia, es decir la mitad de su importación vienen de Rusia. Unos números alarmantes comparándolos con el resto de las importaciones de gas recibidos, 20% de Noruega, 11% de Argelia, 5% de Qatar, según Eurostat. A través del desarrollo de plantas de producción de biogás, o más bien de biometano, conseguiríamos una menor dependencia de las importaciones reduciendo así la influencia de países externos como la de Rusia.

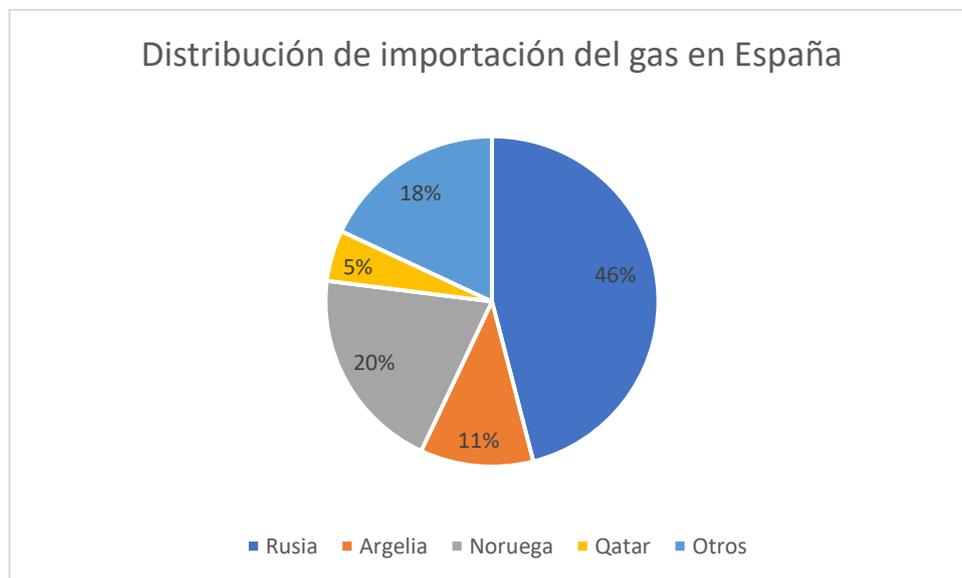


Figura 43: (fuente Eurostat)

A raíz de la presente situación política, económica y social en la que nos ha sometido la invasión a Ucrania por parte de Putin, se marca de manera aún más clara la importancia del desarrollo de la producción de gas. Gracias a este control del abastecimiento del gas en Europa, Putin tiene un poder de influencia abrumador sobre el continente. En cualquier momento puede decidir cortar el abastecimiento y dejar a medio planeta sin gas a su merced. El gas se ha convertido en

un bien fruto de conflictos, en un arma política. Siendo España un país con pocas reservas de gas natural, la generación de biometano como alternativa al gas natural y se convierte en una excelente alternativa con la que defenderse del monopolio del gigante ruso.

b. Análisis financiero

Tras haber analizado la oportunidad de mercado ofrecida en España, se procede a analizar de manera económica el proceso de generación del biogás así como el del biometano. Además, se analizará un Business plan de una central de producción de biometano. Detallando las inversiones necesarias, su CAPEX, OPEX y el tiempo que se considerará necesario para recuperar dichas inversiones. Por último, se comentarán los riesgos existentes a dicha inversión y como de peligrosos se consideran.

i. Costes de producción del biometano

Como ya se ha analizado anteriormente, el proceso de generación de biometano requiere 4 etapas sucesivas.:

1. La producción y extracción de residuos orgánicos que servirán como materia prima para el siguiente proceso. Esta materia prima también es conocida como biomasa o sustrato.
2. La digestión anaerobia en la que a través de 4 procesos químicos sucesivos se consigue descomponer la biomasa en biogás y digestato.
3. El enriquecimiento en metano del biogás conseguido gracias a distintas técnicas que se basan en la extracción del CO₂. Un CO₂ que resulta del proceso de digestión.
4. La distribución y uso final del biometano producido

Desde un punto de vista económico se procederá a analizar las ventajas y el potencial financiero que aporta la producción de biometano en sus diferentes etapas.

Producción y extracción de residuos

Actualmente en la agricultura convencional se realiza una utilización del 60% del terreno dedicado a las cosechas. Dependiendo de las cosechas, en España se utiliza el terreno principalmente durante los meses de primavera verano y otoño. El suelo utilizado para la cosecha tiene una cantidad de minerales y una fertilidad determinada. En ese suelo no se puede estar cosechando indefinidamente ya que se acaba secando y quedándose sin minerales. En efecto, el fruto cosechado provoca una absorción de los minerales y del agua disponible, esto provoca una pérdida de fertilidad y una sequía del suelo importante. Al entender esta situación, los agricultores empezaron a utilizar materiales recuperadores como son el abono o estiércol compuestos minerales que no solo ayudan al suelo, sino que garantizan un mejor desarrollo de

las cosechas que crecen sobre dicho suelo. Sin embargo, incluso con el uso de estas aportaciones de minerales, el suelo necesita un periodo de descanso. Por esta razón la distribución de terreno para las cosechas cuenta con un espacio, del orden de un tercio del tamaño del terreno dedicado a la cosecha, dedicado a la recuperación del suelo en el que no se cultiva nada. Este espacio vacío va rotando de manera a conseguir la recuperación total del suelo del agricultor.

La técnica de cultivos secuenciales es una técnica que consiste en aprovechar la recuperación del suelo plantando cosechas de baja extracción de minerales y reducido nivel de explotación del suelo como son el maíz, el sorgo y el triticale. Estos cultivos son llamados “Energy crops”. Ese 33-40% del suelo inutilizado, podría emplearse en la producción controlada de estos compuestos orgánicos que sirven como materia prima para el biodigestor. Además de ser cultivos de poca explotación al suelo, y para asegurar la total recuperación de este, estos cultivos no se dejarían desarrollar a su máximo potencial. Es decir, se cultivarían pequeñas cantidades de maíz, sorgo o triticale. De esta forma se conseguiría la recuperación del suelo al mismo tiempo que se genera materia prima para el digestor. Con la técnica secuencial de cultivos se conseguiría optimizar la utilización del terreno dedicado a la cosecha de un 60% a un 95%.

Optimización del proceso de generación y enriquecimiento del biogás

La producción de biogás, como ya se ha comentado en el capítulo de su rol en la economía circular, tiene la gran ventaja de convertir un producto residual sin valor (considerado un deshecho) producido por distintas industrias en materia prima. Es decir, la producción de biogás se basa en el uso de compuestos orgánicos desechados. Esto provoca una revalorización del residuo orgánico del que se beneficia el mercado de manera inmediata. Al convertirse el residuo en materia prima de otra actividad comercial, el residuo en cuestión se revaloriza y contribuye de esta forma a mejorar los beneficios de toda la industria que produce dichos residuos como son los agricultores, las granjas, las industrias alimentarias...

No solo esto, sino que, además, la digestión anaerobia produce dos elementos con valor: el biogás y el digestato. Por razones obvias y muy discutidas a lo largo de este trabajo el biogás es el principal producto generado por la digestión y es que hace que el proceso sea rentable. No obstante, vale la pena comentar el subproducto creado de la generación de biogás: el digestato. El digestato es la materia orgánica introducida en el digestor tras haberle extraído todo su potencial energético bajo la forma de biogás. El residuo restante a este proceso se llama digestato y a través de un pequeño proceso de tratamiento, puede ser reutilizado y revalorizado en la industria agropecuaria. A través de un proceso de secado y de compresión se forman gránulos de digestato con alta concentración en fósforo. Estos gránulos pueden ser utilizados como combustible o fertilizante. Es decir, a través del aprovechamiento de residuos orgánicos se consigue generar biogás, altamente valorizado, y un subproducto que también tiene valor comercial de 25-45 euros/t.

En cuanto al proceso de enriquecimiento del biogás, el famoso upgrading, dependiendo de la técnica empleada tiene valores de inversión necesarios y costes más o menos altos. A continuación, se adjunta un gráfico comparador del precio unitario en céntimos de euros de kWh de gas en función a la capacidad de tratamiento de la planta de biogás:

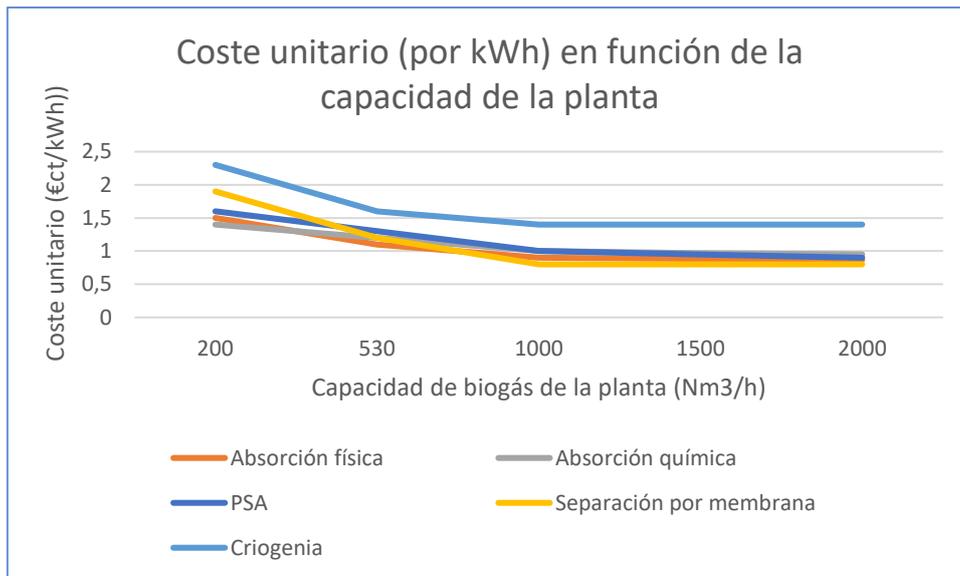


Figura 44: (fuente Fraunhofer, AdL)

De este gráfico se extraen 3 conclusiones, en una primera instancia, se observa cómo según se aumenta la capacidad de tratamiento de biogás de la planta se van reduciendo los costes unitarios de enriquecimiento de biogás. Además, se observa un CAPEX limitado ya que a partir de una capacidad de 1 000 Nm3/h el precio unitario se mantiene estable. Por último y comparando las distintas técnicas de enriquecimiento de biometano, parece que la técnica de separación por membrana es la más barata a niveles de tratamiento de 1 000 Nm3/h de biogás.

CAPEX unitario y OPEX del proceso digestión y upgrading

Según datos obtenidos del banco mundial (world bank), MDPI, California Energy Commission, Gas Vitae, la comisión europea (European Commission), IEA, Fundación Naturgy, UPC, Agstar y Arthur D. Little, se obtiene la siguiente propuesta del CAPEX y OPEX de los procesos de generación de biogás, enriquecimiento del biogás y tratamiento del digestato:

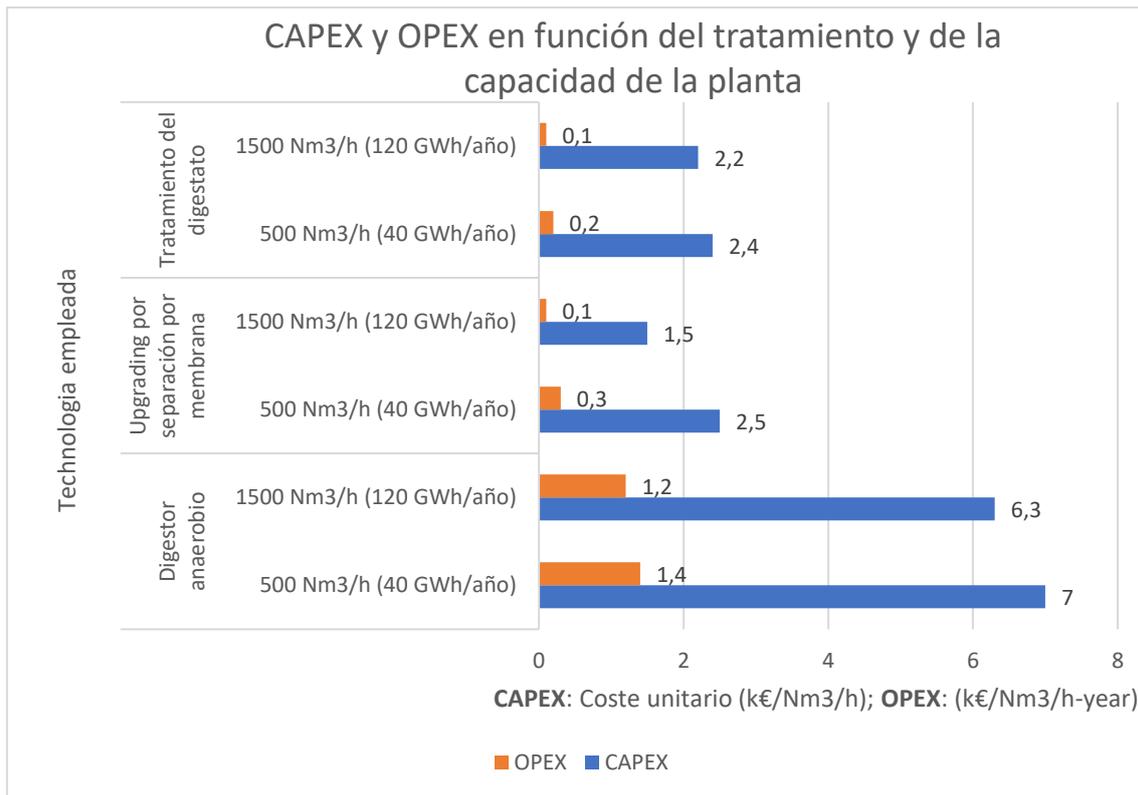


Figura 45: (Fuente AdL)

ii. Valor del gas y coste de su inyección a la red

Una vez realizada la inversión y la producción del biometano, se considera importante analizar los gastos de inyección a la red de distribución de gas natural. Como se ha comentado en apartados anteriores, para realizar esta inyección, se requieren unas condiciones de calidad mínimas del biometano que se pretende inyectar. Estas condiciones están impuestas por regulaciones de la unión europea y por el protocolo de detalle PD-01. Ya se ha comentado estos valores en apartados anteriores por lo que no hay interés de repetirlo. Sin embargo, vale la pena recordar que para conseguir esta inyección se requiere una inversión en tres elementos claves:

1. La instalación y desarrollo de tuberías para el transporte del biometano. Esta instalación depende fuertemente de la localización de las plantas de generación y enriquecimiento del biogás.
2. Sistemas de compresión del biometano, se recuerda que el gas ha de inyectarse comprimido a la red de distribución de gas natural.
3. Sistemas conectados a la red que permitan la inyección del gas.

De la comisión europea, y de AdL se extrae el siguiente gráfico que representa el coste en euros por kWh de biometano del proceso de inyección a la red:

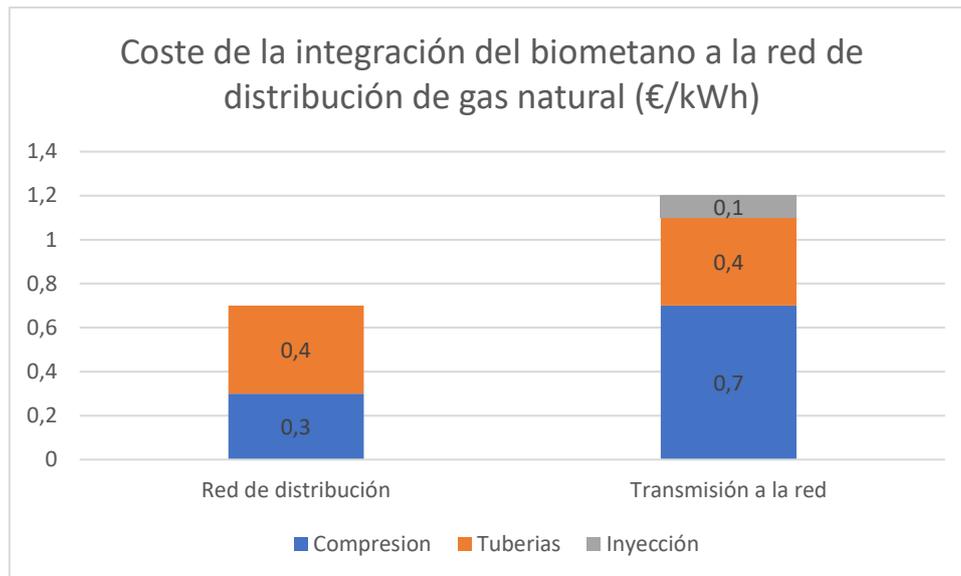


Figura 46 (Fuente: AdL)

Habiendo analizado todos los costes desde el tratamiento de la biomasa, hasta su inyección en la red, pasando por sus distintas técnicas de enriquecimiento, se pretende analizar el precio final del biometano en la red de distribución. Es decir, el precio de mercado. A 17 de febrero de 2022, según la EBA, European Biogás Association, el precio del biometano está a 55 €/MWh, mientras que el del gas natural se situaba a 80 €/MWh. Actualmente en el mes de julio de 2022, el precio del gas natural se ha disparado a 145,89 €/MWh según resultados de MibGas. Dicho esto, se considera el biometano un 30% más barato que el gas natural.

Comparándolo con otras alternativas renovables, el biometano se sitúa líder de precios en el mercado de gas. Con unos precios de entre 2-4 veces más altos el hidrógeno todavía tienen mucho por desarrollar para poder llegar a competir con el biometano. Además, desde un punto de vista económico, este biogás no está suscrito a ninguna reserva controlada por ningún gobierno. En otras palabras, mientras la producción de dicho biometano se mantenga estable, su precio se mantendrá estable. Con una mayor proporción de biometano en la red de distribución de gas europea, se conseguiría estabilizar los precios, hoy en día tan variables de gas natural.

Añadiendo a esto, con una producción de tan solo el 15% de su demanda de gas natural, Europa está inmersa en una absoluta dependencia de gas por parte de otros países. Países con el absoluto control de la oferta del biogás tienen un poder e influencia (ya comentados en el capítulo del enfoque socioeconómico) con el que manipular los precios de mercado de gas en función a sus necesidades. Una razón más para considerar la producción de biometano como una opción viable a día de hoy.

Europa tiene la oportunidad de desprenderse de la dependencia de importación de gas natural invirtiendo en un proceso de producción de biometano. Un proceso de producción que genera un gas limpio, renovable y un 30% más barato que el gas importado. Además, este actúa como estabilizador de precios de mercado.

iii. Oportunidades de inversión en un proyecto de biometano

Tras haber analizado costes y razones actuales por las que se considera el biometano un foco de potencial económico se va a finalizar el trabajo con un estudio económico de dos casos prácticos de inversión en proyectos de generación de biometano. El primer caso requiere una inversión financiera menor y trata de una cadena de producción de biometano simple. En cuanto al segundo caso, se analizará un proyecto de magnitudes más importantes, requiriendo así de una inversión mayor.

Proyecto simple:

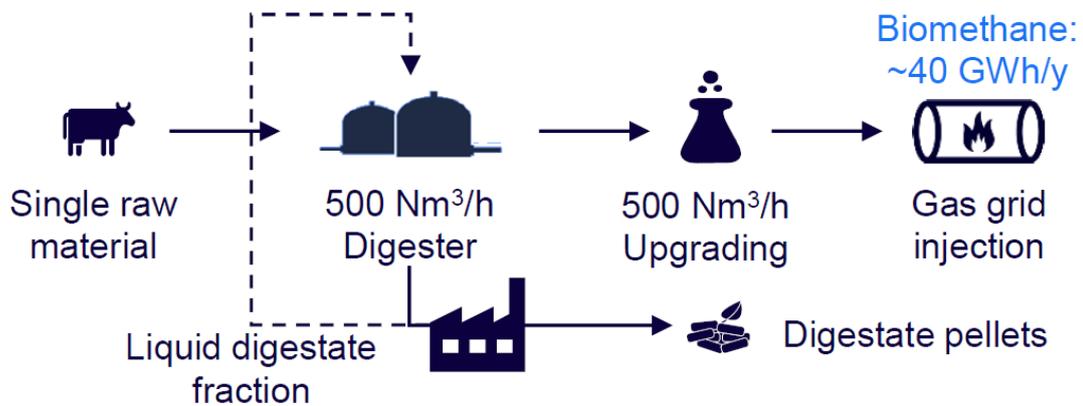


Figura 47 (Fuente: AdL)

El proyecto simple tiene ciertas ventajas sobre el complejo. Es un proyecto que se basa en el tratamiento de un tipo de biomasa único. Es decir, se centra en la digestión anaerobia de un sustrato específico, no permite la combinación de sustratos en el digestor. Esto tiene un nivel de complejidad de desarrollo muy inferior al proyecto complejo que, si permite la introducción de distintos materiales orgánicos a la vez en el digestor, lo cual se refleja directamente en su coste de inversión. El bajo coste de inversión le da flexibilidad a la hora de reunir inversores y facilita su implantación en numerosas localidades del país y su disponibilidad en cuanto a creación de proyectos.

Como desventajas, una producción de biogás inferior debida al mono-sustrato empleado lo cual conlleva a un precio unitario de biometano más elevado. Otra desventaja importante a tener en cuenta es la necesidad de recurrir a un sistema aparte de gestión de digestato.

A continuación, se indican los costes de inversión necesarios para desarrollar el proyecto:

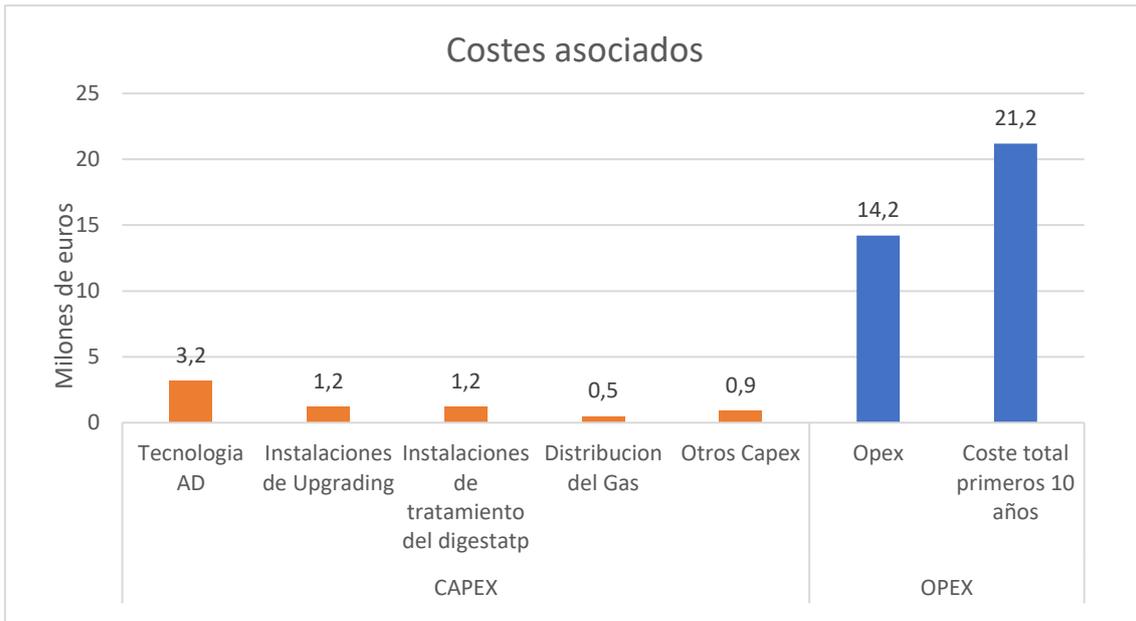


Figura 48 (Fuente: AdL Deloitte y otros estudios)

Con un CAPEX total de alrededor de 7 millones de euros y un OPEX de 14,2 millones, se prevé una inversión de alrededor de 21,1 millones de euros en los 10 primeros años de desarrollo de dicho proyecto. En cuanto a las fases del proyecto, se considera alimentar un biodigestor de 500 Nm³/h con a aproximadamente 240 kilo toneladas de estiércol por año con coste de 1,5 euros por tonelada. Se establece por lo tanto un coste de materia prima de 364 500 euros anuales.

Con esta materia prima, se generaría alrededor de 30 toneladas anuales de gránulos de digestato comercializables a un precio de en torno a 15 euros por tonelada, (450 euros anuales) y aproximadamente 36 GWh/año de biometano. Un biometano que tendrá que ser tratado por la instalación de enriquecimiento de 500 Nm³/h de capacidad habilitada para el proceso. Este biometano se pretende vender a 40-50 euros/MWh. Seleccionando un valor base de 50 euros por megavatio hora, se estimarían unos ingresos anuales de, 1,8 millones de euros en biometano.

A continuación, se adjunta un gráfico detallado del cash Flow a lo largo de los primeros 10 años:

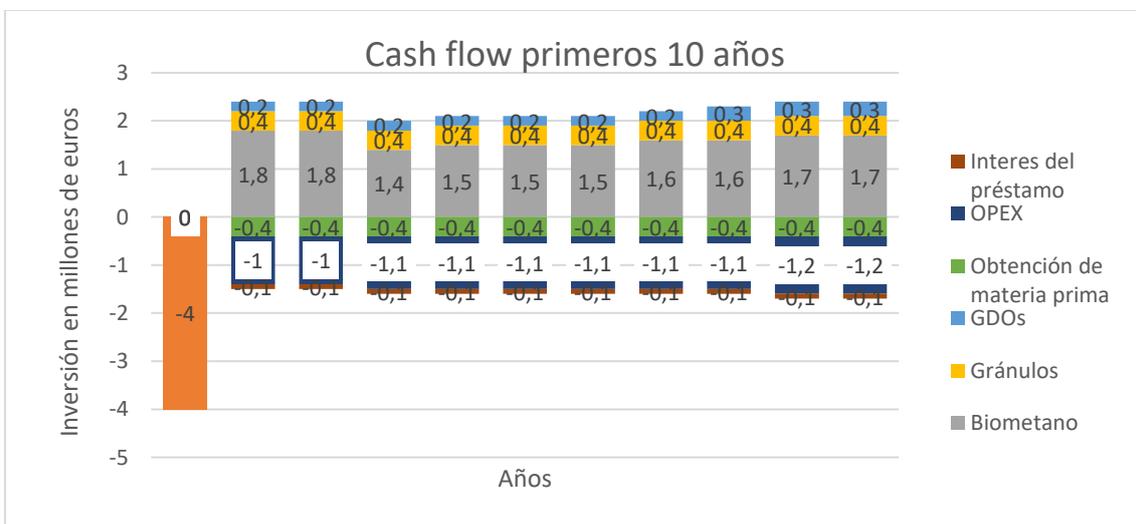


Figura 49 (Fuente: AdL Deloitte y otros estudios)

Con esto se pretende generar unos beneficios netos anuales de:

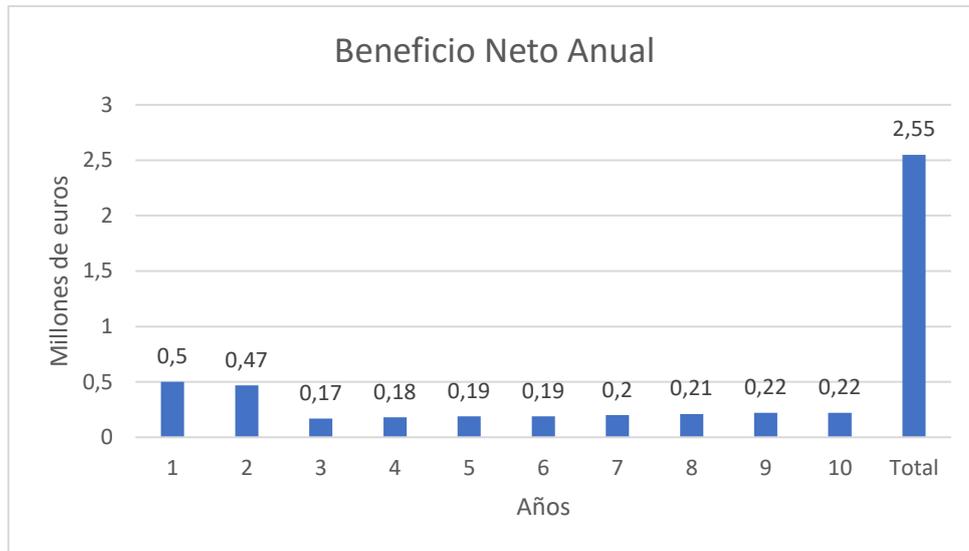


Figura 50 (Fuente: AdL Deloitte y otros estudios)

Además de contar con un IRR del 9% los 5 primeros años con un valor residual de 3,7 millones de euros y de 14% en 10 años con valor residual de 3,5 millones de euros.

Estos gráficos nos permiten analizar la recuperación de capital a la que se consigue llegar en los primeros 10 años. Se logra una recuperación de 2,55 millones de euros, una cantidad que representa el 14% de la inversión establecida para los 10 años.

Como control de riesgo, vale la pena mencionar 4 aspectos para tener en cuenta en el transcurso de estos 10 años. Estos riesgos se exponen en orden decreciente de peligrosidad.

Riesgos en función a la variabilidad de precios

El primero, el más notable y el que más riesgo representa a la inversión es la estimación del precio del biometano de aquí a 10 años. Se establece como base un precio estable de 51 euros por MWh y una sensibilidad de 40-70 euros por MWh. Es decir, de aquí a 10 años, según como evolucione el mercado se espera que el precio del biometano por megavatio hora oscile entre 40 y 70 euros. Vale la pena comentar que se tiene más margen de variación de precio del biometano al alza que a la baja. En el caso de aumentar el precio del biometano, esto beneficiaría a los beneficios netos anuales obtenidos que contribuiría a aumentar la velocidad de recuperación de la inversión inicial.

Como estrategia de mitigación de riesgos, la más coherente y sensata es la de generar contratos a largo plazo de venta de biometano con compradores. Realizando estos contratos se establece un precio de venta estable con el vendedor. De esta forma se mitiga fuertemente el riesgo de variación de precio, sin embargo, si el precio de venta aumenta el inversor saldría perjudicado de este acuerdo

Lo mismo pasa con la venta de gránulos de digestato, se establece un precio base de 15 euros por tonelada y una sensibilidad de precio de 10 a 30 euros por tonelada. Este riesgo se asocia al posible aumento de la competencia obligando a bajar precios. De nuevo, un riesgo con mayor margen al alza que se soluciona con acuerdos de compraventa a largo plazo.

Riesgos en función al precio de la materia prima

Como se ha comentado anteriormente la producción de biogás requiere de materia prima hasta ahora considerada como un deshecho, por lo que se estima conseguirla de manera prácticamente gratis. Sin embargo, existen posibles variaciones en el precio de la biomasa necesaria. En efecto, el desarrollo de estas tecnologías puede llegar a causar una ligera revalorización del residuo necesitado. Se estima una variabilidad en torno a 0-2 euros por tonelada de precio de obtención de biomasa.

Utilización de la planta de generación

Además de estos riesgos, existe la posibilidad de tener la planta de producción de biogás trabajando en condiciones inferiores a las óptimas. Con una estimación base de 85 % de utilización, por motivos de retrasos técnicos o de indisponibilidad de materia prima, se pueden llegar a valores de utilización del orden del 80-95%. Este riesgo se mitiga con el diseño óptimo de las operaciones y del mantenimiento de la planta de generación de biogás.

Proyecto complejo:

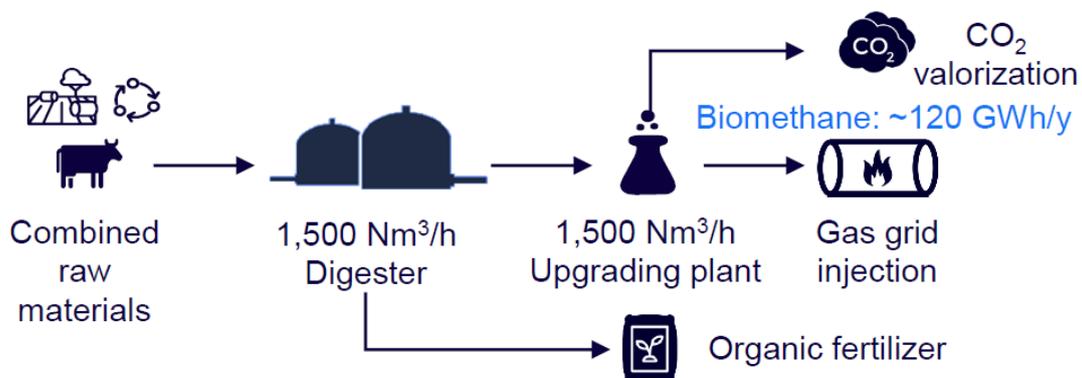


Figura 51 (Fuente: AdL Deloitte y otros estudios)

Este proyecto requiere una inversión más importante, sin embargo, ofrece nuevas ventajas respecto al proyecto simple. En primer lugar, este proyecto se compone de un digestor de 1.500 Nm³/h de capacidad. Un digestor que no solo ofrece tasas de producción mucho más elevadas que las del proyecto simple, sino que, además, no requiere de la aportación de un solo tipo de sustrato. Es decir, acepta como combustible combinaciones de residuos orgánicos. Además, en este proyecto se desarrollan dos instalaciones distintas, la primera es una central de upgrading que tiene la particularidad de ofrecer la extracción para posterior comercialización del CO₂ mezclado en el biogás. Este CO₂ formará un nuevo flujo de ingresos. La segunda instalación incorporada en este proyecto es la planta de tratamiento del digestato producido por el digestor

anaerobio. Una planta que logra transformar dicho digestato en un fertilizante orgánico que, como el CO₂, puede ser comercializado y constituirá un flujo de ingresos adicional.

Como desventaja principal, con necesidades de CAPEX tan elevadas, se dificulta mucho la búsqueda de stakeholders que quieran aportar la siguiente inversión inicial.

A continuación, se indican los costes de inversión necesarios para desarrollar el proyecto:

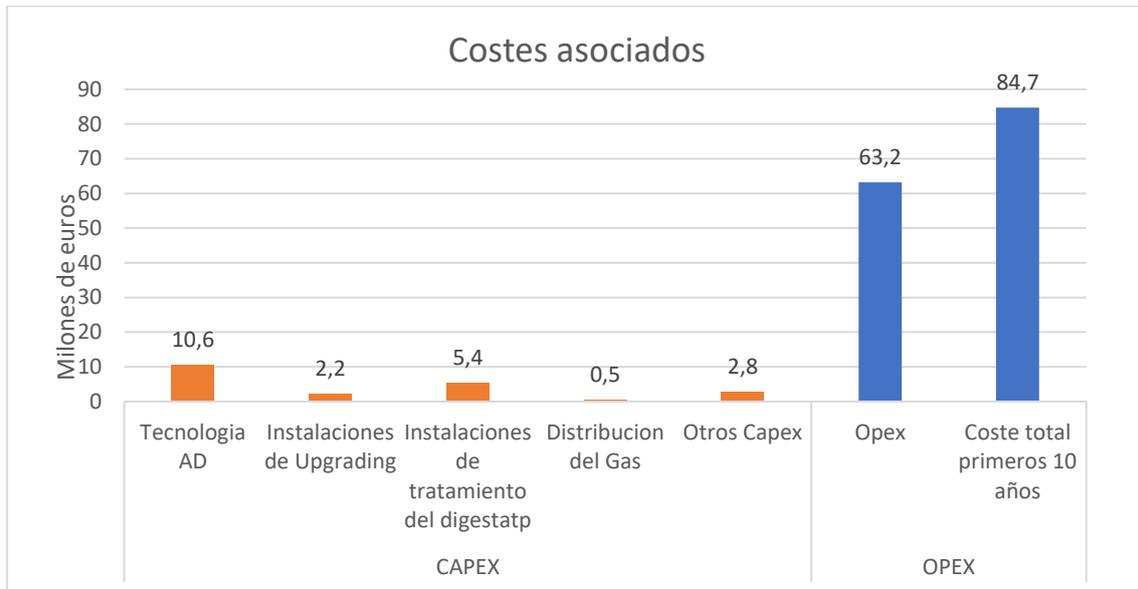


Figura 52 (Fuente: AdL Deloitte y otros estudios)

En este gráfico se ve la diferencia de inversión del proyecto complejo frente al simple. Con un CAPEX de 21,4 millones de euros y un OPEX de 63,2 millones de euros, se pretende desarrollar tres instalaciones para lograr la generación y comercialización de biometano, CO₂ y de fertilizante orgánico. Una planta de generación de biogás a base de combinaciones de biomasa, una de enriquecimiento del biogás y una instalación de tratamiento de digestato.

Este proyecto requiere de un aporte de biomasa de 366 kilotoneladas compuesto por 350 ktons de estiércol valorado en 1,5 euros por tonelada, 12 ktons de "energy crops" a 0,1 euro por tonelada y 4 ktons de residuos de la industria agroalimentaria valorados en 5 euros por tonelada. Con estas materias primas se pretende conseguir 34 ktons de fertilizante orgánico gracias a la instalación, incluida en la inversión, de tratamiento del digestato. Un fertilizante orgánico valorado en 140 euros por tonelada, formando así un subproducto de la actividad económica principal muy atractivo. En cuanto a la generación de biometano, se prevé instalar una planta de enriquecimiento del biometano de 1 500 Nm³/h de capacidad que generaría 115 GWh por año valorado a 40-50 euros por MWh. Es decir, se prevén unos ingresos anuales de 5,75 millones de euros debidos únicamente al biometano. Esta planta tendrá a su vez la capacidad suficiente de extraer el CO₂ del biogás para posteriormente comercializarlo. Se prevé extraer en torno a 20 ktons de CO₂ y venderlas por un valor de 36 euros por tonelada.

A continuación, se adjunta un gráfico detallado del cash Flow a lo largo de los primeros 10 años:

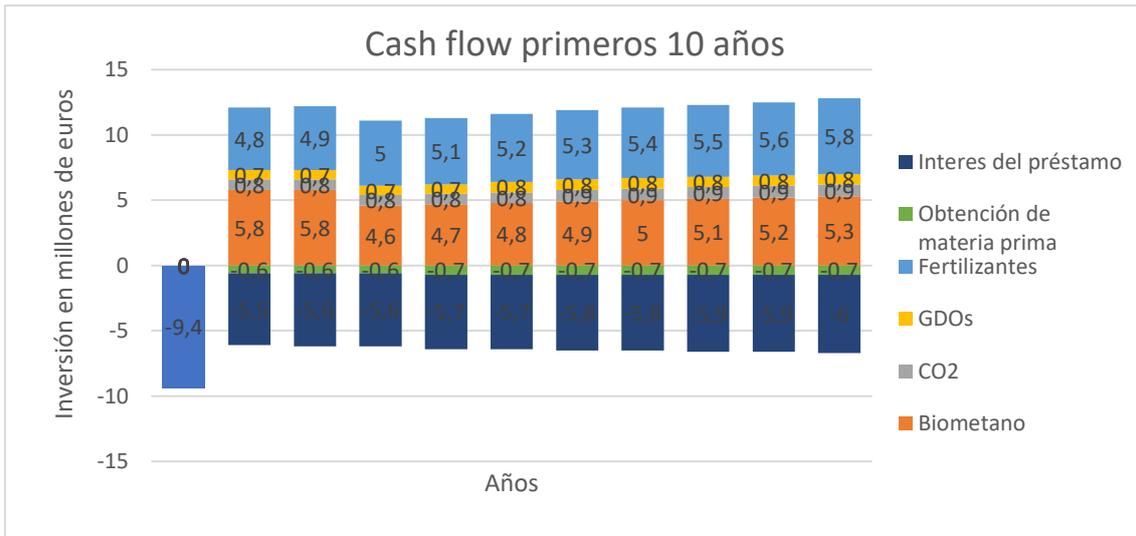


Figura 53 (fuente Adl Deloitte y otros estudios)

Con esto se pretende generar unos beneficios netos anuales de:

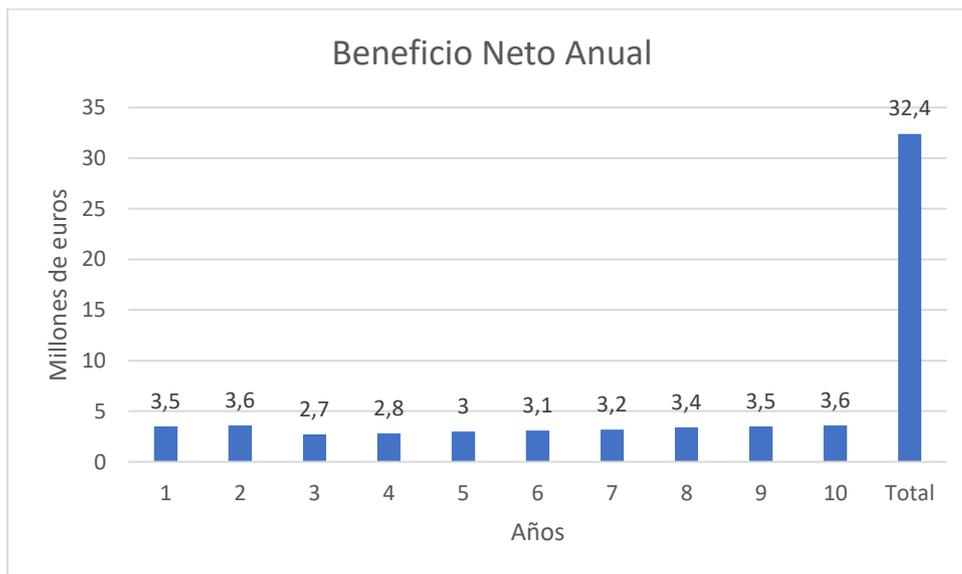


Figura 54: (fuente AdL Deloitte y otros estudios)

Además de contar con un IRR del 42% los 5 primeros años con un valor residual de 30 millones de euros y de 34% en 10 años con valor residual de 29 millones de euros.

Con el análisis de estos gráficos se logra calcular unos beneficios netos de 32,4 millones de euros, lo que representa un 38% de la inversión inicial requerida para 10 años. Una vez más vale la pena comentar los riesgos a los que se enfrenta dicho proyecto así como los planes a adoptar para conseguir mitigarlos.

Se establecen los mismos riesgos económicos que en el proyecto simple en cuanto a la variabilidad de los precios del Biometano y de la adquisición de biomasa y a la variabilidad de utilización de la planta. Además de estos riesgos, se añaden dos variabilidades de precio a tener en cuenta en este proyecto, las de las ventas del fertilizante orgánico y las del precio de venta del CO2. Con precios base de 140 y 36 euros por tonelada respectivamente, se esperan de aquí

a diez años que los precios oscilen entre 120 y 200 €/ton para el fertilizante y de 25 a 100 €/ton para el CO₂.

5. Conclusiones

Llegados a este punto del trabajo, se pretende aportar una conclusión en cuanto a la viabilidad del biogás como alternativa a energías renovables. Partiendo de un contexto histórico irresponsable y absolutamente negligente con el medio ambiente a través de generación de energía contaminante y despilfarro de recursos irrecuperables se ha desarrollado una conciencia global sobre la importancia de preservar nuestro entorno. Gracias a numerosas convenciones y conferencias como la COP-21 de París, líderes de los países más influyentes de Europa se han reunido para generar un marco regulatorio basado en planes de gestión e incentivos para lograr una descarbonización de la economía para los años 50. Este marco regulatorio y planes de incentivos gubernamentales han generado un escenario socioeconómico idílico para el desarrollo tecnológico de una de las opciones más adecuadas para el cumplimiento de los objetivos impuestos.

La generación de biogás a través de biomasa tiene la particularidad de gestionar dos de las principales causas de descuido del medio ambiente. A través de una labor de gestión y recuperación de residuos orgánicos definida y organizada se consigue generar un producto de valor que sirve de materia prima a la generación de biogás. Gracias al aprovechamiento de subproductos residuales de industrias agropecuarias, agroalimenticias, y de tratamiento y potabilización de aguas, cuyo valor residual es hoy en día prácticamente despreciado, se consigue aportar valor y extraer un compuesto altamente energético. Gracias a la digestión anaerobia de estos sustratos orgánicos no solo se contribuye a la gestión y reutilización de residuos, sino que además se consigue extraer dos productos: el biogás y el digestato. El biogás, tras ser enriquecido en metano por las diversas técnicas ya discutidas, se convierte en un compuesto altamente energético de condiciones suficientemente similares al gas natural como para poder ser inyectado en su red de distribución. Este biogás tratado, también conocido como biometano, se convierte en una alternativa para la descarbonización del planeta procurando múltiples funcionalidades como la producción de electricidad o su utilidad como sustituto al combustible vehicular.

En cuanto al digestato, subproducto de la producción de biogás, es revalorizado tras un tratamiento que lo convierte en fertilizante orgánico. Cerrando el bucle de esta manera y sirviendo como alimento a las industrias que generan el sustrato del que este es generado. Una economía circular que se basa en el aprovechamiento de residuos orgánicos inagotables para generar un combustible limpio y renovable a la vez que se produce un fertilizante con la capacidad de ser reintegrado en la fase inicial de la cadena de producción.

Además, y desde un punto de vista económico-político, la generación del biometano, que es alrededor de un 30% más barato que el gas natural importado, permite la estabilización de precios en el mercado del gas. Con una estabilización de precios de mercado y una fuente de producción nueva de un recurso que hoy en día es casi en su totalidad importado de un gobierno que posee su absoluto control, el biometano se convierte en un arma económica y política. Un arma creada para combatir la influencia y el control generados por los países poseedores de grandes reservas de gas natural cuyo monopolio les pertenece.

En cuanto al estudio financiero, se requieren inversiones de 7 millones de euros de CAPEX y un OPEX (a 10 años de producción) de 14 millones de euros para el proyecto simple y 21,3 millones de euros de CAPEX y un OPEX (a 10 años de producción) de 63 millones para el proyecto complejo. Con estas inversiones, en 10 años se recupera el 14% de la inversión (CAPEX+OPEX 10 años) para el proyecto simple y el 38% de la inversión (CAPEX+OPEX 10 años) para el proyecto

complejo. Con unas materias primas consideradas como residuos desechables para el resto de las industrias los costes de adquisición de estas son prácticamente despreciables. Unas materias primas que tras el proceso de tratamiento se ven fuertemente revalorizadas, el precio del biometano se sitúa hoy en día en torno a los 55 euros por megavatio hora. Un precio en torno a un 30 % más barato que el del gas natural en febrero de 2022 - si se compara con el valor actual del gas natural (145 euros por megavatio hora) representa una reducción del 62% - que conlleva un importante reajuste del mercado. Además, esta inversión se apoya en múltiples planes gubernamentales que ofrecen incentivos tanto a escala nacional como a escala continental bajo la Unión Europea.

Como únicos riesgos, los asociados al porcentaje de utilización de las plantas de generación y la variabilidad de precios en el mercado de materias primas y de las ventas de biometano, fertilizante o digestato y CO₂ extraído. Riesgos que junto con un buen plan contractual y una buena gestión y control de los procesos de recuperación, generación, enriquecimiento o tratamiento y ventas aseguran unos beneficios anuales de en torno a 0,25 millones de media para el proyecto simple y de 3,2 millones de media para el proyecto complejo.

6. Anexo: Alineación con Los Objetivos de Desarrollo Sostenible

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



Figura 5: Objetivos del desarrollo sostenible

El biogás está considerado como una fuente de energía renovable a la hora de producir energía limpia, o a la hora de reemplazar a otros gases menos sostenibles. El biogás se obtiene gracias al aprovechamiento de residuos orgánicos de diversas industrias. Residuos que de no ser reciclados por el biodigestor podrían ser nocivos para el medio ambiente, generando por tanto una cadena de valor circular en cuanto a la gestión, tratamiento y posterior uso del residuo. En consecuencia, con todo lo anterior, la energía producida por un biodigestor a partir de biogás es absolutamente renovable.

Por todas estas razones cabe afirmar que este TFG está muy relacionado con el ODS número 7, respecto a la obtención de energía asequible y no contaminante. Además, la generación de energía a través de biocombustibles contribuye en mayor o menor medida a los puntos ODS 13, 14 y 15. El uso de materias inutilizadas de granjas y/o industrias protege la vida de ecosistemas terrestres y la vida submarina haciendo una acción por el planeta.

Con nuestro estudio financiero se busca analizar si este tipo de energía satisface el punto ODS 9 acerca de crecimiento económico e industria, innovación e infraestructura. Si las inversiones en biometano resultan rentables en coherencia con las estimaciones actuales de evolución del mercado eléctrico en España, este TFG podría contribuir a avanzar en cuanto a impulsar la innovación y abrir nuevos caminos de expansión y crecimiento para el sector.

7. Bibliografía