



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Evaluación medioambiental de la producción de biogás a partir de materia orgánica residual mediante análisis de ciclo de vida.

Autor: Marta Garamendi Smith

Director: Carlos Martín Sastre

Directora: Yolanda González Arechavala

Madrid

Agosto 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Evaluación medioambiental de la producción de biogás a partir de materia orgánica
residual mediante análisis de ciclo de vida.

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

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

Marta Garamendi

Fdo.: Marta Garamendi Smith

Fecha: 31/ 08/2023

Autorizada la entrega del proyecto

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO



Carlos M S

Fdo.: Yolanda González Arechavala y Carlos Martín Sastre

Fecha: 31/ 08/ 2023



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Evaluación medioambiental de la producción de biogás a partir de materia orgánica residual mediante análisis de ciclo de vida.

Autor: Marta Garamendi Smith

Director: Carlos Martín Sastre

Directora: Yolanda González Arechavala

Madrid

Agosto 2023

EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE MATERIA ORGÁNICA RESIDUAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.

Autor: Garamendi Smith, Marta

Director: Martín Sastre, Carlos

Codirectora: González Arechavala, Yolanda

Entidad Colaboradora: ICAI- Universidad de Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

En la actualidad, la generación de energía se encuentra mayormente sustentada en el empleo de combustibles fósiles, lo cual conlleva la emisión de contaminantes como CO₂, NO_x, SO₂ y CO (UNFCC, 2013), con impactos ambientales adversos. Frente a esta realidad, la Unión Europea ha promovido políticas orientadas a impulsar la producción de energía a través de fuentes alternativas, en consonancia con los principios establecidos en el Pacto Verde Europeo (Parlamento Europeo, 2020). En este contexto, se está fomentando la utilización del biogás como una alternativa energética, el cual es un combustible de origen orgánico que contiene un alto porcentaje de metano (entre 45% y 65%) y dióxido de carbono (entre 35% y 55%), y presenta un elevado poder calorífico (Secretaría de Estado de Energía, 2021). Debido a que su producción proviene de materias primas renovables, se clasifica como una fuente de energía sostenible.

El biogás puede ser producido a partir de diversas biomásas, y cuando su origen son los residuos orgánicos, se considera un biocombustible de segunda generación. Esta clase de combustibles está en crecimiento, ya que proporciona una forma de agregar valor a productos que, de otra manera, tendrían efectos perjudiciales para el medio ambiente y la salud. Sin embargo, el aumento en la generación de residuos plantea un desafío significativo en términos de sostenibilidad, lo que requiere mejoras en los procesos de tratamiento. Además, el biogás presenta una ventaja notable respecto a otras fuentes renovables de energía, como la fotovoltaica o la eólica, pues puede ser almacenado, lo cual es de gran interés para el equilibrio del sistema eléctrico.

Este contexto evidencia un mayor esfuerzo político para integrar la sostenibilidad en los procesos de producción energética, así como un creciente interés en encontrar soluciones que den una segunda vida a los residuos generados. España, como miembro de la Unión Europea, está llamada a dar respuesta a esta agenda de desarrollo medioambiental. Según el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico en 2022 (Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico, 2022), esto se traducirá en un aumento significativo de la producción de biogás en España, estimado en x3,8 para el año 2030 respecto a 2019. En este sentido, la producción de biogás a partir de residuos desempeña un papel fundamental al ofrecer una solución más sostenible para su tratamiento.

En este Trabajo de Fin de Máster (en adelante referido como TFM), se analizará el impacto real de las emisiones generadas durante el proceso de producción de biogás, con el propósito de comprender los efectos que el nuevo marco regulatorio y la nueva realidad de producción tendrán en España. Para llevar a cabo este estudio, se tomará como referencia la planta de La Paloma, ubicada en el Parque Tecnológico de Valdemingómez en Madrid, la cual es la única en la capital que trabaja con residuos de la fracción resto y les otorga una segunda vida, siendo una de las pocas plantas en el país que revaloriza este tipo de residuos. Esta planta genera biogás a partir de la materia orgánica presente en los residuos de la fracción resto (MOR).

2. Definición del proyecto y metodología

El creciente interés por la inversión en esta tecnología y la reducción de impactos mencionados elevan la necesidad de su análisis. Como respuesta, a lo largo de este proyecto se ha realizado un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) siguiendo la metodología de la ISO 14040 y la 14044 (ISO, 2006), herramienta para determinar los impactos que se generan en la obtención de un producto.

Para la realización de este ACV se ha utilizado el software Simapro versión 9.4.0.2, que permite diseñar los procesos relativos a la vida de los productos y calcular sus impactos, y la base de datos utilizando la base de datos de Ecoinvent v.3.8, utilizando la biblioteca de “allocation, cut-off by classification” (Wernet et al., 2016). Para el análisis se ha

utilizado la metodología de impacto (*CLM_IA-baseline versión 3.7/EU25*), que analiza 11 categorías (agotamiento abiótico, agotamiento abiótico (combustibles fósiles), calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad marina, ecotoxicidad agua dulce, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización).

Mediante este TFM se contribuye con los objetivos de desarrollo sostenible, especialmente el objetivo 13: Acción contra el clima, ya que se busca comprender los impactos producidos en los procesos para poder tomar decisiones que los reduzcan. Y con el ODS número 11, “Ciudades y comunidades sostenibles”, en especial la meta “11.6 De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per capita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo”. La producción de biogás mediante materia sólida residual puede ser implementada a nivel local, proporcionando una fuente de energía limpia y sostenible para comunidades urbanas.

El objetivo de este ACV es determinar los impactos, según las categorías definidas por el método CLM, de cada una de las etapas (pretratamiento, digestión anaerobia y cogeneración) de la producción de biogás mediante MOR de la fracción resto para su combustión en una planta de cogeneración en la planta de La Paloma. Para ello, se comparará la producción energética en la planta de cogeneración con la producción de calor con gas natural y de electricidad de la red eléctrica de media tensión en España.

Asimismo, es imprescindible mencionar otras especificaciones técnicas del estudio, como la unidad funcional del sistema, que es 1m³ de biogás, que produce 5,8kWh de energía.

En el estudio no se incluye: el transporte de la MOR a la planta de La Paloma, el transporte por la planta, los reprocesamientos ni el tratamiento del digesto tras la digestión anaerobia. Además, la asignación de impactos en la fase de pretratamiento es asignada a la materia orgánica. En la fase de digestión, se hace una distribución de los impactos atendiendo al precio de los productos. Asimismo, en las fases de digestión y de cogeneración se tiene en cuenta los impactos de la construcción de las infraestructuras,

que serán tomadas de la base de datos de Simapro, Ecoinvent, y ajustadas a las características de la planta de La Paloma.

La energía producida en la planta de cogeneración de La Paloma es utilizada, en primer lugar, en las instalaciones de esta misma para abastecer la demanda energética. Con la energía térmica excedente tras el consumo en la planta de La Paloma, el calor es exportado a las instalaciones del Parque Tecnológico de Valdemingómez. Por otra parte, la energía eléctrica excedente es inyectada a la red eléctrica de media tensión.

La producción de biogás aprovecha los residuos orgánicos de la fracción resto, para generar energía renovable, en las siguientes tres fases (Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022):

Pretratamiento: consiste en eliminar productos inorgánicos y reducir el tamaño de las partículas para favorecer la producción de biogás en el digestor anaerobio, mediante los procesos de: trómel, pulpo, lino triturador, cribas, separador balístico e imán ferromagnético. La Tabla 1 presenta las entradas y salidas del proceso de Pretratamientos.

Tabla 1. Resumen de los pretratamientos.

Fuente: elaboración propia

Pretratamientos

<i>Entradas</i>		<i>Unidades</i>	<i>Cita</i>
<i>Fracción resto</i>	12,9	kg/ Nm ³ de biogás	(Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022)
<i>Trómel</i>	6,4	Wh/Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)
<i>Pulpo</i>	2,5	Wh/ Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)
<i>Molino triturador</i>	193,5	Wh/ Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)
<i>Cribas</i>	6,5	Wh/ Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)
<i>Separador Balístico</i>	25,4	Wh/ Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)
<i>Imán ferromagnético</i>	30,3	Wh/ Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)

Salidas		Unidades	Cita
MOR	4,9	Kg	(Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022)
Residuos	8	Kg	(Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022)

Digestión anaerobia: el proceso se realiza en un digestor de flujo continuo en condiciones mesofilicas (30°C), con demanda térmica y eléctrica. El producto es almacenado durante aproximadamente 21 días con agitación continua. A esta fase se introduce la MOR y agua para favorecer la producción de biogás. Tras este proceso se produce biogás y digestato.

Tabla 2. Resumen de la digestión anaerobia.

Fuente: elaboración propia

Digestión anaerobia

Entradas		Unidades	Cita
MOR	4,9	kg/Nm ³ de biogás	(Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022)
Agua	2,45	kg/ Nm ³ de biogás	(Banks et al., 2011)
Electricidad	112,7	Wh/ Nm ³ de biogás	(Slorach et al., 2019)
Calor	406,7	Wh/ Nm ³ de biogás	(Slorach et al., 2019)
Salidas		Unidades	Cita
Emisiones	2	% / Nm ³ de biogás	(Slorach et al., 2019)
Biogás	1	Nm ³ / Nm ³ de biogás	(Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022)
Digestato	2,7	kg/ Nm ³ de biogás	(Banks et al., 2011)

Cogeneración: en este proceso se parte de una planta de 1MW eléctrico con rendimientos de 35% eléctrico y 40% térmico, lo que permite producir 2,32kWh_t y 2,03kWh_e (calculado a partir del PCI del biogás), como se muestra en la Tabla

3. Tras la cogeneración, el calor producido es utilizado en el Parque Tecnológico de Valdemingómez. La electricidad es inyectada a la red eléctrica de media tensión.

Tabla 3. Resumen de la cogeneración.

Fuente: elaboración propia

Cogeneración

<i>Entradas</i>		Unidades
<i>Biogás</i>	1	Nm ³
<i>Salidas</i>		Unidades
<i>Electricidad</i>	2,02	kWh _e
<i>Calor</i>	2,32	kWh _t

Comparación de escenarios

Para poder determinar los impactos generados por la producción de biogás y su combustión en una planta de cogeneración se comparan dos escenarios. De este modo, se han diseñado dos planteamientos: el caso de estudio que está basado en la cogeneración de calor y electricidad mediante biogás de MOR y un escenario de referencia basado en el uso de gas natural para la producción de calor y el consumo de electricidad de la red de media tensión. Para la comparación de ambos escenarios, se tomará la unidad funcional 1Nm³. Para el escenario dos, se tomará 1,63kWh_t y 1,91kWh_e, que es la energía exportada en el proceso de biogás tras el autoconsumo.

3. Resultados

Tras la realización del análisis en Simapro se han estudiado en primer lugar los diferentes procesos de la producción de biogás y sus impactos en comparación con las diferentes etapas, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Contribución de cada etapa a los impactos totales en la cogeneración de calor y electricidad mediante biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia

% de contribución a los impactos totales	Pretratamiento	Digestión Anaerobia	Cogeneración
<i>Agotamiento Abiótico</i>	6,69	58,38	34,93
<i>Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles)</i>	6,71	31,02	62,27
<i>Calentamiento Global</i>	6,71	75,2	18,09
<i>Agotamiento Capa de ozono</i>	6,69	39,84	53,46
<i>Toxicidad humana</i>	6,68	45,8	47,52
<i>Ecotoxicidad de agua dulce</i>	6,7	41,28	52,02
<i>Ecotoxicidad marina</i>	6,69	35,92	57,38
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	6,7	35,33	57,97
<i>Oxidación fotoquímica</i>	6,63	69,33	24,04
<i>Acidificación</i>	14,31	46,93	38,76
<i>Eutrofización</i>	16,76	61,46	21,78

Así mismo, se establece que en la etapa de cogeneración se producen más impactos en 6 de las categorías de estudio. Esto se debe a los impactos generados en la construcción de las infraestructuras de la digestión. Por otra parte, se tiene en cuenta que las emisiones en la etapa de digestión anaerobia son muy elevadas, esto se debe a las fugas de los digestores anaerobios, esto produce altas emisiones de CH₄, NO₂ y por la fabricación de las infraestructuras.

En comparación con la producción de calor y electricidad con gas natural y la red eléctrica, el análisis de ciclo de vida concluye que, en ocho de las once categorías de impacto, la cogeneración mediante biogás tiene un resultado favorable, como se observa en la Figura 1.

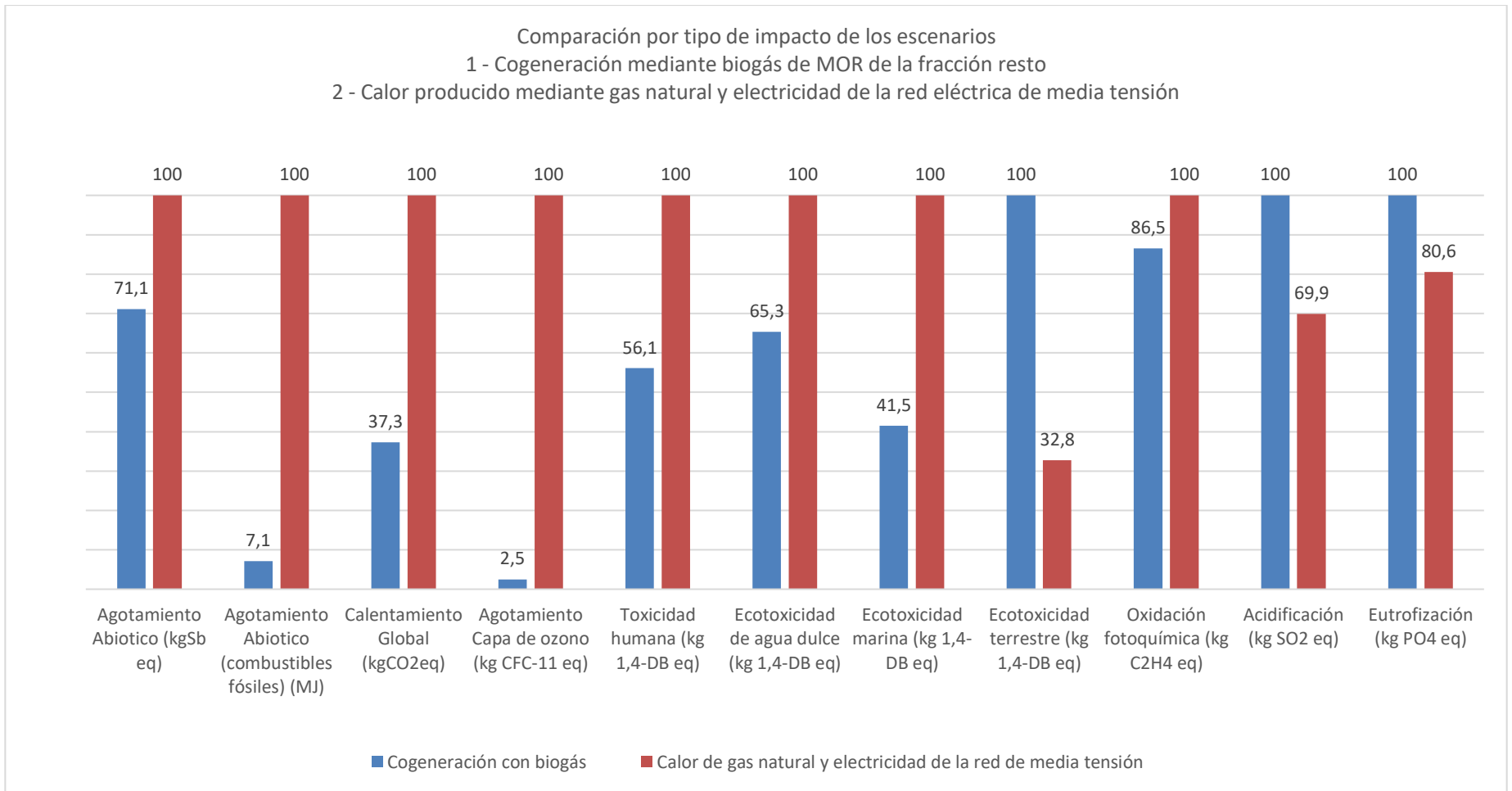


Figura 1. Comparación de los impactos de los dos escenarios propuestos.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de estudio los impactos en ecotoxicidad terrestre son tres veces mayores respecto al escenario de referencia. Se destacan los valores en acidificación que aumentan en el caso de estudio un 12% respecto al escenario de referencia. Además, en la eutrofización el aumento se produce en un 0,5% respecto a los valores del gas natural y electricidad de la red de media tensión. Estos incrementos se deben, como se ha mencionado anteriormente a las emisiones de biogás crudo por las pérdidas en el digestor anaerobio.

Sin embargo, cabe destacar el valor del potencial de calentamiento global, que se ve reducido a un tercio respecto al valor de la producción de calor con gas natural y electricidad de la red de media tensión. Este valor se alinea con los objetivos del Gobierno de España de reducir un 21% las emisiones de efecto invernadero respecto a 1990 (Consejo de Ministros, 2019). Por lo que esta reducción permite acercarse a los valores requeridos.

4. Conclusión

La cogeneración de calor y electricidad mediante el uso de biogás de materia orgánica residual (MOR) se considera medioambientalmente positiva respecto al uso de gas natural para la producción de calor y el uso de electricidad de la red eléctrica de media tensión. Este modelo de generación energética contribuye a la mitigación de 8 de las categorías de impacto estudiadas. Asimismo, aprovecha los residuos orgánicos para generar energía renovable evitando problemas de gestión y contaminación asociados con el desecho inadecuado de estos residuos.

La cogeneración de calor y electricidad mediante biogás de MOR ofrece una solución sostenible para el manejo de residuos y la generación de energía. Al utilizar biogás como combustible, se reduce la dependencia de los combustibles fósiles y se promueve una matriz energética más limpia y renovable. Esto tiene un impacto positivo en la calidad del aire, la salud humana y el medio ambiente en general.

Por lo que con el estudio realizado se han identificado oportunidades de mejora en los procesos que pueden ayudar a disminuir los impactos, convirtiendo a esta fuente de

energía en una solución aún más competitiva. Por ejemplo, en la fase de digestión anaerobia, las emisiones son muy elevadas en aquellas categorías en las que aplican las emisiones de los gases. Por eso desde la UE se pidió a la comisión que se pusieran a disposición orientaciones para la construcción y explotación de estas plantas para la disminución de las fugas (Parlamento Europeo, 2021).

De esta manera también se abordan los impactos por la producción de las infraestructuras. Los impactos en las plantas ya han sido producidos, sin embargo, resulta muy importante la mejora de los procesos de mantenimiento para alargar la vida útil de los productos y de esta manera reducir sus impactos.

Aun así, se produce una disminución de impactos en el resto de las categorías que son: agotamiento de la capa de ozono, agotamiento abiótico, agotamiento abiótico de combustibles fósiles, ecotoxicidad marina, calentamiento global, oxidación fotoquímica, ecotoxicidad agua dulce y toxicidad humana.

En resumen, este enfoque de generación energética contribuye a mitigar múltiples categorías de impacto, al tiempo que aprovecha los residuos orgánicos para generar energía renovable, evitando problemas de gestión y contaminación asociados con el desecho inadecuado de dichos residuos. Aunque aún haya espacio para la mejora, la utilización del biogás como combustible reduce la dependencia de los combustibles fósiles, promueve una matriz energética más limpia y sostenible y facilita el balanceo del sistema por su capacidad de almacenaje mejorando la calidad del aire, la salud humana y el medio ambiente en general.

5. Referencias

Banks, C. J., Chesshire, M., Heaven, S., & Arnold, R. (2011). Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance. *Bioresource Technology*, 102(2), 612-620. <https://10.1016/j.biortech.2010.08.005>

Combs, A. R. (2011). *Life cycle analysis of recycling facilities in a carbon constrained world*. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/7808>

Consejo de Ministros. (2019). *Plan nacional integrado de energía y clima 2021-2030*. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/7808>

Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez. (2022). *Memoria de actividades PTV 2021..* https://www.madrid.es/UnidadWeb/Contenidos/RC_Valdemingomez/Publicaciones/Memoria_Actividades_DGPTV_2021.pdf

Norma ISO 14040: Gestión ambiental — evaluación del ciclo de vida — principios y marco, (2006). <https://www.iso.org/standard/37456.html>

Parlamento Europeo. (2020). *Pacto verde europeo: Clave para una UE climáticamente neutra y sostenible*.

https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20200618STO81513/pacto-verde-europeo-clave-para-una-ue-climaticamente-neutral-y-sostenible?&at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=pacto%20verde%20europeo&at_topic=Green_Deal&at_location=ES&gclid=Cj0KCCQjwiIOMBhDjARIsAP6YhSU38xFtyaDJFaU8Op4Vvkuk2kJ_Y72ubQKCd4Eq--jJ3oAMw7pWmzdQaAthWEALw_wcB

Parlamento Europeo. (2021). *Resolución del Parlamento Europeo, de 21 de octubre de 2021, sobre una estrategia de la UE para reducir las emisiones de metano*

(2021/2006(INI)) https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0436_ES.html

Secretaría de Estado de Energía. (2021). *Hoja de ruta del biogás*. ().Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf

Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2019). Environmental sustainability of anaerobic digestion of household food waste. *Journal of Environmental Management*, 236, 798-814. <https://10.1016/j.jenvman.2019.02.001>

UNFCCC. (2013). *MANUAL DEL SECTOR DE LA ENERGÍA: quema de combustibles*. <https://unfccc.int/sites/default/files/7-bis-handbook-on-energy-sector-fuel-combustion.pdf>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., & Moreno-Ruiz, E. (2016). Ecoinvent, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.8., 1218-1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

ENVIRONMENTAL EVALUATION OF THE PRODUCTION OF BIOGAS FROM RESIDUAL ORGANIC FRACTION WITH A LIFE CYCLE ASSESMENT.

Author: Garamendi Smith, Marta

Director: Martín Sastre, Carlos

Director: González Arechavala, Yolanda

Colaborative entity: ICAI- Universidad de Comillas

Summary of the Project

1. Introduction

Nowadays energy generation is based upon the use of fossil fuels, during which there are CO₂, NO_x, SO₂ y CO (UNFCCC, 2013), to name a few, these gasses have detrimental impacts to the environment. Faced with this reality, the council of the European Union has promoted policies to encourage the energy production by alternative means, in line with the principles established in the European Green Deal (Parlamento Europeo, 2020). In this context, the use of biogas as an energy alternative is being promoted. Biogas is an organic-origin fuel that contains a high percentage of methane (between 45% and 65%) and carbon dioxide (between 35% and 55%), and it has a high calorific value (Secretaría de Estado de Energía, 2021). As its production comes from renewable raw materials, it is classified as a sustainable energy source.

Biogas can be produced out of different biomasses, and when its origins are organic residues, it is considered a second-generation biofuel. These kinds of biofuels are booming, as they add value to products that, otherwise, would have negative impacts on environment and health. However, the increase in the generation of residues sets a challenge in terms of sustainability, which it requires improvements on the treatments processes. Besides, biogas shows a major advantage compared with other renewable sources of energy, such as solar and wind, as it can be stored, that it is of great interest to the electric system.

This context shows a greater political effort to integrate sustainability in the energy production processes, as well as a growing interest in finding solutions that provide a second life to the generated residues. Spain, as a member of the European Union, needs to comply to this environmental agenda. According to the Ministry for Ecological Transition and Demographic Challenge (Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico) in 2022, this Will translate in a significant increase in the production for biogas in Spain, estimated to reach x3,8 in 2030. According to this, the production of biogas with the residues plays a fundamental role in providing a more sustainable solution for its treatment.

This Master's Theses (from now on referred as TFM), there will be an analysis of the real impacts of the real impacts generated along the biogas production process, with the aim of understanding the effects that the new regulatory framework and the new production reality will have in Spain. To carry out this study, the plant of La Paloma in the Parque Tecnológico de Valdemingómez in Madrid has been used as a reference, that is the only plant in the capital that works with the residual fraction and provides them with a second life, being one of the few plants in the country that adds value to these types of residues. This plant generates biogas from the organic matter of the residual fraction (MOR).

2. Project definition and methodology

The ever-increasing interest for the investment in this technology and the reduction of the impacts named increase the need of its analysis. Consequently, along this project a Life Cycle Assessment has been carried out following the ISO 14040 and the 14044 methodologies (ISO, 2006), tool to determine the impacts generated in the obtaining of the product.

For the development of this LCA Simapro software version 9.4.0.2 has been used, it allows the designing and calculation of the impacts of the processes related to the life of the products, the data base used has been Ecoinvent v3.8 using the library "allocation cut-off by classification" (Wernet et al., 2016). For the analysis, the impact methodology

used has been (CLM_IA-baseline), that analyses 11 categories (abiotic depletion, abiotic depletion (fossil fuels), global warming, ozone layer depletion, human toxicity, terrestrial ecotoxicity, marine aquatic ecotoxicity, fresh water ecotoxicity, photochemical oxidation, acidification, eutrophication).

This project supports the Sustainable Development Objectives achievement, specifically objective number 13: Climate action, as it seeks to understand the impacts generated in processes in order to make decisions that reduce them. And with SDG number 11, 'Sustainable Cities and Communities,' particularly target 11.6: 'By 2030, reduce the adverse per capita environmental impact of cities, including paying special attention to air quality and municipal and other waste management'. The production of biogas with organic matter residue can be implemented locally, supplying clean and sustainable energy source for urban communities.

The objective of this LCA is to determine the impacts, according to the defined categories of the CLM method, in each stage (pretreatment, anaerobic digestion and cogeneration) of the production of biogas with MOR of the residual fraction for its combustion in the cogeneration plant in La Paloma. For this purpose, there will be a comparison between the energy production in the cogeneration plant and the production of heat with natural gas and electricity with the medium voltage grid in Spain.

Besides, it is necessary to mention other technical specifications of the study, such as the functional unit of the system, that is 1m³ of biogas, that produces 5,8kWh of energy.

This study does not include: the transport of the waste to La Paloma plant, the transport inside the plant, the reprocesses nor the treatment of the digestate after the anaerobic digestion. Indeed, the impact generated in the pretreatment stage are completely assignment to the organic waste (MOR). In the digestion stage the distribution is made with the price of the products. Moreover, in the stages of anaerobic digestion and cogeneration the impacts from the construction of the infrastructures are considered, these will be taken from Simapro's data base Ecoinvent and adjusted to La Paloma's characteristics.

The energy produced in the La Paloma cogeneration plant is first used within its own facilities to meet energy demand. With the surplus thermal energy after consumption at the La Paloma plant, the excess heat is exported to the facilities of the Valdemingómez Technology Park. On the other hand, the excess electrical energy is fed into the medium-voltage electrical grid.

The production of biogas uses the organic matter of the residual fraction to generate renewable energy in the following three stages (Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022):

Pretreatment: this process consists of the elimination of inorganic matter and the size reduction of the particles to enhance the production of the biogas in the anaerobic digester, with the processes of: trommel, pulp, crusher mill, screens, ballistic separator and ferromagnetic magnet. Table 1. Represents the inputs and outputs of the pretreatment processes.

Table 1. Summary of the pretreatment processes.

Source: own elaboration.

Pretreatments

<i>Input</i>		Units	Source
<i>Residual fraction</i>	12,9	kg/ Nm ³ of biogas	(Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022)
<i>Trommel</i>	6,4	Wh/Nm ³ of biogas	(Combs, 2011)
<i>Pulp</i>	2,5	Wh/ Nm ³ of biogas	(Combs, 2011)
<i>Crusher Mill</i>	193,5	Wh/ Nm ³ of biogas	(Combs, 2011)
<i>Screens</i>	6,5	Wh/ Nm ³ of biogas	(Combs, 2011)

<i>Balistic separator</i>	25,4	Wh/ Nm ³ of biogas	(Combs, 2011)
<i>Ferromagnetic magnet</i>	30,3	Wh/ Nm ³ of biogas	(Combs, 2011)
<i>Output</i>		Units	Source
<i>MOR residue</i>	4,9	Kg/ Nm ³ of biogas	(Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022)
<i>Residues</i>	8	Kg/ Nm ³ of biogas	(Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022)

Anaerobic digestion: the process is carried out in a continuous flow digester under mesophilic conditions (30°C), with thermal and electrical demand. The product is stored for approximately 21 days with continuous agitation. In this phase, MOR (Organic Waste Residue) and water are introduced to promote biogas production. After this process, biogas and digestate are produced, as shown in Table 2.

Table 2. Summary of the anaerobic digestion.

Source: own elaboration.

Digestión anaerobia

<i>Inputs</i>		Units	Source
<i>MOR</i>	4,9	kg/Nm ³ of biogas	(Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022)
<i>Water</i>	2,45	kg/ Nm ³ of biogas	(Banks et al., 2011)
<i>Electricity</i>	112,7	Wh/ Nm ³ of biogas	(Slorach et al., 2019)
<i>Heat</i>	406,7	Wh/ Nm ³ of biogas	(Slorach et al., 2019)
<i>Outputs</i>		Units	Source
<i>Emissions</i>	2	% / Nm ³ of biogas	(Slorach et al., 2019)
<i>Biogas</i>	1	Nm ³ / Nm ³ of biogas	(Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022)
<i>Digestate</i>	2,7	kg/ Nm ³ of biogas	(Banks et al., 2011)

Cogeneration: In this process, it starts with a 1MW electric power plant with electrical and thermal efficiencies of 35% and 40%, respectively, which allows producing 2.32 kW_th (thermal) and 2.03 kW_eh (electrical) (calculated based on the Lower Heating Value of biogas), as shown in Table 3. After cogeneration, the produced heat is utilized in the Valdemingómez Technology Park. The electricity is injected into the medium-voltage electrical grid.

Table 3. Resume of the cogeneration.

Source: own elaboration

Cogeneration

Inputs		Units
Biogas	1	Nm ³
Outputs		Units
Electricity	2,02	kWh
Heat	2,32	kWh

Comparison of the scenarios.

In order to determine the impacts generated by the production and combustion of biogas in a cogeneration plant, two scenarios are compared. In this way, two approaches have been designed: one the case study based on the co-generation of heat and electricity using MOR biogas, and another reference scenario based on the use of natural gas for heat production and the consumption of electricity from the medium voltage grid. For the comparison of both scenarios, the functional unit of 1Nm³ will be used. For scenario two, energy values of 1,63 kW_th and 1,91 kW_eh, produced with the functional unit, will be considered, this is the exported energy in the biogas process after self-consumption.

3. Results

After the production of the analysis in Simapro, firstly the different biogas production methods and their impacts have been compared between them, have been studied, as shown in Table 4.

Table 4. Contribution of each stage to the total impacts in the cogeneration of heat and electricity with biogas from MOR.

Source: own elaboration.

% contribution of total impacts	Pretreatment	Anarobic digestion	Cogeneration
<i>Abiotic depletion</i>	6,69	58,38	34,93
<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	6,71	31,02	62,27
<i>Global Warming</i>	6,71	75,2	18,09
<i>Ozone layer depletion</i>	6,69	39,84	53,46
<i>Human toxicity</i>	6,68	45,8	47,52
<i>Fresh wáter ecotoxicity</i>	6,7	41,28	52,02
<i>Marine Ecotoxicity</i>	6,69	35,92	57,38
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	6,7	35,33	57,97
<i>Photochemical oxidation</i>	6,63	69,33	24,04
<i>Acidification</i>	14,31	46,93	38,76
<i>Eutrofization</i>	16,76	61,46	21,78

Likewise, it is established that in the cogeneration there are more impacts in 6 of the studied categories. This is due to the impact generated in the manufacturing of the infrastructure of the digestion. On the other hand, it is taken into account that emissions during the digestion stage are very high, which is due to leaks from anaerobic digesters, resulting in high emissions of CH₄, NO₂ and due to the manufacturing of their infrastructures.

In comparison to heat and electricity production using natural gas and the electric grid, the life cycle analysis concludes that, in eight out of eleven impact categories, cogeneration using biogas yields favorable results, as shown in Figure 1.

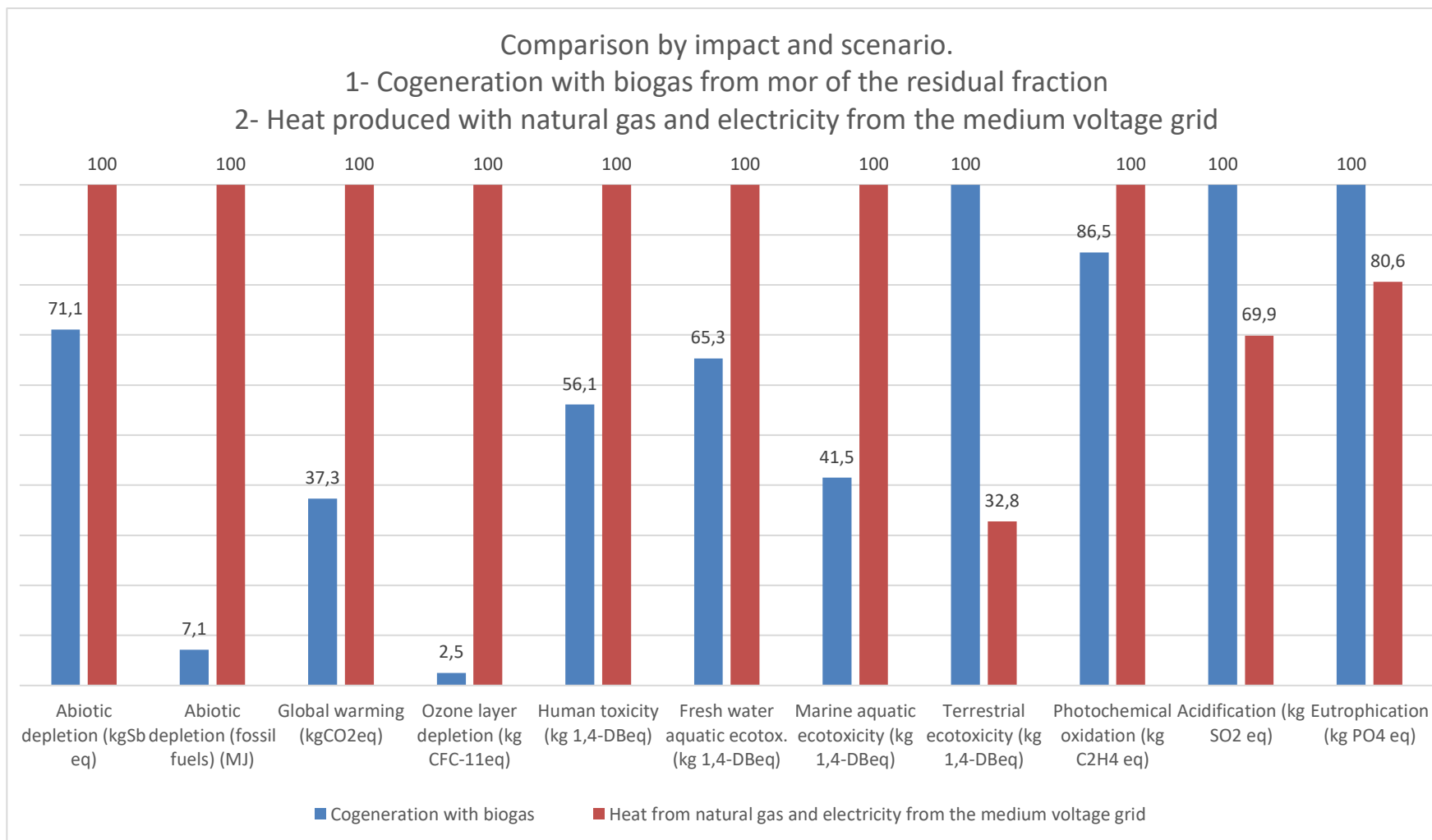


Figure 1. Comparison of the two proposed scenarios.

Source: own elaboration

In the study case the terrestrial ecotoxicity's impacts are three times higher than in the reference scenario. The values in acidification stand out, increasing by 12% in study case compared to the reference scenario. Additionally, in eutrophication, the increase is by 0.5% compared to values from natural gas and medium-voltage electric grid electricity. These increments are due, as mentioned before, to emissions from raw biogas resulting from losses in the anaerobic digester.

However, it's worth noting the value of the global warming potential, which is reduced to one-third of the value of the production of heat with natural gas and electricity from the medium-voltage grid. This reduction allows approaching the requirements set by the Spanish Government to reduce greenhouse gas emissions by 21% compared to 1990 (Consejo de Ministros, 2019). Therefore, this reduction brings the values closer to the required targets.

4. Conclusions

The cogeneration of heat and electricity with biogas from the organic matter of the residual fraction (MOR) is considered positive compared with the use of natural gas for the production of heat and electricity from the medium voltage grid. This generation model contributes to the mitigation of 8 of the studied impact categories. Moreover, it reuses the organic residues to generate renewable energy reducing management and polluting problems associated with the inadequate disposal of these residues.

The cogeneration of heat and electricity of MOR's biogas offers a sustainable solution to the management of residues and energy generation. The use of biogas as a fuel, reduces the dependency on fossil fuels and promotes a cleaner and more renewable energy matrix. This has a positive impact on air quality, human health and the environment in general.

Therefore, through the conducted study, improvement opportunities have been identified in the processes that can help decrease the impacts, making this energy source an even more competitive solution. For instance, in the anaerobic digestion phase, emissions are notably high in those categories where gas emissions apply. This is why the EU requested

the commission to provide guidelines for the construction and operation of such plants to reduce leaks (Parlamento Europeo, 2021).

This approach also addresses the impacts caused by infrastructure production. The impacts at the plants have already occurred; nevertheless, improving maintenance processes is crucial to prolong the lifespan of products and thus reduce their impacts.

Nevertheless, there is a reduction in impacts across the rest of the categories, which include: ozone depletion, abiotic depletion, abiotic depletion of fossil fuels, marine ecotoxicity, global warming, photochemical oxidation, freshwater ecotoxicity, and human toxicity.

To sum up, this energy generation approach contributes to various impact categories mitigation, as well as taking advantage of organic residue to generate renewable energy, avoiding the management and pollution associated to the inadequate disposal of these wastes. Although there is room for improvement, the use of biogas a fuel reduces the dependency on fossil fuels, promotes a cleaner and more sustainable energy matrix and facilitates the system balancing due to its capacity to be storage improving air quality, human health and the environment in general.

5. References

Banks, C. J., Chesshire, M., Heaven, S., & Arnold, R. (2011). Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance. *Bioresource Technology*, 102(2), 612-620. <https://10.1016/j.biortech.2010.08.005>

Combs, A. R. (2011). *Life cycle analysis of recycling facilities in a carbon constrained world*. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/7808>

Consejo de Ministros. (2019). *Plan nacional integrado de energía y clima 2021-2030*. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/7808>

Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez. (2022). *Memoria de actividades PTV 2021.*

https://www.madrid.es/UnidadWeb/Contenidos/RC_Valdemingomez/Publicaciones/Memoria_Actividades_DGPTV_2021.pdf

Norma ISO 14040: Gestión ambiental — evaluación del ciclo de vida — principios y marco, (2006). <https://www.iso.org/standard/37456.html>

Parlamento Europeo. (2020). *Pacto verde europeo: Clave para una UE climáticamente neutra y sostenible.*

https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20200618STO81513/pacto-verde-europeo-clave-para-una-ue-climaticamente-neutral-y-sostenible?&at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=pacto%20verde%20europeo&at_topic=Green_Deal&at_location=ES&gclid=Cj0KCQjwiIOMBhDjARIsAP6YhSU38xFtyaDJFaU8Op4Vvkuk2kJ_Y72ubQKCd4Eq--jJ3oAMw7pWmzdQaAthWEALw_wcB

Parlamento Europeo. (2021). *Resolución del Parlamento Europeo, de 21 de octubre de 2021, sobre una estrategia de la UE para reducir las emisiones de metano (2021/2006(INI))* https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0436_ES.html

Secretaría de Estado de Energía. (2021). *Hoja de ruta del biogás*. ().Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf

Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2019). Environmental sustainability of anaerobic digestion of household food waste. *Journal of Environmental Management*, 236, 798-814. <https://10.1016/j.jenvman.2019.02.001>

UNFCCC. (2013). *MANUAL DEL SECTOR DE LA ENERGÍA: quema de combustibles*. <https://unfccc.int/sites/default/files/7-bis-handbook-on-energy-sector-fuel-combustion.pdf>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., & Moreno-Ruiz, E. (2016). Ecoinvent, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.8., 1218-1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

Índice de la memoria

1. Introducción.....	6
1.1 Contexto Global	8
1.2 Biocombustibles tipos y usos.....	12
1.2.1 Biocombustibles de primera generación.....	13
1.2.2 Biocombustibles de segunda generación	13
1.2.3 Biocombustibles de tercera generación	14
1.2.4 Combustibles verdes “E-fuels”	15
1.3 Producción de residuos.....	15
2. Procesos de producción de biogás mediante digestión anaerobia.....	18
2.1 Parámetros del proceso de digestión anaerobia.....	19
2.1.1 Parámetros ambientales	19
2.1.2 Parámetros operacionales.....	20
2.2 Fases del proceso de digestión anaerobia	21
2.2.1 Recepción y preprocesamiento de la biomateria	22
2.2.2 Hidrólisis	23
2.2.3 Acidogénesis	24
2.2.4 Acetogénesis	25
2.2.5 Metanogénesis	25
2.3 Tecnologías de digestión anaerobia.....	26
2.3.1 Tecnologías de pretratamiento	26
2.3.2 Tipos de biodigestores	30
3. Cogeneración.....	35
3.1 Ciclo de gas	36
3.2 Poder calorífico del biogás	37
4. Estado del arte	40
4.1 Contexto en España	40
4.2 Estudios existentes.....	42

5. <i>Análisis de ciclo de vida</i>	47
5.1 Fases del ACV	47
5.2 Fase 1: Definición del objetivo y alcance	49
5.3 Caracterización de los datos	53
5.4 Fase 2: Análisis de inventario	54
5.4.1 <i>Fase de Pretratamiento</i>	56
5.4.2 <i>Digestión anaerobia</i>	57
5.4.3 <i>Cogeneración</i>	62
5.4.4 <i>Impactos de las infraestructuras</i>	65
5.4.5 <i>Electricidad y Calor</i>	66
6. <i>Evaluación de los impactos ambientales</i>	68
6.1 Procesos de producción de calor y electricidad mediante biogás	68
6.2 Comparación entre los diferentes escenarios	78
6.2.1 <i>Agotamiento abiótico</i>	80
6.2.2 <i>Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)</i>	80
6.2.3 <i>Calentamiento global</i>	80
6.2.4 <i>Agotamiento capa de ozono</i>	81
6.2.5 <i>Toxicidad Humana</i>	81
6.2.6 <i>Ecotoxicidad</i>	81
6.2.7 <i>Oxidación fotoquímica</i>	82
6.2.8 <i>Acidificación</i>	82
6.2.9 <i>Eutrofización</i>	82
7. <i>Conclusiones</i>	85
8. <i>Desarrollo Futuro</i>	88
9. <i>Bibliografía</i>	92
ANEXO A. <i>Objetivos de desarrollo sostenibles</i>	108

Índice de figuras

Figura 1. Consumo Eléctrico Mundial.	9
Figura 2. Funcionamiento de una turbina de gas	36
Figura 3. Ciclo de Brayton	37
Figura 4. Fases de tratamiento de la fracción resto.	52
Figura 5. Mix eléctrico español de media tensión.	67
Figura 6. Contribución de cada fase a las emisiones totales en la cogeneración con biogás de MOR.	70
Figura 7. Agotamiento abiótico en la producción energética con biogás de MOR.....	71
Figura 8. Agotamiento abiótico (combustibles fósiles) en la producción energética con biogás de MOR.....	72
Figura 9. Calentamiento global en la producción energética con biogás de MOR.	73
Figura 10. Agotamiento de la capa de ozono en la producción energética con biogás de MOR.	74
Figura 11. Toxicidad humana en la producción energética con biogás de MOR.....	74
Figura 12. Ecotoxicidad acuática agua dulce en la producción energética con biogás de MOR.	75
Figura 13. Ecotoxicidad marina en la producción energética con biogás de MOR.	75
Figura 14. Ecotoxicidad terrestre en la producción energética con biogás de MOR.	75
Figura 15. Oxidación fotoquímica de la producción energética con biogás de MOR.....	76
Figura 16. Acidificación de la producción energética con biogás de MOR.....	77
Figura 17. Eutrofización de la producción energética con biogás de MOR.....	78



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 18. Comparación de los impactos entre los escenarios..... 83

Índice de tablas

Tabla 1. Componentes de 1 tonelada de residuos de la fracción resto en el año 2021.....	54
Tabla 2. Composición química de los residuos de la fracción resto en el año 2021	55
Tabla 3. Composición del residuo de la fracción resto.....	55
Tabla 4. Demanda energética fase de pretratamiento	56
Tabla 5. Composición del biogás producido con MOR.	58
Tabla 6. Poder Calorífico en la planta de La Paloma.	60
Tabla 7. Composición del biogás en la digestión anaerobia.....	60
Tabla 8. Perdidas de biogás a la atmosfera.respecto a la unidad funcional 1Nm ³	61
Tabla 9. Factores de Emisión de biogás en plantas de cogeneración.	64

1. INTRODUCCIÓN

En un contexto de cambio climático, escasez de recursos naturales y dependencia de combustibles fósiles, las instituciones reguladoras se han marcado un objetivo claro: encontrar alternativas que tengan un menor impacto medioambiental, y permitan la optimización de un gran lastre que genera la sociedad: los residuos. El biogás se erige como una solución que permite dar una segunda vida a los residuos, y minimizar el impacto negativo que otros métodos de producción energética están teniendo en el planeta. La Unión Europea ha dado pasos hacia establecer un marco regulatorio común para todos los Estados miembros gracias al Acuerdo de París, impulsando la producción energética de estas características, y marcando el ritmo del desarrollo del sector energético hacia sendas más sostenibles y positivas para el medio ambiente. En su aplicación concreta en España, se estima que la producción de biogás haya aumentado en 3,8 veces para 2030 (Secretaría de Estado de Energía, 2021). Esta aplicación supondrá una gran evolución del sector, impulsando la innovación, la gestión de residuos y la diversificación de la matriz energética.

Para entender el impacto de una producción más extensiva del biogás, a lo largo de este Trabajo de fin de máster (en adelante referido como TFM), se ha analizado el ciclo de vida de la producción de biogás a partir de materia orgánica residual (MOR) de los residuos de la fracción resto.

En primer lugar, se presenta un análisis del contexto medioambiental, ofreciendo una descripción detallada de la situación actual en términos de sostenibilidad y el impacto que las prácticas de producción de energía tienen en el medio ambiente.

A continuación, se realiza un estudio exhaustivo sobre las distintas tecnologías de biocombustibles que están siendo desarrolladas. El objetivo de esta sección es brindar una visión de las innovaciones y avances en el campo de los biocombustibles, así como explicar

las razones por las cuales se considera el uso de la materia orgánica residual (MOR) como una solución para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y dar una segunda vida a los residuos generados.

Posteriormente, se aborda la problemática actual relacionada con los residuos, con el fin de comprender la necesidad de revalorizarlos. Se examinan los desafíos y las consecuencias de la gestión inadecuada de los residuos, además de las implicaciones medioambientales asociadas.

A continuación, se lleva a cabo una descripción detallada de las distintas tecnologías y fases de la digestión anaerobia. El propósito de esta sección es lograr una comprensión profunda de las etapas y procesos involucrados en la misma, aspecto fundamental para la producción de biogás a partir de MOR.

Finalmente, se realiza un análisis exhaustivo del ciclo de vida del proceso de producción de biogás. Este análisis se divide en diversas fases y su objetivo es evaluar minuciosamente el impacto medioambiental de todo el ciclo, desde la recolección de la fracción resto hasta la generación de biogás y su combustión en una caldera de cogeneración.

Para llevar a cabo este análisis, se utilizará el software Simapro versión 9.4.0.2 con la base de datos de Ecoinvent versión 3.8 (Wernet et al., 2016), una herramienta de cálculo de ACV, que mediante la introducción de datos de los procesos y la utilización de las librerías con base de datos propias permiten el cálculo de impactos.

En este análisis se considerarán aspectos cruciales como las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de recursos y otros impactos ambientales relevantes, siguiendo la metodología de análisis de impactos CLM, desarrollada por el Centro de Estudios Medioambientales de la Universidad de Leiden, Países Bajos.

Teniendo todo lo mencionado en cuenta, este estudio es crucial para entender el impacto potencial del desarrollo de la producción de biogás en España. Al analizar el impacto que tiene de acuerdo con las 11 categorías del método CLM, ofrece una visión clara de su

sostenibilidad y viabilidad como fuente energética. La comprensión de estas implicaciones ayudará a tomar decisiones informadas en la implementación y promoción del biogás en el país, contribuyendo a una transición más efectiva hacia una economía baja en carbono.

1.1 CONTEXTO GLOBAL

En el mundo existen en la actualidad pocas alternativas seguras, bajas en carbono y de bajo coste en gran escala frente a los combustibles fósiles (Ritchie et al., 2022), a excepción de las generadas por fuentes renovables. Pese a los esfuerzos de inversión en diferentes biocombustibles que permitan reducir la huella de carbono, la producción es insuficiente para la demanda energética existente.

Hasta que no se llegue a producir toda la energía demandada mediante fuentes renovables, se presentan dos grandes retos energéticos:

1. Población que no tendrá acceso a fuentes de energía
2. Combustibles fósiles como fuente principal de producción de energía, agravando la situación actual frente al cambio climático y afectando negativamente a la salud de la población y el planeta.

El cambio climático afecta de forma directa a millones de personas, especialmente a personas provenientes de países en vías de desarrollo (OMS, 2021). Genera efectos negativos significativos en nuestro planeta, incluyendo fenómenos meteorológicos extremos, cambios en los patrones de precipitación, pérdida de biodiversidad, impactos en la salud humana y escasez de recursos naturales. Estos efectos resaltan la urgente necesidad de acciones globales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y adaptarse a los cambios climáticos, con el fin de asegurar un futuro sostenible.

Esta situación se ve agravada con la creciente curva en el consumo de energía, debido al crecimiento de la industria y de la población como se puede observar en la Figura 1. Exceptuando en 2020, tras la pandemia del Covid-19, donde el consumo eléctrico mundial se redujo de 26.957.570,8GWh (2019) a 26.720.546,12GWh (2020) (IEA, 2022).

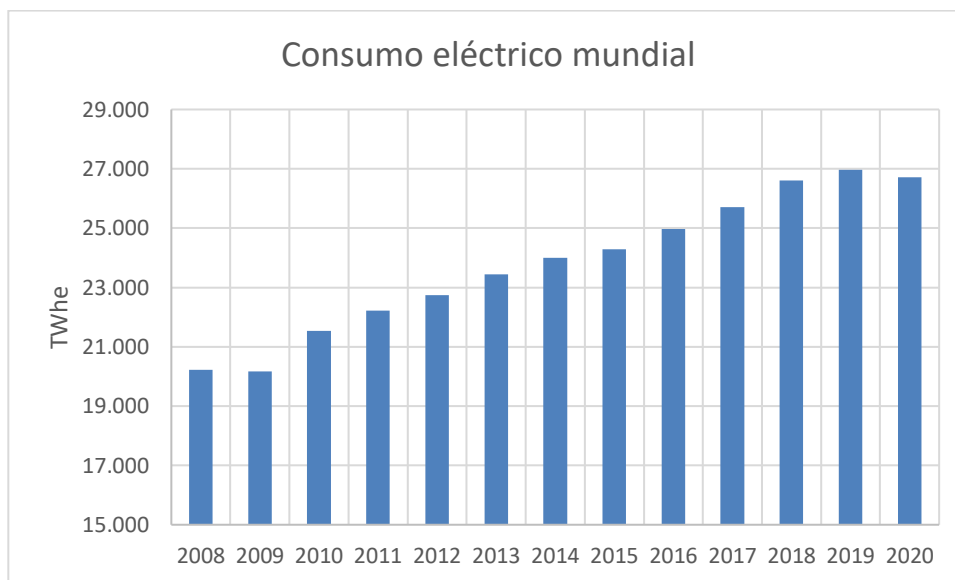


Figura 1. Consumo Eléctrico Mundial.

Fuente: elaboración propia a partir de (IEA, 2022)

La producción de energía ha originado un 88% (IEA, 2023) de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. En Europa, se han producido el 75% en el último año (Comisión Europea, 2021). Estas emisiones producen cambios en las temperaturas del planeta, por lo que el aumento de producciones más limpias es indispensable para paliar el calentamiento global. Las emisiones de CO₂, gas de efecto invernadero, han sufrido un ascenso de 0,8% en 2022 llegando a los 36,8 billones de toneladas en 2022 (IEA, 2023).

Al seguir produciendo gases de efecto invernadero, la concentración de estos en la atmósfera va en aumento. Por ello, para lograr frenar el cambio climático, ha de estabilizarse su nivel de emisión, alcanzando el nivel cero para el año 2050.

Por otro lado, existe un alto número de países con muy pocas emisiones de CO₂, debido, en muchos casos, a la falta de acceso a la energía a la que se enfrentan. Además, en los países en desarrollo, los recursos naturales son utilizados para generar calor en actividades como la cocina, lo que puede generar efectos tóxicos para los seres humanos.

La mayoría de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera provienen principalmente de países desarrollados (Cozzi et al., 2023).. Por ejemplo, se estima que el consumo energético de un ciudadano de los Estados Unidos en solo cuatro días es equivalente al consumo anual de un ciudadano en un país en vías de desarrollo. No obstante, dentro de los países desarrollados, también existe una disparidad en las emisiones entre distintos estratos sociales, donde las personas de mayor poder adquisitivo suelen ser responsables de una mayor producción de GEI. Como resultado de todas estas emisiones, el cambio climático se ha convertido en un problema de gran magnitud en diversas regiones del planeta, llevando a los gobiernos a participar en diferentes convenciones con el fin de abordar esta situación de manera contundente. En 2016, se llevó a cabo la firma de un tratado en la COP21 en París, adoptado por 196 países, conocido como el Acuerdo de París (2017), que enfatiza la urgencia de detener el aumento de la temperatura media mundial para evitar que supere 1,5°C (United Nations Climate Change, 2016).

Siguiendo las tendencias actuales de emisiones de GEI se acabaría con el “Presupuesto de carbono” (Cantidad total de GEI que se pueden emitir a la atmósfera sin que supongan cambios peligrosos en el cambio climático) en 25 años.

Por este motivo desde la Unión Europea se desarrolló el Pacto Verde Europeo, legalmente vinculante, cuyo objetivo para 2030 es la reducción de las emisiones de 1.990 en un 55%, el llamado “Objetivo 55”, para poder llegar a tener una neutralidad climática en 2050,

(Parlamento Europeo, 2020). Se potencia el uso de fuentes renovables para la producción energética en vez del uso de combustibles fósiles, buscando la reducción de emisiones producidas por el consumo energético en un 42,8% (Comisión Europea, 2021). El 40% de la energía se producirá a partir de fuentes renovables. Para fomentar esta medida se establecen precios a las emisiones de carbono, cuyos beneficios deben ser usados para proyectos para disminuir el impacto climático y potenciar la producción de energía renovable. El pacto también promueve una economía circular fomentando el reciclaje y la reutilización.

1.2 BIOCOMBUSTIBLES TIPOS Y USOS

Para disminuir el consumo de combustibles fósiles, se han desarrollado diferentes biocombustibles. Un biocombustible se define como un tipo de combustible derivado de fuentes biológicas renovables, tales como cultivos agrícolas, residuos orgánicos, materiales forestales y algas (Mahapatra et al., 2021). Los biocombustibles líquidos incluyen el bioetanol, el biodiésel, el bioaceite de pirolisis y los combustibles para el transporte (Guo et al., 2015). Algunos ejemplos de biocombustibles fósiles son la madera y sus derivados. Los biocombustibles gaseosos son el biogás, el gas síntesis y el biometano. Históricamente, la biomasa ha sido utilizada por el ser humano como fuente de energía para cocinar, calentar e iluminar. Además, la cantidad de energía almacenada anualmente en la biomasa terrestre es de 3 a 4 veces mayor que la demanda energética anual. Se presenta, por lo tanto, como una alternativa que permitirá bajar la dependencia de los combustibles fósiles convencionales.

Actualmente, se están investigando nuevas fuentes de combustibles renovables con un menor impacto ambiental que los combustibles tradicionales como la gasolina, el diésel y el gas natural. En definitiva, el desarrollo de los biocombustibles es de vital importancia debido a su potencial para impulsar una transición hacia una economía más sostenible y con menor impacto ambiental. A medida que la demanda mundial de energía continúa aumentando y los recursos de combustibles fósiles se agotan, los biocombustibles ofrecen una alternativa renovable y más limpia para abastecer las necesidades energéticas.

Existen tres generaciones diferentes de biocombustibles, además de los llamados "combustibles verdes". A continuación, se ofrecerá una descripción detallada de cada una de estas generaciones para poder entender sus particularidades, ventajas y desafíos.

1.2.1 BIOCOMBUSTIBLES DE PRIMERA GENERACIÓN

Los biocombustibles de primera generación son aquellos producidos mediante los productos resultantes de los cultivos agrícolas (Mahapatra et al., 2021). Estos biocombustibles son producidos mediante azúcar, almidón y aceites vegetales.

Los combustibles procedentes de este tipo de biomasa son el etanol, propanol y butanol, que son producidos mediante la acción de microorganismos y enzimas durante la fermentación de azúcares, almidones o celulosa.

La primera generación de biocombustibles tiene una limitación muy grande ya que la producción masiva de estos biocombustibles supone una amenaza al suministro de comida y a la biodiversidad (Elena Fortunati et al., 2019), ya que se requiere una amplia superficie para la producir los productos agrícolas.

Los biocombustibles presentan varias desventajas (Takács-György et al., 2020):

- Baja rentabilidad económica
- Limitada reducción de gases de efecto invernadero
- Su producción puede afectar al abastecimiento de alimentos
- Aumento de la demanda de agua para el riego de las plantaciones, aumento de fertilizantes y uso de terrenos.

En conclusión, aunque esta generación representa una opción inicial para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, su producción masiva plantea desafíos significativos. Por ello, es necesario evolucionar a generaciones más avanzadas.

1.2.2 BIOCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN

Debido a las limitaciones de la primera generación expuestas anteriormente, se desarrollaron los biocombustibles de segunda generación. Estos combustibles se obtienen a partir de materias primas no comestibles o residuos biológicos, como la madera, los residuos sólidos

urbanos, los residuos industriales y los residuos de aceites vegetales (Rasimphi et al., 2022). La biomasa utilizada en la producción de biocombustibles se considera de segunda generación cuando ya ha cumplido su propósito principal. Estos productos están diseñados para tener en el futuro un menor coste de producción que los combustibles fósiles (Elena Fortunati et al., 2019). Sin embargo, debido a su origen y a los procesos necesarios para su producción, es necesario realizar un estudio del ciclo de vida de estos productos para evaluar su viabilidad.

El proyecto en estudio se enfoca en el biogás de segunda generación, ya que utiliza la materia orgánica de la fracción resto. El uso de este tipo de biocombustibles no implica un aumento en el uso de fertilizantes, agua o tierras, ya que se trata de residuos que, de otra manera, se estarían desechando.

1.2.3 BIOCOMBUSTIBLES DE TERCERA GENERACIÓN

La tercera generación de biocombustibles se produce mediante algas. Este tipo de biomateria se considera un biocombustible mejorado ya que permite erradicar inconvenientes de las otras dos generaciones de biocombustibles (Jacob-Lopes et al., 2022). Una de las principales ventajas de las algas es su capacidad para absorber el dióxido de carbono emitido por la industria, lo que podría tener un impacto significativo en la disminución de las emisiones.

Sin embargo, las algas también presentan una importante desventaja, ya que requieren grandes cantidades de agua, nitrógeno y sulfatos para su crecimiento. De hecho, la producción de los fertilizantes necesarios para satisfacer estas necesidades podría aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero, superando los ahorros obtenidos mediante el uso del biocombustible producido por las algas. Además, el biocombustible producido a partir de las algas tiende a ser menos estable que otros biocombustibles de las otras generaciones. Es posible, por lo tanto, que la implementación a gran escala de las algas para la producción de biocombustibles no se lleve a cabo en el corto plazo.

1.2.4 COMBUSTIBLES VERDES “E-FUELS”

En esta última categoría se incluyen los combustibles sintéticos que reemplazan a los combustibles tradicionales (Ramirez et al., 2020).. Son producidos utilizando tecnologías de captura de dióxido o monóxido de carbono e hidrógeno recogido de fuentes renovables, hidrógeno verde. Utiliza dióxido de carbono en su producción y emite la misma cantidad cuando es combustionado, por lo que tiene una baja huella de carbono.

Este tipo de combustibles tienen una alta densidad energética como el diésel o el petróleo, y además se pueden utilizar en motores existentes para su combustión. Sin embargo, es un proceso con un alto coste en la actualidad. Asimismo, para la producción de hidrógeno verde se necesitan fuentes renovables de energía, que en la actualidad son limitadas. Por último, este tipo de combustibles siguen emitiendo gases efecto invernadero como son los NO_x, CO, HC o micropartículas.

1.3 PRODUCCIÓN DE RESIDUOS

Los residuos son los elementos excedentes de actividades humanas que son tirados ya que su vida útil ha llegado a su fin o han sido desechados. Estos están creciendo en volumen y en complejidad, lo que está agravando las afecciones al ecosistema y a la salud. Medioambientalmente, los GEI asociados a los residuos asciende a un 3% del total (Eurostat, 2020).

En el mundo se generan 0,79 kilogramos de residuos por persona diariamente (The World Bank, 2022). La gestión del 90% de estos residuos, en países en vías de desarrollo, se realiza mediante la disposición en vertederos o la incineración. Como consecuencia, se genera una cantidad considerable de desechos que no se gestionan adecuadamente y pueden terminar contaminando diversos entornos naturales, como ríos, bosques y océanos.

En España la situación no es diferente y se produjeron 484,4kg de residuos por habitante en 2020, siendo un total de 105.624.400 toneladas en el año 2020, un 20,7% menos que en el año 2019. De ellos se llevaron a reciclaje una fracción del 54,7% (INE, 2022).

Los desechos son procesados en diversas instalaciones de tratamiento de residuos. Hay dos tipos de recogidas de residuos, selectiva o no selectiva (Elías Castells, 2012).

- En la recogida no selectiva todos los residuos son introducidos en el mismo contenedor, donde posteriormente, en la planta de tratamientos se llevarán a cabo diferentes procesos para tratarlos adecuadamente. Este TFM utilizará este tipo de residuo para la producción de biogás.
- En la recogida selectiva se separan los residuos dependiendo de su composición. En España en 2020 se recolectaron 5.084.072 toneladas en recogida selectiva (INE, 2022).

Gracias a las políticas municipales, regionales, nacionales y de la Unión Europea, estas prácticas son cada vez más estrictas y una mayor cantidad de residuos son coleccionados mediante recogida selectiva.

Desde la Unión Europea se ha multado a España por la mala gestión de sus residuos (vertido de aguas residuales, contaminación atmosférica, etc). Además, se denunció por haber 61 vertederos ilegales (Comisión Europea, 2015). Por lo tanto, las plantas de recogida selectiva se han vuelto un vector clave para el tratamiento de residuos y su posterior puesta en valor. En la actualidad, en España existen tres tipos de instalaciones para tratar los residuos (IGN, 2022):

- Plantas de Reciclaje -> se recogen materiales para reutilización y compostaje para crear abono orgánico. Además, en estas instalaciones puede haber plantas de revalorización, donde se pueden producir biocombustibles, como es el caso que se estudia en este TFM.

- Plantas Incineradoras -> se queman residuos en hornos para este efecto, produciendo calor reutilizable para la producción de energía eléctrica.
- Vertederos Controlados -> Los residuos se almacenan evitando que puedan ser perjudiciales para la salud.

2. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA

La producción de biogás en España es una práctica en crecimiento constante. Desde las instituciones se están promoviendo nuevas iniciativas para impulsar el uso de biogases, siguiendo con el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima. En la que se reunieron grandes empresas del sector gascico (Sedigas, Gasnam o AEBIG), del sector del biogás (AEAS) y del sector del hidrógeno (COAG) así como empresas (Naturgy y Enagás). Se recogieron los objetivos del sector en el documento “Hoja de Ruta del Biogás” (IDAE, 2007).

En general la producción de biogás se realiza mediante digestión anaerobia de productos orgánicos en ausencia de oxígeno. En estos procesos intervienen diferentes microorganismos que permiten reaccionar con la materia convirtiéndola en biogás (CH₄, CO₂ y otras partículas como vapor de agua y sulfuro de hidrógeno, aunque las últimas en menor medida) y digestato.

La producción de biogás está compuesta de cinco etapas fundamentales que se describirán en el apartado 2.2:

1. Recepción de la biomateria
2. Hidrólisis
3. Acidogénesis
4. Acetogénesis
5. Metanogénesis

No es necesaria la introducción de materias adicionales para la descomposición anaerobia. Los propios microorganismos son los que intervienen y son afectados por sus poblaciones. La composición del sustrato y las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla el

proceso serán esenciales para la producción del producto, el biogás. Estas condiciones han de ser estables a lo largo del proceso.

2.1 PARÁMETROS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

En general existen dos tipos de parámetros esenciales en el proyecto: los ambientales y los operacionales. Los ambientales son los que resultan de las particularidades de la materia prima como tal. Los operacionales son aquellos que son alterables a lo largo del proceso (Cedales Ladino & Jiménez Castellanos, 2014).

2.1.1 PARÁMETROS AMBIENTALES

Dependen de cuatro particularidades: el pH, el contenido en sólidos totales, los nutrientes y los inhibidores del proceso (Palau Estevan, 2016)

1. **pH:** Mide la acidez (0) o la alcalinidad (14) de un organismo, para el proceso de digestión anaerobia. El valor óptimo es de 7 (neutro) pese a poder operar en un rango de $\pm 0,5$. Si los valores descienden, es decir, si la mezcla es muy acida la velocidad del digestor disminuirá ya que se puede producir una inhibición micobacteriana.

En general la acidificación de la mezcla puede ser causada por la variación en las temperaturas, porque la mezcla no haya sido debidamente pretratada o por acopio de costra en el digestor.

2. **Contenido de sólidos totales (ST):** Afecta a la fermentación con metano de la biomasa, por lo que se generarían dos tipos de fermentación, en seco y húmedo. El H₂O no genera en sí biogás, pero es un factor clave para asegurar que el rendimiento del proceso sea correcto.

Por este motivo, los residuos más utilizados para la producción de biogás tienen alrededor de un 15% de sólidos totales.

3. **Nutrientes del producto:** Esenciales para que se produzca la digestión anaerobia sin necesidad de aditivos. El biorresiduo utilizado para la producción del biogás debe contener carbono y nitrógeno, estimándose una ratio óptima de 30/1.
4. **Inhibidores:** Elementos que no permiten que se produzca la fermentación metánica, por lo que resulta indispensable hacer un estudio profundo para prevenir posibles problemas.

2.1.2 PARÁMETROS OPERACIONALES

Recogen variables como la temperatura, el tiempo de retención y la VCO (velocidad de la carga orgánica), y la agitación. Estos parámetros son regulables en el proceso, sin embargo, para una correcta digestión anaerobia, es necesario que sean estables (Cedales Ladino & Jiménez Castellanos, 2014).

1. **Temperatura:** Es una variable fundamental que afecta de forma directa a velocidad de creación de ácidos y también al rendimiento del proceso. Cuanto mayor es la temperatura, más se aceleran las reacciones químicas y biológicas. Sin embargo, este parámetro afecta de forma negativa al consumo energético y a la estabilidad del proceso.

Se disponen tres rangos de temperatura resultando en diferentes eficiencias:

- **Psicrofílico:** En este proceso la digestión anaerobia se produce a temperaturas menores de 25°C, por lo que la velocidad de digestión es la menor. Fijando la variable de la temperatura a 25°C se obtiene el mejor rendimiento.
- **Mesofílico:** La digestión anaerobia en este caso se realiza entre unas temperaturas de 25°C y 45°C. El mayor rendimiento se obtendría entre los 33° y 38°C. En la actualidad, este es el proceso más utilizado en la industria para la producción de biogás.

- **Termofílico:** Este proceso requiere de las mayores temperaturas, entre 45 y 65°C. La temperatura óptima del proceso es alrededor de 60°C. Aunque el proceso sea más veloz, presenta un balance energético menor ya que se necesita energía para el control de las temperaturas y porque puede generar mayores problemas de control.
2. **Tiempo de retención hidráulico (TRH):** Es un parámetro que depende tanto de la tecnología usada como del sustrato. El sustrato hace posible que se desarrolle la población bacteriana cuanto mayor tiempo repose dentro del digestor, y por tanto se produzca biogás.

Este parámetro define el tiempo que está el sustrato dentro del digestor. Suelen ser escalas horarias o diarias. Ahora, el TRH de los digestores con un proceso de temperaturas mesófilo es de alrededor de un mes.

3. **VCO:** Mide el caudal mediante el cual se introduce la materia orgánica. Cuanto menor es el caudal, menor concentración de sustratos y por tanto mayor TRH. Sin embargo, un aumento del caudal provoca la disminución de producción de biogás
4. **Agitación:** Permite unificar todo el producto, que haya una mejor eficiencia y que el producto se genere de forma correcta evitando costras y espumas.

2.2 FASES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

En este apartado se estudiarán las diferentes etapas dentro de la producción del biogás y sus características principales.

El proceso de digestión anaerobia consta de cinco fases:

1. **Pretratamiento:** Preparación de los biorresiduos
2. **Hidrólisis:** Descomposición de los compuestos más grandes en moléculas más pequeñas
3. **Acidogénesis:** Transformación de los productos de la anterior en ácidos

4. Acetogénesis: Formación de moléculas acéticas
5. Metanogénesis: Transformación del producto en metano

2.2.1 RECEPCIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE LA BIOMATERIA

En esta etapa llega la materia recogida en la fracción resto. El producto que se utiliza en la digestión anaerobia es la materia orgánica, por lo que para prevenir fallos en los procesos de producción y obtener un digestato o un composte de alta calidad, hay que asegurarse que la mezcla esté libre de plásticos, cristales, papeles, metales, piedras o elementos demasiado voluminosos (Sikora, 2017).

Se elimina el líquido y se remueven aquellos elementos que supongan impurezas. La calidad del material es de vital importancia si el digestato se utiliza posteriormente para la agricultura, horticultura o para el paisajismo.

Es importante hacer una mezcla perfecta para garantizar que las condiciones sean estables y que se obtenga un biogás de la mejor calidad posible, y alargar de la mejor forma posible la vida útil de los diferentes equipos.

Para realizar la extracción de las impurezas, se han diseñado diferentes soluciones dependiendo de los organismos de los que este compuesta la biomateria. La eficiencia de cada método depende del equipo utilizado para tal efecto, la energía consumida y la cantidad de impurezas a separar. Junto a las impurezas, los compuestos orgánicos también son separados, y los productos sobrantes son desechados o incinerados, y por lo tanto no son utilizados para la producción de biogás.

El primer paso en la etapa de preparación suele consistir en tecnologías de desintegración y desempaqueado (Mudhoo, 2012). El objetivo es conseguir reducir los productos en partículas, para obtener un producto útil para el proceso de digestión anaerobia. Este proceso se puede realizar exprimiendo, cortando o triturando el material. Durante este proceso la

materia de poca densidad como los plásticos se pueden extraer. Se utilizan prensas y paletas para permitir que las partículas orgánicas mediante la presión ejercida y mediante la fuerza de una pantalla se liberen.

Para remover las impurezas de los elementos cuando son productos húmedos, eliminar impurezas reduce el tiempo de inactividad necesario para eliminar los sedimentos del digestor, abriéndolo y manteniendo un volumen de trabajo efectivo. Los materiales pesados como piedras, huesos y arena pueden ser eliminados mediante sedimentación en grandes contenedores, trampas o rejillas. Con el método de flotación y hundimiento, los materiales ligeros como los textiles o polímeros se quedan en la superficie pudiendo ser eliminados.

Es importante para obtener productos con alta pureza eliminar toda materia no deseada por lo que en este proceso los dispositivos tienen que estar diseñados para ello.

Para aquellas impurezas secas, como pueden ser elementos de gran tamaño como maderas y contaminantes físicos, las pantallas se usan para limpiar y preparar el compost preparado en una fracción de un tamaño determinado, dependiendo de la sensibilidad del digestor anaerobio. Las fracciones que son muy contaminantes no pueden ser usadas como fertilizante y deberán ser llevadas a otras plantas de tratamiento.

2.2.2 HIDRÓLISIS

La hidrólisis es la primera fase de la digestión anaerobia. Los productos orgánicos triturados mediante el proceso de tratamiento entran al proceso de hidrólisis. Mediante este proceso se toman los productos orgánicos de largas cadenas de polímeros como: polisacáridos, lípidos o proteínas y se descomponen en monómeros: azúcares, ácidos grasos y aminoácidos mediante microorganismos en un proceso de hidrólisis con el ambiente (Mudhoo, 2012). Este proceso es largo y en ocasiones limita el proceso de digestión anaerobia ya que los elementos se descomponen de manera pausada y parcial, llegando a alargarse el proceso varias semanas. Los procesos se pueden ver afectados por valores en el pH ácidos, por productos como el amonio o por subproductos del propio proceso de la hidrólisis.

La rapidez del proceso de la hidrólisis es proporcional a la temperatura. Además, este proceso se ve favorecido cuanto mayor materia prima haya. Mediante el proceso de pretratamiento, también se reduce la duración de la etapa. En este proceso hay tres grupos principales de organismos que forman parte en el proceso de digestión anaerobia: celulasas, glucosidasas y exocelulasas.

- Las celulasas son las encargadas de romper los enlaces glucosídicos 1,4- β internos de los polímeros para convertirlos en moléculas de menor tamaño.
- Las exocelulasas son aquellas que mediante la ruptura de enlaces 1,4- β , que previamente han sido minimizados por las endocelulasas, obteniendo tetrámeros o dímeros.
- Las celobiasas (β -glucosidasas) son aquellos microorganismos que producen la hidrólisis de los productos resultante del resto de procesos.

Las bacterias normalmente asociadas con la hidrólisis incluyen: *firmicutes* (*Clostridia*, *Bacilli*), *Bacteroidetes* y *Gammaproteobacteria* (Sikora, 2017).

2.2.3 ACIDOGÉNESIS

La siguiente etapa del proceso es la acidogénesis, que es un proceso de fermentación. Es la etapa más rápida en el proceso de producción de biogás. En esta etapa, el producto de hidrólisis, que son monosacáridos y aminoácidos se degradan en compuestos más sencillos. Se generan muchos ácidos grasos volátiles (ácido acético, butírico, valérico y propiónico), alcoholes, CO₂ y H₂.

Como se menciona en el apartado 2.1.1, el pH del proceso es uno de los factores más significativos en el proceso (Sikora, 2017). Cuanto más básico sea el pH (a partir de 5) mayor será la producción de los ácidos grasos volátiles. Sin embargo, si el pH es ácido (menor a 4) se puede producir una detención en el proceso de producción de biogás.

2.2.4 ACETOGÉNESIS

La siguiente fase en el proceso de producción de biogás es la acetogénesis. En esta fase se generan aceleraciones en la metabolización bacteriana, con transformación enzimática u otros compuestos derivados de lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos, produciéndose C_2 .

De los productos de la acidogénesis, los ácidos grasos volátiles son transformados en ácido acético, pudiendo ser generado mediante acetogénesis por hidrogenación, produciendo acetato, o acetogénesis por deshidrogenación, produciendo bacterias homoacetogénicas y bacterias sulfato reductoras (Corrales et al., 2015). Las últimas son anaerobias y pueden catalizar la producción de acetato mediante el H_2 y CO_2 . Para la reducción del CO_2 se utiliza la ruta del acetyl-CoA mediante organismos homoacetógenos. Esta ruta es también empleada por bacterias sulfatoreductoras y por los homoacetógenos durante la fermentación para producir acetato como producto final.

Existen tres grupos de sustratos para la producción de metano y tres tipos de vías metanogénicas:

- la separación del acetato
- la reducción mediante hidrógeno del CO_2 o la producción de diferentes alcoholes como el etanol
- la reducción de grupos metilo de compuestos metilados como metanol, aminas metiladas o sulfuros metilados (Corrales et al., 2015).

2.2.5 METANOGÉNESIS

La metanogénesis es la última etapa en la producción de biogás. En este estudio, se analizará también la revalorización de este biogás para la producción de biogás. Este proceso toma los productos de la etapa anterior, acetatos, hidrógeno y dióxido de carbono, transformándolos en metano, alrededor del 60%, y dióxido de carbono (Sikora, 2017). Se realiza mediante

dos tipos de microorganismos: los metanógenos acetotróficos y los metanógenos hidrogenotróficos. El sustrato de los primeros, metanógenos acetotróficos, es el acetato, los otros, los metanógenos hidrogenotróficos, usan el dióxido de carbono y el hidrógeno.

2.3 TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Una vez analizadas las diferentes etapas de la digestión anaerobia y sus diferentes características, en este apartado se estudiarán las diferentes tecnologías existentes para la producción de biogás y su posterior revalorización para producir biogás. La elección de tratamientos afectará de forma directa a las emisiones, al rendimiento y a la efectividad del proceso, en su conjunto.

2.3.1 TECNOLOGÍAS DE PRETRATAMIENTO

Como se ha mencionado en el apartado 2.2.1, se requieren pretratamientos para obtener un mejor rendimiento en el proceso de producción de biogás (Ackmez Mudhoo, 2012). Dependiendo del tipo de pretratamiento requerido existen cuatro tipos diferentes de tecnologías para esta función: mecánicos, biológicos, químicos y térmicos.

Si bien es cierto que los pretratamientos pueden mejorar la formación del biogás, también es importante tener en cuenta que en muchos casos conllevan un aumento en la demanda de materias primas, como químicos, así como de energía para generar electricidad o calor (Forster-Carneiro et al., 2012). Este aumento en la demanda de recursos puede tener un impacto negativo en el medio ambiente.

En general se determina que, dependiendo del sustrato utilizado para la producción de biogás, se tendrán unas características concretas en la digestión anaerobia. El objetivo de los pretratamientos es modificar la compleja estructura de los elementos complejos.

2.3.1.1 Pretratamiento mecánico

El pretratamiento mecánico es aplicado en la mayoría de las ocasiones previo a otros pretratamientos. Se refiere a la molienda, mediante la cual, se obtiene una partícula de menor tamaño. El modelo de pretratamiento mecánico consiste en desintegrar o triturar partículas sólidas de los sustratos permitiendo que los compuestos celulares se liberen y de esta manera aumentar el área superficial específica. Esto facilita el contacto entre el sustrato y las bacterias anaerobias por lo que mejora el proceso de digestión anaerobia.

Disminuyendo el tamaño de las partículas se permite una mayor producción de metano, compuesto principal del biogás (Forster-Carneiro et al., 2012).

- Reducción por tamaño: Esta operación se utiliza en procesos como en compostaje o como una parte de fracción recuperable. Hay diferentes formas de reducción de tamaño mediante molinos de martillos, trituradoras y trituradoras para el corte de tuberías. Estas tecnologías utilizan la gravedad para hacer pasar la materia por las diferentes moliendas para obtener el tamaño requerido para la producción anaerobia.
- Separación mediante tamaño: Este pretratamiento permite separar la materia por tamaño, separando la mezcla de materiales. Las tecnologías más utilizadas para esta función son las cribas vibratorias que son tecnologías de separación de una mezcla de materiales en dos o más partes utilizando una o más pantallas que separan a la materia. Las más utilizadas son las cribas vibratorias, las pantallas de tambor, trómel de cribado y las pantallas en discos. Esta tecnología permite clasificar los productos en las etapas de trituración para su uso en la digestión anaerobia.
- Separación mediante densidad: en esta tecnología de pretratamiento, la materia tiene dos componentes principales, la fracción ligera, con baja densidad y la fracción pesada, con una mayor densidad. Las tecnologías en estos pretratamientos permiten separar las materias por su diferencia de densidad. Las tecnologías usadas son la clasificación neumática, deshuesadores, flotación y separación en medios densos.

- Compactación: esta tecnología de pretratamiento mecánico tiene como objetivo principal el aumento de la eficacia en el almacenamiento y en el transporte de los materiales. Las tecnologías más implantadas son los compactadores estacionarios, equipos, envasado y paletizado.

2.3.1.2 Pretratamiento térmico

El pretratamiento térmico es una etapa que permite aumentar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia ya que en el proceso de hidrólisis térmica se favorece la solubilidad de los sustratos, esto produce una disminución en el volumen del digestor y favorece la producción de biogás (U.S National Institute of food and agriculture, 2019).

En procesos de digestión anaerobia la hidrólisis térmica puede ser aplicada antes del tratamiento con el objetivo de mejorar la degradación del sustrato. También puede ser utilizada como una forma de reducción de los sólidos. La energía térmica utilizada para este proceso puede ser recuperada para el calentamiento en el proceso de digestión anaerobia.

En general hay dos tipos de temperaturas para los procesos de pretratamientos, la mesofílica y la termofílica. La primera se da a una temperatura de entre 20 y 35°C donde los microorganismos principales son los mesofílicos. En la segunda, la termofílica, las temperaturas se elevan hasta 70°C y en estos procesos los microorganismos principales son los termofílicos.

2.3.1.3 Pretratamiento ultrasónico

Esta tecnología se basa en la aplicación de un ultrasonido de alta intensidad a un medio líquido que puede producir reacciones físicas y químicas las cuales pueden modificar significativamente la estructura del material presente en el líquido (Gerardi, 2003).

Los ultrasonidos se desplazan en forma de ondas con una intensidad y una frecuencia determinada. Para ser considerada como ultrasónico la frecuencia debe ser mayor a 20kHz

siendo esta la mayor frecuencia audible para un ser humano. La forma de las ondas de sonido provoca que la materia se comprima y se expanda, creando burbujas, de tal forma que se produzcan grandes cambios en las temperaturas y en las presiones. Para la eliminación de partículas de gran tamaño se utilizan frecuencias bajas, mientras que las frecuencias bajas se utilizan para elementos que requieren más delicadeza.

Para que este efecto funcione, es importante la intensidad de la onda, la amplitud, ya que mediante esta variable se provoca que las burbujas generadas implosionen. Sin embargo, hay otros factores como el medio, el volumen, la temperatura, la presión y el tipo de sustratos que también afectan al desarrollo del proceso.

Se han realizado varios estudios donde se demuestra que la aplicación de ultrasonidos como pretratamiento de diferentes tipos de residuos favorece la producción de metano y reduce significativamente los sólidos volátiles durante la producción de biogás mediante digestión anaerobia.

2.3.1.4 Pretratamiento químico

Los pretratamientos químicos son aquellos donde se añaden químicos a la materia para (Pantoja Matta et al., 2015). Las tecnologías más extendidas para realizar el pretratamiento químico son: pretratamientos alcalinos, procesos de solvación orgánica, oxidación húmeda, ozonolisis y procesos de hidrólisis ácida. Los procesos más utilizados para la digestión anaerobia son los pretratamientos alcalinos. Estos se basan en la incorporación de organismo alcalino que a temperaturas concretas reacciona con la materia. Entre los diferentes agentes se utilizan los siguientes: hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, hidróxido de magnesio e hidróxido de calcio.

Los procesos de solvación orgánica se basa en el uso de un disolvente orgánico (Hilal Ezgi Toraman, 2023). Cuando se añade el disolvente, las paredes celulares, ligninas, se disuelven, y mediante un posterior anti disolvente, como puede ser el agua acidificada, se aumenta el tamaño del poro de la pared celular.

La oxidación húmeda, degrada sustancias orgánicas en fase líquida mediante un oxidante. Este tipo de pretratamientos requiere de altas temperaturas de entre setenta y trescientos cincuenta grados centígrados, y altas presiones, de entre diez y doscientas atmosferas (Severo Ochoa & Gabriel Ovejero Escudero, 2021). Este proceso permite eliminar contaminantes ya que son totalmente oxidados.

2.3.1.5 Pretratamiento biológico

Este tipo de pretratamientos preparan el sustrato para la degradación de las enzimas (Ackmez Mudhoo, 2012). El resultado de este tratamiento depende mucho del tipo de sustrato usado, además dependiendo de este se usará un tipo determinado de hongo. Para este tipo de pretratamientos no se requiere mucha energía, ni químicos y tampoco condiciones ambientales estrictas, sin embargo, este tipo de pretratamientos tienen muy bajas eficiencias. El paso final de este pretratamiento define que la materia se ha de introducir en uno horno electrónico a 80°C durante dos días.

Por lo tanto, los pretratamientos biológicos necesarios para asegurar que la transformación se haya realizado, puede ser realizado mediante otro tipo de pretratamientos.

2.3.2 TIPOS DE BIODIGESTORES

Los biodigestores son los elementos en los cuales se produce la digestión anaerobia. En los digestores se favorece que todos los microorganismos actúen de tal forma que se realice una fermentación anaerobia, dando como productos biogás y productos lixiviados, los cuales pueden ser usados como fertilizante.

Hay dos tipos principales de digestores, de flujo continuo y de flujo discontinuo.

2.3.2.1 Biodigestor flujo o pistón

Este tipo de biodigestores son los utilizados en degradaciones con un contenido de sólidos altos, en muchas ocasiones, son este tipo de digestores los que se utilizan para el MOR (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019). Generalmente, estos sistemas se componen de estanques horizontales de concreto con cubiertas de geomembrana simples o dobles, diseñadas para recolectar el biogás. Estos estanques se conocen como sistemas de flujo pistón ya que el sustrato que se introduce es como un pistón o tapón, ya que es empujado por el sustrato que se añade después. En este tipo de digestores se procura que el digestato no queden estancos en la parte inferior del digestor y no se realizan muchas mezclas por lo que el digestato se mueve a lo largo del digestor como un pistón.

El contenido necesario de sólidos para la producción en digestores de flujo es de al menos un 10 o 15%, sin embargo, en muchos casos se recomienda que sean alimentados con un 20% (Gerardi, 2003).

2.3.2.2 Biodigestor de mezcla completa

Este tipo de digestores están ampliamente extendidos por la industria agrícola. Tienen forma cilíndrica y son herméticos de acero u hormigón armado (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019). Estas infraestructuras tienen incorporados unos agitadores que mezclan la materia de forma regular. Este tipo de tecnologías se emplea principalmente en el tratamiento de productos con un bajo contenido sólido, como purines o aguas residuales. En estos digestores, la materia cargada de microorganismos se mezcla y se calienta. El volumen de materia que entra es la misma que la que sale, resultando siempre en un mismo volumen de materia en el interior del digestor (Gerardi, 2003).

Para poder producir el biogás se garantiza que la materia permanezca dentro del digester de 20 a 30 días. Para procesos con pretratamiento termofilicos el tiempo dentro del digester puede ser menor. El digester puede ser continuamente mezclado u ocasionalmente, cuando entra la materia al digester y a veces entre alimentaciones. Los procesos se pueden llevar a cabo en diferentes tanques, por ejemplo, puede haber un tanque para la producción de ácidos y otro para la conversión de ácidos a biogás.

2.3.2.3 Biodigestores de laguna cubierta

Los biodigestores de laguna cubierta, impermeable, son una opción sencilla que se utiliza principalmente en el tratamiento de purines provenientes de la industria bovina (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019). Estos biodigestores consisten en lagunas o piscinas de gran profundidad, que están revestidas de manera hermética con geomembranas producidas mediante diferentes tipos de plásticos para evitar filtraciones (Gerardi, 2003). A diferencia de otros sistemas, los biodigestores de laguna cubierta no requieren calefacción ni agitación para su funcionamiento. Este sistema tiene la ventaja de que tiene un bajo mantenimiento.

En este tipo de sistemas se necesitan dos lagunas para su correcto funcionamiento, la primera, que está cubierta, y la segunda que no lo está. La laguna no solo sirve como un tratamiento, sino que también como almacenaje (Severo Ochoa & Gabriel Ovejero Escudero, 2021). El nivel del líquido del segundo almacenaje debe subir y bajar para crear almacenamiento. El nivel de la primera se mantiene constante para garantizar la descomposición de la materia.

Como no son calentados, la temperatura dentro de las lagunas depende de la climatología. Para que se pueda producir el metano de el biogás las temperaturas de las lagunas deben ser mayores a 20°C.

2.3.2.4 Biodigestor de reciclaje de sólidos

Este tipo de digestores se trata de un circuito cerrado, donde se devuelven algunos de los organismos que se encuentran activos al digesto, disminuyendo de esta manera el tiempo de digestión (Gerardi, 2003). Este tipo de procedimientos son más utilizados en los biodigestores de flujo o pistón (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019). Sin embargo, también se utilizan en biodigestores continuos, donde los sólidos se asientan en un clarificador externo y la suspensión rica en microbios se recicla nuevamente introduciéndola en el digestor.

2.3.2.5 Biodigestor de película fija

El digestor de película fija está formado por una columna llena de materiales como pueden ser astillas de madera o pequeñas partículas de plástico. Los microorganismos encargados de la producción del metano son capaces de desarrollarse en esos medios recubriéndolos y fomentando su desarrollo.

A continuación, la biomateria se introduce en el digestor haciendo que pase por las películas donde se forman los microorganismos (Gerardi, 2003). En este tipo de digestores el efluente es reciclado para mantener un flujo constante. Requieren de pretratamientos para disminuir el tamaño de las partículas sólidas sino se pueden acumular en el digestor. Los pretratamientos afectarán de forma directa al rendimiento del proceso.

La ventaja principal de los biodigestores de película fija es la reducción en el tiempo de digestión pudiendo ser inferiores a 5 días.

2.3.2.6 Biodigestores de medios suspendidos

Estos digestores se caracterizan por tener microbios suspendidos en un flujo ascendente constante de líquido (Gerardi, 2003). Este flujo permite eliminar las partículas pequeñas y

además hacen que las grandes permanezcan en el digestor. En estos biodigestores los microorganismos producen biopelículas alrededor de las partículas de mayor tamaño haciendo que los microorganismos encargados de la producción del biogás permanezcan en el digestor. El afluente es reciclado para tener un flujo ascendente constante y reducir el tiempo de digestión.

2.3.2.7 Digestor por lotes de secuenciación

Este tipo de digestores tienen cuatro fases diferentes, separadas por lotes (Gerardi, 2003). Los microorganismos que producen el metano se mantienen en el digestor mediante la sedimentación de sólidos y la decantación de líquidos.

El proceso tiene las siguientes fases:

1. Llenado: Alimentación del digestor.
2. Comienzo de la reacción.
3. Sedimentación de los sólidos de la biomateria.
4. Decantación: Extracción del efluente.

En este tipo de biodigestores, la producción de gas es casi continua ya que el proceso es repetido varias veces en una misma jornada.

3. COGENERACIÓN

La cogeneración consiste en la producción simultánea de calor y electricidad. En una planta de generación eléctrica general, el calor latente de la producción eléctrica es disipado al ambiente mediante torres de refrigeración o refrigerantes, mientras que en las plantas de cogeneración el calor producido es utilizado para el calentamiento de instalaciones o procesos.

Debido a las altas eficiencias que se consiguen con la cogeneración la Unión Europea está impulsando proyectos de cogeneración, como se define en la Directiva del Parlamento Europeo (DIR2012/27EU,2012) (IDAE, 2007).

Los principales parámetros de la cogeneración son:

- Eficiencia energética; la relación existente entre el trabajo generado, la energía producida y la energía consumida.
- El calor útil; es generado durante la cogeneración y puede ser utilizado en otros procesos.

Las plantas de cogeneración se clasifican de acuerdo con su capacidad como:

- Alta capacidad: > 50MW
- Capacidad media: 1-50MW
- Capacidad baja: < 1MW

En este estudio el combustible utilizado para la cogeneración es el biogás, por lo que las turbinas necesarias para la cogeneración son turbinas de gas. Los ciclos tienen dos tipos de diseño:

- Ciclo de cabeza: este tipo de instalaciones se diseña para cubrir la demanda eléctrica. Históricamente era el modo de diseño de estas plantas, sin embargo, puede llevar a disipar mucha de la energía producida, suponiendo un alto consumo del combustible.
- Ciclo de cola: este tipo de instalaciones se diseña para cubrir la demanda térmica. La eficiencia se maximiza ya que la electricidad producida puede ser vendida a la red si hay sobre producción.

3.1 CICLO DE GAS

La cogeneración en un ciclo de gas permite utilizar el trabajo producido en la turbina y aprovechar el calor disipado en la misma turbina., siguiendo el ciclo de Brayton. Mediante la cogeneración se permite obtener unos mayores rendimientos y dar uso a la producción de calor que de otra forma se perdería.

La función principal del ciclo de Brayton es la generación de trabajo que se puede utilizar para la producción de electricidad o movimiento mecánico.

A continuación, se presenta un ciclo de Brayton, Figura 2.

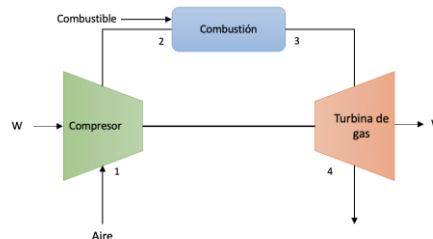


Figura 2. Funcionamiento de una turbina de gas

Fuente: elaboración propia

El ciclo comienza en un compresor donde el aire es comprimido a altas presiones (1-2) como se muestra en la Figura 3 (IDAE, 2007). Este aire pasa a una cámara de combustión donde se mezcla con el combustible (2-3) y sale con una elevada presión y temperatura a una turbina que produce trabajo y expulsa los gases a altas temperaturas (3-4). El trabajo generado es utilizado mayoritariamente en el compresor y el resto es utilizado para la generación eléctrica.

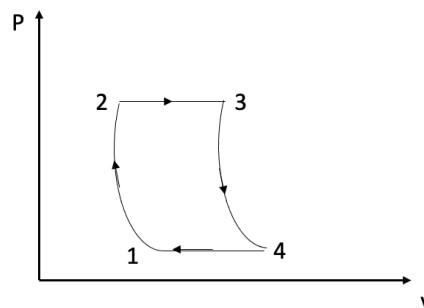


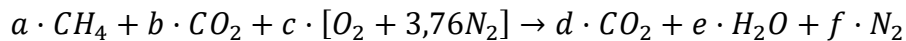
Figura 3. Ciclo de Brayton

Fuente: elaboración propia

3.2 PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS

El poder calorífico determina la energía que se puede extraer de un gas, este parámetro depende de su composición química. El biogás tiene una alta concentración de metano, que cuando se emite a la atmósfera tiene altos impactos ambientales, sin embargo, cuando es utilizado en combustión se reducen sus impactos. El metano, además tiene un alto poder calorífico por lo que, a una mayor concentración de metano en el biogás mayor energía.

El proceso de obtención de energía viene definido por la reacción estequiométrica con las composiciones del biogás.



Con la reacción ajustada se calculan las entalpías de combustión del biogás:

$$\bar{h}^{\circ}_{comb} = -n_{CH_4} \cdot \bar{h}^{\circ}_{fCH_4} - n_{CO_2} \cdot \bar{h}^{\circ}_{fCO_2} + n_{H_2O} \cdot \bar{h}^{\circ}_{fH_2O}$$

Donde:

\bar{h}°_{comb} : es la entalpía de combustión

$\bar{h}^{\circ}_{fCH_4}$: entalpía de formación del metano

$\bar{h}^{\circ}_{fCO_2}$: entalpía de formación del dióxido de carbono

$\bar{h}^{\circ}_{fH_2O}$: entalpía de formación del agua.

Para poder calcular los poderes caloríficos, superior (PCS) e inferior (PCI), se tiene en cuenta el estado en el que está el agua. Para el cálculo del poder calorífico superior se utilizará el agua en estado líquido y para el cálculo del poder calorífico inferior se utilizará el vapor de agua.

Con los poderes caloríficos calculados, se estima la cantidad de energía que se puede producir, en la planta de cogeneración (CHP). La cantidad de energía producida se calcula utilizando el PCI del biogás calculado. Además, se tiene en cuenta los rendimientos de la caldera utilizada, rendimiento eléctrico (η_e) y rendimiento térmico (η_t).

$$\dot{E} = \eta_E \cdot PCI \cdot \text{Cantidad de biogás}$$

$$\dot{V} = \eta_V \cdot PCI \cdot \text{Cantidad de biogás}$$

4. ESTADO DEL ARTE

Este apartado detalla el estado del arte de la generación del biogás, centrándose en el contexto de producción en España y analizando los estudios de ciclo de vida existentes en la literatura científica. Los Análisis de Ciclo de Vida en los que se basa este trabajo son los utilizados de manera extendida en Europa, en pro de una estandarización del estudio, ya que las políticas ambientales se están formalizando desde la Unión Europea.

4.1 CONTEXTO EN ESPAÑA

En el contexto actual de crisis energética y creciente preocupación por el calentamiento global, el enfoque en la búsqueda de soluciones de producción de energía a partir de fuentes renovables se ha vuelto central en la agenda política. Esta transición hacia una matriz energética más sostenible y respetuosa con el medio ambiente no solo busca reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles, sino que también persigue mitigar los impactos adversos asociados con su explotación y consumo. La Unión Europea para reforzar el cambio ha establecido objetivos en el Decreto 2018/2001/EU, que establece que al menos el 32% de la producción energética de cada país debe provenir de fuentes renovables para el año 2030 (European Commission, 2022). Esta política podría volverse aún más restrictiva, ya que la Unión Europea no descarta aumentar la proporción en el futuro. Se trata de un Decreto legalmente vinculante.

Dentro de este marco, el biogás se considera una fuente de energía renovable, ya que proviene de una fuente no fósil. El biogás es un vector energético que puede ser almacenado. En períodos en los que otras fuentes de energía renovable, como la energía solar, eólica o mareomotriz, no pueden ser utilizadas debido a condiciones meteorológicas adversas, el

biogás es una fuente estable de energía, convirtiéndolo en una opción atractiva para alcanzar los objetivos establecidos por la Unión Europea en términos de producción de energía renovable.

Debido a estas políticas, la producción de biogás está en aumento. En España se estableció en “La Hoja de Ruta del Biogás” que la producción de biogás se debía multiplicar x 3,8 para 2030. En la actualidad por cada millón de habitantes únicamente hay 4 plantas de biogás, situándose en una de las cifras más bajas de Europa. Se registraron en España en 2018 un total de 130 instalaciones de biogás de las cuales únicamente 46 producen biogás mediante residuos. Desde el Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico se definieron las siguientes medidas para el aumento de producción de biogás (Secretaría de Estado de Energía, 2021):

- Completar una inversión de 307 M€ para “promover la sostenibilidad y la competitividad de las actividades agrícolas y ganaderas en la agricultura de precisión, la eficiencia energética y la economía circular” (Secretaría de Estado de Energía, 2021).
- Completar para 2026 5.000 nuevos proyectos para el desarrollo de agricultura de precisión, eficiencia energética, economía circular y energías renovables.
- Aumentar la capacidad para 2026 en 3,8TWh mediante tecnologías renovables.
- Finalizar 30 proyectos aprobados por MITERD de “apoyo a la aplicación de la legislación sobre residuos y fomento de la economía circular en la empresa” (Secretaría de Estado de Energía, 2021).

Conseguir recoger al menos 30 % de los residuos mediante recogida selectiva para 2026. De esta manera se prevé que la producción de biogás para 2030 proporcionará 10,41TWh, además de reducir en 2,1MtonCO₂eq los impactos en el calentamiento global (Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico, 2022).

4.2 ESTUDIOS EXISTENTES

Es fundamental estudiar los impactos medioambientales de la integración de biogás como combustible renovable de cara a fomentar una implementación más extendida. Para evaluar correctamente los impactos medioambientales del biogás como combustible renovable, se requiere un análisis exhaustivo y documentado que tenga en cuenta el proceso de producción de biogás en cada una de sus etapas, así como la generación de residuos o subproductos, el uso de recursos naturales, además de efectos indirectos en el uso de la tierra y la biodiversidad. Para obtener dicha evaluación de los impactos, es recomendable consultar estudios científicos y técnicos, informes de evaluación de ciclo de vida (ACV) y fuentes confiables que analicen los aspectos ambientales de forma integral y objetiva.

Se han realizado diferentes estudios que permiten definir los impactos que suponen la producción de biogás mediante residuos. En la literatura existen multitud de estudios sobre la producción de biogás mediante purines, que es una práctica común en España, dado que el país cuenta con una importante industria agrícola y ganadera. Muchas de estas plantas utilizan la digestión anaerobia para procesar los purines y generar biogás, que luego se puede convertir en electricidad, calor o biometano.

Un estudio realizado en Europa compara las producciones de biogás mediante tres fuentes: maíz, hierba y estiércol animal (Hijazi et al., 2016). Este estudio determinó que el impacto del uso de los purines es muy reducido, debido a las emisiones evitadas por el buen tratamiento de estos residuos, sin embargo, no se obtienen mejoras en la acidificación y en la eutrofización. Se determinó también que, en la producción de biogás con maíz, cuando este es cultivado para este uso, los impactos generados son mayores, aunque pueda reducir las emisiones de efecto invernadero y agotamiento abiótico, se obtienen mayores emisiones en acidificación, eutrofización y uso de las tierras.

En (Esteves et al., 2019) se revisa la producción de biogás mediante estiércol alrededor del mundo. Este estudio determinó que el estiércol tiene un rendimiento de producción bajo. Por

ese motivo, se determinó que la mezcla del estiércol con otros sustratos orgánicos permitiría producir más biogás, aunque aumentarían los impactos. Además, este ACV determinó que, en los países con mayores recursos, los residuos son más beneficiosos para la producción de biogás que en otras regiones.

El biometano puede ser producido con un upgrading del biogás, como ventajas, este puede ser inyectado a la red gasista o utilizado como combustible para vehículos. Existen por tanto estudios medioambientales de la producción de biometano mediante biogás. Por ejemplo, un estudio comparaba los impactos ambientales y económicos de las tecnologías más utilizadas para la producción de biometano, mediante biogás de la fracción orgánica del residuo, para determinar cuál de las tecnologías es más beneficiosa para la producción de biometano (Ardolino et al., 2021). Los procesos con menores impactos, en este orden, son los de separación mediante membranas, lavado, absorción química y adsorción mediante la oscilación de presión. Sin embargo, este estudio, concluye que no todos los procesos son válidos en todas las situaciones, por lo que la evaluación ambiental no puede ser utilizada como criterio único para la toma de decisiones.

En este TFM el estudio que se realiza es la producción de biogás mediante Materia Orgánica Residual, de la cual se han encontrado diferentes estudios. Se realizó un estudio en California que comparó la composición del biogás producido mediante diferentes fuentes: mediante estiércol, mediante residuos alimenticios y el último mediante residuo urbano (Li et al., 2019). El estudio concluía con que el biogás producido mediante estiércol, a pesar de tener menos químicos la combustión, resultaba más tóxica. En el biogás producido mediante residuos alimenticios la cantidad de azufre era mayor. Mientras que el biogás producido mediante residuo urbano contenía altos números de hidrocarburos aromáticos.

En Reino Unido, un ACV realizado sobre sostenibilidad ambiental de la producción de biogás mediante residuo urbano. Este estudio determinó que mediante la revalorización del residuo se evitaban 39kgCO₂e por cada tonelada de residuo (Slorach et al., 2019). Además, de una recuperación de 2GJ por tonelada tratada, ya que la electricidad es inyectada a la red.

Sin embargo, este estudio también determinó que la huella en eutrofización terrestre y marina y acidificación terrestre es mayor.

En Italia se llevó a cabo un ACV donde se evaluó la sostenibilidad ambiental de 18 configuraciones de digestión anaerobia (DA) mediante la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Municipales (FORS). El residuo se estudió en tres composiciones de Sustrato-Inóculo (S:I) (1:2, 1:1 y 2:1) y se dejó en el digestor durante tres tiempos diferentes (0, 5 y 10 días). El estudio determinó que al aumentar tanto la relación S:I como el tiempo de incubación (5 y 10 días), los impactos ambientales disminuyeron. Los valores más bajos de Cambio Climático se lograron con la digestión anaerobia realizada durante 10 días con una relación S:I de 2:1. Esta configuración tuvo un impacto de 28,67kgCO₂eq en digestores con pretratamiento (Demichelis et al., 2022).

En Suecia un estudio parecido al de Reino Unido (Slorach et al., 2019), comparó los datos de la producción de biogás mediante residuo urbano frente a la quema en antorcha, todo referido al consumo anual de una vivienda. En este proceso se tuvieron en cuenta tanto el transporte de los residuos hasta el vertedero, como cada uno de los procesos propios de esta planta de digestión anaerobia. Este estudio concluyó que en comparación con las fuentes de energía fósiles actuales, el biogás era más beneficioso para ser productor de electricidad y para ser utilizado como combustible en el sector automovilístico, con un upgrading a biometano. Los resultados determinaron que, en materia de calentamiento global, la incineración suponía 2,6 kgCO₂eq por vivienda al año, mientras que la producción de biogás supondría una reducción de 5,6 kgCO₂eq anuales.

En un estudio realizado para una planta localizada en China, estudió los impactos de la producción de biogás mediante una tonelada de desechos sólidos. En este estudio se estimó que un 47,76% de la energía consumida se realizaba en los procesos de pretratamiento y la digestión anaerobia, un 31,3% en el control de contaminación y un 20,94% en el reciclaje. Además, se determinó que los residuos con mayores contenidos grasos disminuyen el consumo energético y el impacto ambiental.

En general, los estudios existentes hasta la fecha han obtenido resultados positivos en cuanto a la tecnología del biogás. Se ha demostrado que la producción y utilización de biogás tienen numerosos beneficios ambientales. Sin embargo, el presente estudio que se va a realizar tiene como objetivo abordar el estudio para una planta específica y una composición de residuo determinadas. Mediante el trabajo se busca profundizar en aspectos específicos de la producción de biogás en sus diferentes etapas.

Es importante destacar que este estudio se llevará a cabo siguiendo rigurosos estándares metodológicos, siguiendo la metodología ACV y las directrices marcadas por la UE para el cálculo de emisiones. Los resultados obtenidos buscan contribuir al conocimiento de la producción de biogás para así poder buscar formas de reducir los impactos ambientales.

5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La importancia de la protección medioambiental ha aumentado la necesidad de generar herramientas para conocer el impacto real que un producto genera en diferentes espectros del medioambiente.

De esta manera, surge el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que es una técnica utilizada para cuantificar el impacto medioambiental de un producto desde la materia prima hasta su disposición al final de su vida útil (de la cuna a la tumba). Se basa en las normas ISO 14040 y 14044 que definen las diferentes características de los ACV (Klüppel, 2005).

Los análisis de ciclo de vida pueden ser utilizados para encontrar oportunidades de mejora medioambiental a lo largo de la vida de un producto, regulación por parte de los gobiernos a las empresas dedicadas a la producción, marketing y la selección de indicadores de desarrollo medioambiental.

5.1 FASES DEL ACV

El Análisis de Ciclo de Vida se realiza de acuerdo a una estructura de fases específica. De esta manera, este estudio tiene cuatro fases definidas para su realización (ISO, 2006) :

- i. Definición del objetivo y el alcance
- ii. Análisis del inventario
- iii. Evaluación del impacto ambiental
- iv. Fase de interpretación

- **Fase 1: Definición del objetivo y el alcance:** Define los límites del sistema para asegurar que existe una consistencia a lo largo del estudio.

El ACV modela la producción de un bien, por lo que es importante simplificar los sistemas y que no haya muchas distorsiones en el estudio. La mejor manera de realizar esto es definiendo de forma detallada el objetivo y el alcance del ACV. Estos describirán las decisiones más significativas y permitirán generar límites. Estos últimos definen que entra dentro del análisis y que datos no pueden ser procesados.

- **Fase 2: Análisis del inventario:** Estudia en cada una de las fases de producción cuales son los inputs y cuáles son los outputs para comprender los flujos de elementos a lo largo de la vida del producto (Laura Golsteijn, 2022). Esto permite tener una imagen completa del inventario del análisis de ciclo de vida, cuyo objetivo es recoger la información más relevante para poder modelizarla de la manera adecuada.
- **Fase 3: Evaluación del impacto ambiental:** Se realizan las conclusiones que permiten tomar decisiones respecto al producto o el proceso. Se clasifican los impactos, según la metodología CLM, del Centro de Estudios Medioambientales en la Universidad de Leiden, Países Bajos, de todos los procesos modelados en la fase de inventario y se traducen a diferentes categorías de impacto.

Estas categorías son las siguientes (Antón Vallejo, 2011):

- Cambio climático
- Toxicidad humana
- Ecotoxicidad acuática marina
- Acidificación
- Agotamiento abiótico
- Destrucción de la capa de ozono
- Ecotoxicidad agua dulce
- Formación de ozono fotoquímico
- Eutrofización
- Ecotoxicidad terrestre

- Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)
- **Fase 4: Interpretación:** Se comprueba que las conclusiones tomadas están contrastadas. Para ello se utiliza la ISO 14044 que describe diferentes características y procedimientos que permiten realizar mejores conclusiones.

5.2 FASE 1: DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo de este TFM es el estudio de los impactos que tiene este método de producción de biogás y su combustión en una planta de cogeneración. Los datos se han tomado de la planta de biometanización de La Paloma, que forma parte del Parque Tecnológico Valdemingómez, en Madrid. Esta planta toma los residuos de la fracción resto, que está compuesta por una mezcla de productos orgánicos de bolsas de restos, limpieza, actividades comerciales, ayuntamientos y podas.

El tratamiento de la fracción resto sigue las siguientes etapas recogidas en la Figura 4:

1. Pretratamiento, en esta etapa la fracción resto se procesa para separar la materia orgánica (MOR) de los productos no orgánicos de la fracción resto, la cual se llevará a vertedero. Además, en esta fase se reduce el tamaño de la MOR para favorecer la formación de biogás en la fase de digestión. Para ello, las tecnologías utilizadas en la planta de biometanización de La Paloma son: un trómel, un pulpo, un molino triturador, unas cribas, un separador balístico y un imán ferromagnético.
2. Digestión anaerobia, la MOR es llevada a un digestor húmedo de flujo continuo de volumen 3600m³. El régimen de operación es en condiciones mesofílicas (40°C) y con agitación constante. Tras la digestión se producen dos productos: el biogás y el digestato. El digestato es posteriormente utilizado como compost y el biogás es llevado a la planta de combustión.

3. Combustión en planta de cogeneración, en este proceso se utiliza el biogás producido en la fase de digestión anaerobia en un motor de gas para la producción combinada de calor y electricidad. El motor tiene una potencia 1MW_e , operando con rendimientos eléctrico de 35% y térmico de 40%.

El ACV estudiará los impactos siguiendo la metodología de categorías de impacto europea CLM versión CLM-IA baseline 3.09, Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden, y con el uso de la herramienta de análisis de ciclo de vida Simapro 9.4.0.2 utilizando la base de datos de Ecoinvent v.3.8, utilizando la biblioteca de “allocation, cut-off by classification” (Wernet et al., 2016).

Se define como unidad funcional 1m^3 de biogás producido mediante MOR, esta cantidad de biogás produce $5,8\text{kWh}$, divididos, con los rendimientos en $2,32\text{kWh}_t$ y $2,02\text{kWh}_e$. Esto se ha realizado así ya que un producto del sistema y además permite un análisis adecuado de los impactos que se producen (Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022).

Para realizar el análisis se compararán los impactos generados mediante la cogeneración con 1m^3 de biogás, y la producción de la misma cantidad de energía térmica y eléctrica mediante, consumo de gas natural para el calor y energía de la red eléctrica de media tensión en España, para la electricidad. Asimismo, se tomarán los datos de los impactos producidos por el consumo de gas natural y de electricidad de la red de la base de datos de Ecoinvent.

Para el análisis se asumen los siguientes límites en el sistema:

- No entra dentro del estudio el transporte de los residuos a la Planta Tecnológica de Valdemingómez.
- No se tienen en cuenta los reprocesamientos.
- No se tiene en cuenta el transporte dentro de la planta.
- Los impactos generados en la fase de producción se asignan en su totalidad a la materia orgánica residual.

- En la fase de digestión anaerobia, los impactos se asignan respecto a los precios de los productos generados.
- No se tiene en cuenta los tratamientos realizados al digestato tras la digestión anaerobia.
- Se consideran los impactos de la construcción de las infraestructuras de los procesos de la digestión anaerobia y de la cogeneración.
- La energía utilizada en los procesos es autoconsumida.
- La energía térmica sobrante es utilizada en diferentes instalaciones del PTV. Se suponen pérdidas en el transporte.
- La electricidad sobrante es inyectada a la Red Eléctrica de Media Tensión, teniendo en cuenta pérdidas.

En la Figura 4 se ilustran los diferentes flujos y procesos desarrollados en la planta de La Paloma.

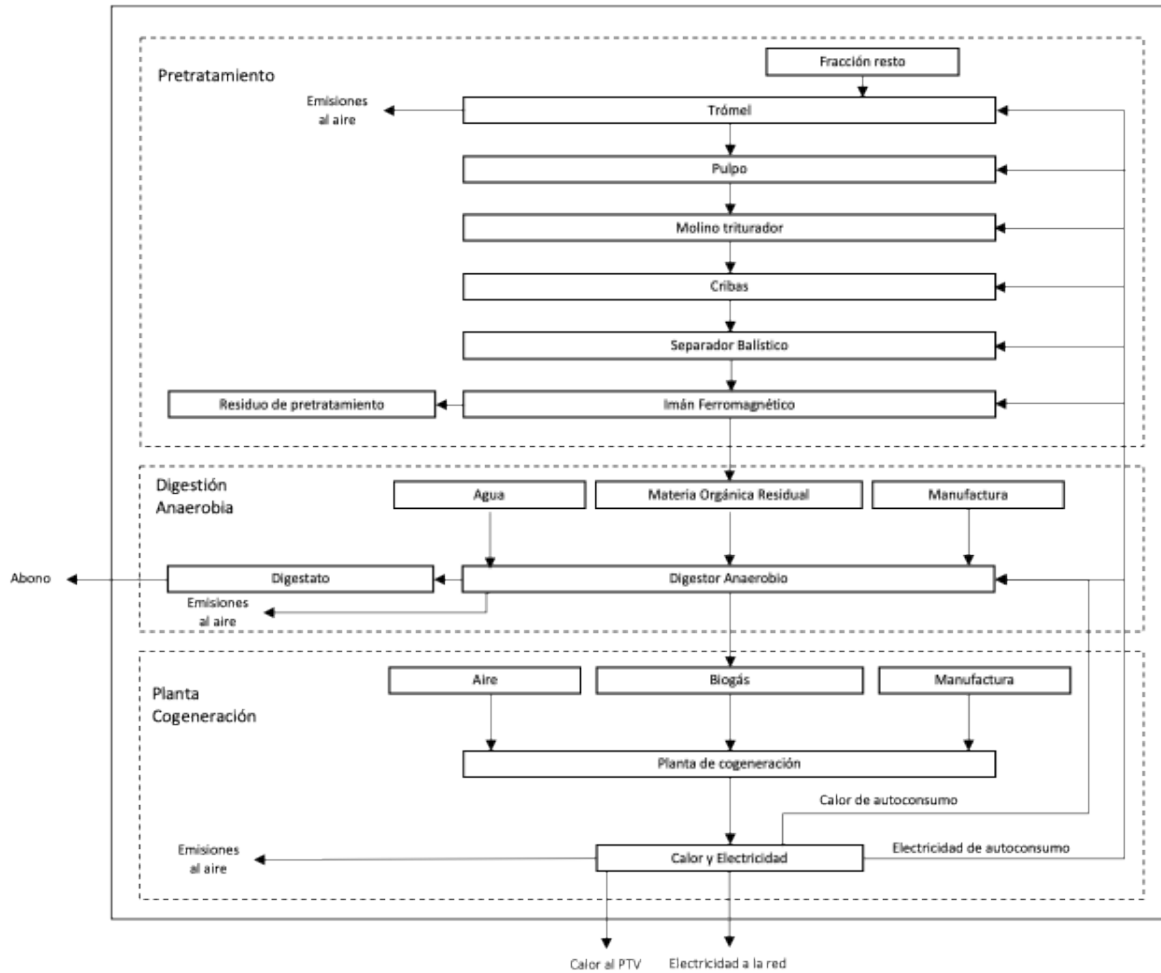


Figura 4. Fases de tratamiento de la fracción resto.

Fuente: Elaboración propia.

5.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS DATOS

Para la interpretación de los datos se usará la metodología europea CML, que es un modelo que permite la caracterización de los impactos de ciclo de vida. El método CML se basa en la teoría del análisis del ciclo de vida, que considera las entradas y salidas de materiales y energía en cada etapa del ciclo de vida del producto. Utiliza datos empíricos y modelos para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero, contaminantes atmosféricos, consumo de recursos naturales, generación de residuos, entre otros impactos ambientales. Para ello se ha utilizado la versión CLM_IA-baseline 3.09.

El método CML proporciona una serie de factores de emisión y de impacto ambiental específicos para diferentes categorías de impacto.

1. Agotamiento abiótico
2. Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)
3. Calentamiento global
4. Agotamiento de la capa de ozono
5. Toxicidad humana
6. Ecotoxicidad terrestre
7. Ecotoxicidad marina
8. Ecotoxicidad agua dulce
9. Oxidación fotoquímica
10. Acidificación
11. Eutrofización

Estos factores se utilizan para calcular las emisiones y los impactos ambientales totales asociados a un producto o sistema.

5.4 FASE 2: ANÁLISIS DE INVENTARIO

Para la realización de este ACV se toman los datos de los procesos realizados, a la fracción resto, en la planta de biometanización de La Paloma, en el parque tecnológico de Valdemingómez. Esta planta recoge los residuos de la fracción resto de Madrid, Arganda del Rey, Rivas-Vaciamadrid y Mancomunidad de Este. En 2021 llegaron a la planta 208.550,61 toneladas de la fracción de residuo. En 2021 los residuos recogidos estuvieron compuestos por los diferentes elementos indicados en la Tabla 1, por tonelada.

Tabla 1. Componentes de 1 tonelada de residuos de la fracción resto en el año 2021

Fuente: (elaboración propia)

<i>Tipo de Resto</i>	<i>Masa (kg)</i>	<i>Humedad (%)</i>	<i>Material volátil (%)</i>	<i>Sólido total (%)</i>
<i>Textiles</i>	98	9,8	64,68	23,52
<i>Celulosas</i>	88	0,18	84,3	3,52
<i>Papel/cartón</i>	122	12,44	92,6	16,96
<i>Plásticos y EELL</i>	170	0,34	162,86	6,8
<i>Restos de poda y jardín</i>	51	30,6	15,3	5,1
<i>Otros restos+ ferro</i>	115	2,3	0	0
<i>MO</i>	300	210	64,2	25,8
<i>Vidrio</i>	56	1,12	0	0

La composición química de los fracción resto está definida por el tipo de elementos que componen la mezcla. En 2021 en la planta de La Paloma los residuos tenían las siguientes características químicas mostradas en la Tabla 2 (Universidad Tecnológica Ecotec, 2021).

Tabla 2. Composición química de los residuos de la fracción resto en el año 2021

Fuente: elaboración propia a partir de (Universidad Tecnológica Ecotec, 2021)

Resto	C (%)	H (%)	O(%)	N(%)	S(%)
<i>Textiles</i>	48	6,4	40	2,2	0,2
<i>Celulosas</i>	60	7,2	22,8		
<i>Papel/cartón</i>	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2
<i>Plásticos</i>	60	7,2	22,8		
<i>EELL</i>	60	7,2	22,8		
<i>Restos de poda y jardín</i>	46	6,4	40	2,2	0,2
<i>Otros restos+ ferro</i>	4,2	0,6	4,3		
<i>MO</i>	48	6,4	37,6	2,6	0,4
<i>Vidrio</i>	0,5	0,1	0,4		

Resultando en una composición de la fracción residuos con las características por tonelada de fracción resto descritas en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición del residuo de la fracción resto

Fuente: elaboración propia a partir de (Universidad Tecnológica Ecotec, 2021)

<i>Fracción Resto</i>	
<i>Humedad (%)</i>	26,68
<i>Material Volátil (%)</i>	48,39
<i>Sólido total (%)</i>	8,71
<i>C (%)</i>	42,74
<i>H (%)</i>	5,51
<i>O(%)</i>	29,04
<i>N(%)</i>	1,14
<i>S(%)</i>	<1

5.4.1 FASE DE PRETRATAMIENTO

En la fase de pretratamiento, la fracción residuo es tratada en la planta de La Paloma para recuperar la materia orgánica residual (MOR) y poderla llevar a digestión anaerobia. Después, para favorecer la producción de biogás se requiere una reducción en el tamaño de la MOR. Para realizar ambas tareas, se realizan pretratamientos de molino triturador, cribas, separador balístico, trómel e imán ferromagnético, para asegurar que el digesto es del tamaño adecuado y que se han eliminado los elementos inorgánicos (Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022).

Para la producción de 1Nm³ de biogás se requieren 12,8kg de fracción resto. Por lo que las demandas eléctricas para cada uno de los procesos llevados a cabo en esta etapa son los definidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Demanda energética fase de pretratamiento

Fuente: elaboración propia.

Proceso	Cantidad	Unidades	Cita
Trómel	6,5	Wh/Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)
Pulpo	2,58	Wh/ Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)
Molino triturador	194	Wh/ Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)
Cribas	6,45	Wh/ Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)
Separador Balístico	25,4	Wh/ Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)
Imán ferromagnético	30,3	Wh/ Nm ³ de biogás	(Combs, 2011)

Tras los procesos de pretratamiento, la MOR, que es el 38% (4,9kg), se lleva a digestión y el resto de los residuos, que son el 62% (8kg) (Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022), se llevan a vertedero. Como se indica en el alcance, no se tienen en cuenta los procesos realizados al residuo tras el pretratamiento.

5.4.1.1 Emisiones en el pretratamiento

Las emisiones en pretratamiento son producidas por el almacenamiento de la fracción resto. En este caso, las principales emisiones son el amoníaco, el metano y el CO₂ biogénico. El CO₂ biogénico no se tiene en cuenta en los impactos, puesto a que se trata de un CO₂ de origen natural y se establece que las emisiones pueden ser absorbidas por la fauna. El metano producido es recogido por lo que no se tiene en cuenta en este proceso.

Los productos nitrogenados tienen un gran impacto medioambiental. La emisión en el pretratamiento es el amoníaco fugitivo, cuyo impacto viene definido por (Ramírez García et al., 2019) para la unidad funcional como:

$$E_{NH_3} = AR_{alimentación} \cdot \sum EF_{NH_3-Ni} \cdot \frac{17}{14}$$

Donde:

- E_{NH_3} : son las emisiones anuales de amoníaco (calculado se obtiene un valor de 0,16 g/Nm³).
- $AR_{alimentación}$: es la cantidad de nitrógeno en la alimentación, este valor se saca del porcentaje de amoníaco en la fracción resto respecto a la unidad funcional (14,7 g).
- $\sum EF_{NH_3-Ni}$: es el sumatorio de los parámetros que generan el amoníaco fugitivo, estos datos se sacan de la EEA. En este caso se determina que tiene un valor de 0,009.

5.4.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA

Tras los procesos de pretratamiento, la MOR (4,9 kg) es llevada a el proceso de digestión anaerobia. Para favorecer la formación de biogás se introduce agua (2,45 kg) al digester para corregir la humedad de la mezcla (Banks et al., 2011). La digestión anaerobia se realiza en un digester de flujo continuo con agitación constante y en condiciones mesofílicas (40°C), para favorecer la formación de microorganismos. Por esta razón hay una demanda constante térmica (406,86Wh/Nm³ biogás) (Slorach et al., 2019) y eléctrica (112,72Wh/Nm³ biogás)

(Slorach et al., 2019). En este proceso se genera biogás (1Nm³) y digestato (2,7 kg), que será utilizado como compost (Banks et al., 2011).

El biogás producido en la digestión anaerobia tiene la composición definida por (Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022) como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición del biogás producido con MOR.

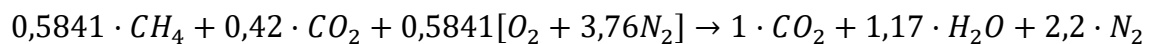
Fuente: elaboración propia.

Sustancia	%	Cantidad	Unidades
CH ₄	58,41	0,5841	Nm ³
NO ₂	2,5	0,025	Nm ³
CO ₂	39	0,39	Nm ³

Cabe mencionar que los impactos generados en la fase de pretratamiento son agregados a los impactos de las etapas posteriores.

5.4.2.1 Poder Calorífico del biogás de La Paloma

Con la composición del biogás de la planta de La Paloma se obtiene la siguiente reacción estequiométrica:



Con la reacción ajustada se calculan las entalpías de combustión del biogás:

$$\bar{h}^{\circ}_{comb} = -n_{CH_4} \cdot \bar{h}^{\circ}_{fCH_4} - n_{CO_2} \cdot \bar{h}^{\circ}_{fCO_2}$$

Donde:

\bar{h}°_{comb} : es la entalpía de combustión cuyo resultado es de -186152,67 KJ/mol.

n_{CH_4} : la fracción molar de metano que como se establece en la reacción estequiométrica es 0,5841 mol.

$\bar{h}^{\circ}_{fCH_4}$: entalpía de formación del metano este valor es un dato (-74800KJ/mol).

$\bar{h}^{\circ}_{fCO_2}$: entalpía de formación del dióxido de carbono (-393500KJ/mol).

n_{CO_2} : se trata de la fracción molar del dióxido de carbono, que según la reacción estequiométrica es 0,42 mol.

Una vez obtenida la entalpía de combustión se calcula el poder calorífico, que es la cantidad de energía emitida de una sustancia en su combustión, en esta caso del biogás de MOR. Y ésta depende de la entalpía de las diferentes moléculas que lo componen.

$$PC = \bar{h}^{\circ}_{comb} + n_{H_2O} \cdot \bar{h}^{\circ}_{fH_2O}$$

Donde:

PC: poder calorífico (en el estudio se utiliza el PCI, pero se han calculado los dos)

\bar{h}°_{comb} : es la entalpía de combustión, obtenida de la ecuación anterior.

n_{H_2O} : la fracción molar del agua 1,17.

$\bar{h}^{\circ}_{fH_2O}$: entalpía de formación del agua, este valor depende del estado de esta, por lo que para el cálculo del poder calorífico superior se utilizará el agua en estado líquido cuyo valor es (-285830KJ/mol) y para el cálculo del poder calorífico inferior se utilizará el vapor de agua (-241820KJ/mol).

De esta manera se obtienen los poderes caloríficos del biogás producido en la planta de La Paloma mediante MOR, ilustrados en la Tabla 6. Estos como se establece en la ecuación del poder calorífico, dependen de la entalpía de formación del agua y de la composición molecular del biogás. Para este análisis se utilizará el PCI para los cálculos.

Tabla 6. Poder Calorífico en la planta de La Paloma.

Fuente: elaboración propia.

Poder calorífico en La Paloma

PCS	6,45	kWh/Nm ³
PCI	5,81	kWh/Nm ³

5.4.2.2 Emisiones en la digestión anaerobia

Las emisiones en la digestión anaerobia dependen de las pérdidas en el digestor y de la composición del biogás. Por una parte, las pérdidas en el digestor se estiman en un 2% (Slorach et al., 2019). Por otra parte, en este estudio el biogás tiene la composición de la Tabla 7 según (Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez, 2022).

Tabla 7. Composición del biogás en la digestión anaerobia.

Fuente: elaboración propia

Sustancia	%
CH ₄	58,41
NO ₂	2,5
CO ₂ biogénico	39

Con la cantidad de cada sustancia en el gas, el volumen del gas producido y las pérdidas se calcula la cantidad de una sustancia a la atmósfera, donde los valores se muestran en la Tabla 8.

$$Q_{gas} = Q_{biogás} \cdot f \cdot \rho_{gas} \cdot l$$

Donde:

- Q_{gas} : cantidad de un gas que se produce (m^3)
- $Q_{biogás}$: cantidad de biogás que se produce ($1Nm^3$)
- f : fracción del gas que contiene el biogás (%), determinado en la Tabla 7.
- ρ : densidad del gas (kg/m^3) (PRTR, 2023).
- L : las pérdidas en el digestor, que son un 2%.

Tabla 8. Perdidas de biogás a la atmosfera.respecto a la unidad funcional $1Nm^3$

Fuente: elaboración propia.

<i>Sustancia</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidades</i>
<i>CH₄ biogénico</i>	<i>7,17</i>	<i>g/Nm³</i>
<i>NO₂</i>	<i>0,63</i>	<i>g/Nm³</i>
<i>CO₂ biogénico</i>	<i>15,4</i>	<i>g/Nm³</i>

5.4.2.2.1 Asignación de cargas en la digestión anaerobia

La digestión anaerobia produce diferentes impactos en las 11 categorías estudiadas. En este proceso, como se menciona en apartados anteriores se produce biogás y digestato. La producción de ambos productos tiene un impacto medioambiental, pero para determinar cuáles son los impactos asociados a cada uno de los productos generados se debe hacer una asignación de las cargas. Esta asignación de cargas se va a realizar de manera proporcional a los precios de cada uno de los productos generados en el proceso.

El biogás tiene un precio en el mercado fijado por su PCI de entre 30 y 40€/MWh (Feliu & Flotats, 2020). Se fija este precio en 35€/MWh del PCI del biogás ya que se trata de un biogás crudo y sin refinar. El poder calorífico del biogás es de 5,8kWh/Nm³ como se ha calculado en el apartado 5.4.2.1, de esta manera el biogás producido con MOR de la fracción resto tiene un precio respecto a la unidad funcional de 0,203€/Nm³.

Por otra parte, el precio del digestato fluctúa entre 25 y 45€/ton (Nutriman, 2023) dependiendo de los tratamientos a los que haya sido sometido el digestato. En esta caso, se trata de un digestato al que no se le ha realizado ningún tratamiento por lo que se determina que el precio de este producto es el menor, es decir 25€/ton. La cantidad de digestato producido en el digestor respecto a la unidad funcional es de 2,7kg, por lo que el precio del producto respecto a la unidad funcional es de 0,0675€/Nm³.

Con la asignación de precios determinada se hace una distribución de impactos atendiendo a los cálculos realizados. De esta manera se establece que el 75% de los impactos se asignan al biogás y el 25% al digestato.

5.4.3 COGENERACIÓN

El biogás producido en la digestión anaerobia (1Nm³) es llevado a la planta de cogeneración. En esta planta el biogás se combustiona, junto a aire comprimido, tenido en cuenta en los rendimientos del proceso, para la producción simultánea de calor y electricidad. La cantidad de energía que puede producir el biogás depende del PCI y de las condiciones de la caldera. El biogás producido mediante MOR tiene un PCI de 5,8kWh/Nm³, y la cogeneración tiene un rendimiento eléctrico de 35% y un rendimiento térmico del 40%, (Murphy et al., 2004). Con estos valores se calcula la producción eléctrica y térmica del biogás en la planta de cogeneración.

Esto se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{E} = \eta_E \cdot PCI \cdot \text{Cantidad de biogás} = 0,35 \cdot 5,80 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \cdot 1 \text{Nm}^3 = 2,02 \text{kWh}_e$$

$$\dot{V} = \eta_V \cdot PCI \cdot \text{Cantidad de biogás} = 0,4 \cdot 5,80 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \cdot 1 \text{Nm}^3 = 2,32 \text{kWh}_t$$

Donde:

\dot{E} es la energía eléctrica producida en la cogeneración (kWh_e)

\dot{V} es la energía térmica producida en la cogeneración (kWh_t)

η_e es el rendimiento eléctrico (%)

η_t es el rendimiento térmico (%)

PCI: es el poder calorífico inferior $\frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3}$

Cantidad de biogás (Nm³)

Tras la cogeneración, el calor producido es utilizado en el Parque Tecnológico de Valdemingómez, donde se asumen unas pérdidas del 2% en el transporte (Kimming et al., 2011). La electricidad es inyectada a la red eléctrica de media tensión donde se asumen unas pérdidas del 3% (Red Eléctrica, 2023).

1.1.1 Emisiones de la cogeneración

En la combustión se generan emisiones de gases a la atmósfera por la combustión de 1Nm³ de biogás. Asimismo, se recogen los valores de emisiones producidas en la planta de cogeneración en la Tabla 9.

Tabla 9. Factores de Emisión de biogás en plantas de cogeneración.

Referencia: Elaboración propia con datos de (Sistema Español de Inventario, 2014)

Factores de emisión biogás

Componente		Unidades
NO _x	1,254	g/Nm ³
COVNM	0,052	g/Nm ³
CH ₄ biogénico	0,052	g/Nm ³
CO ₂ biogénico	0,272	g/Nm ³
N ₂ O	0	g/Nm ³
PM _{2,5}	0,0366	g/Nm ³

5.4.3.1.1 Asignación de cargas en la cogeneración

De manera similar a la distribución de impacto por precio realizada en el apartado de la digestión anaerobia, la asignación económica en la cogeneración se calcula mediante el precio de la electricidad y del calor.

En España en julio de 2023 el precio medio de la electricidad fue de 92,14€/MWh (Omnie, 2023). Por lo que, teniendo en cuenta que con la unidad funcional se producen 2,02kWh_e el precio resultante de la electricidad es de 20,27cént€/Nm³.

Por otra parte, para el calor producido se toman los precios del gas natural ya que es la fuente principal de calor en la industria. En julio de 2023 el precio del gas natural se estableció en 29,16€/MWh (Mibgas, 2023). Como se determina anteriormente la producción de calor es de 2,32kWh para la unidad funcional. Con estos valores se obtiene un precio del calor de 2,7cént€/Nm³ de calor.

Tras el cálculo de los precios del calor y la electricidad se asignan los impactos respectivamente. De esta manera, se establece que el 75% de los impactos son de la electricidad y el restante 25% de calor.

5.4.4 IMPACTOS DE LAS INFRAESTRUCTURAS

En este proyecto también se tiene en cuenta la construcción de las instalaciones para la ejecución de los procesos de digestión anaerobia, proceso de lixiviados y planta de cogeneración.

La planta de digestión anaerobia elegida en el Software Simapro, no es de la misma capacidad que la de la planta de La Paloma, de esta manera se define en la literatura un sistema para escalar a los valores de la planta (Vázquez-Rowe et al., 2015).

$$E_2 = E_1 \cdot \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{0,6}$$

Donde:

E_2 : Impacto de la planta de mayor capacidad.

E_1 : Impacto de la planta de menor capacidad, sacado de Simapro.

C_2 : Capacidad de la planta de mayor capacidad, que es la de la planta de La Paloma, y tiene una capacidad de 108.175 toneladas/año.

C_1 : Capacidad de la planta de menor capacidad, que es la planta diseñada en Simapro que tiene una capacidad de 10.000 toneladas/año.

De esta manera el valor de los impactos de la planta de La Paloma será:

$$E_2 = E_1 \cdot 4,17$$

Para la cogeneración se toma un sistema ya existente en Simapro, con potencia eléctrica de 1MW ya que es la potencia eléctrica que se tiene en la planta de La Paloma (Tecnología y Recursos de la Tierra, S. A., 2023).

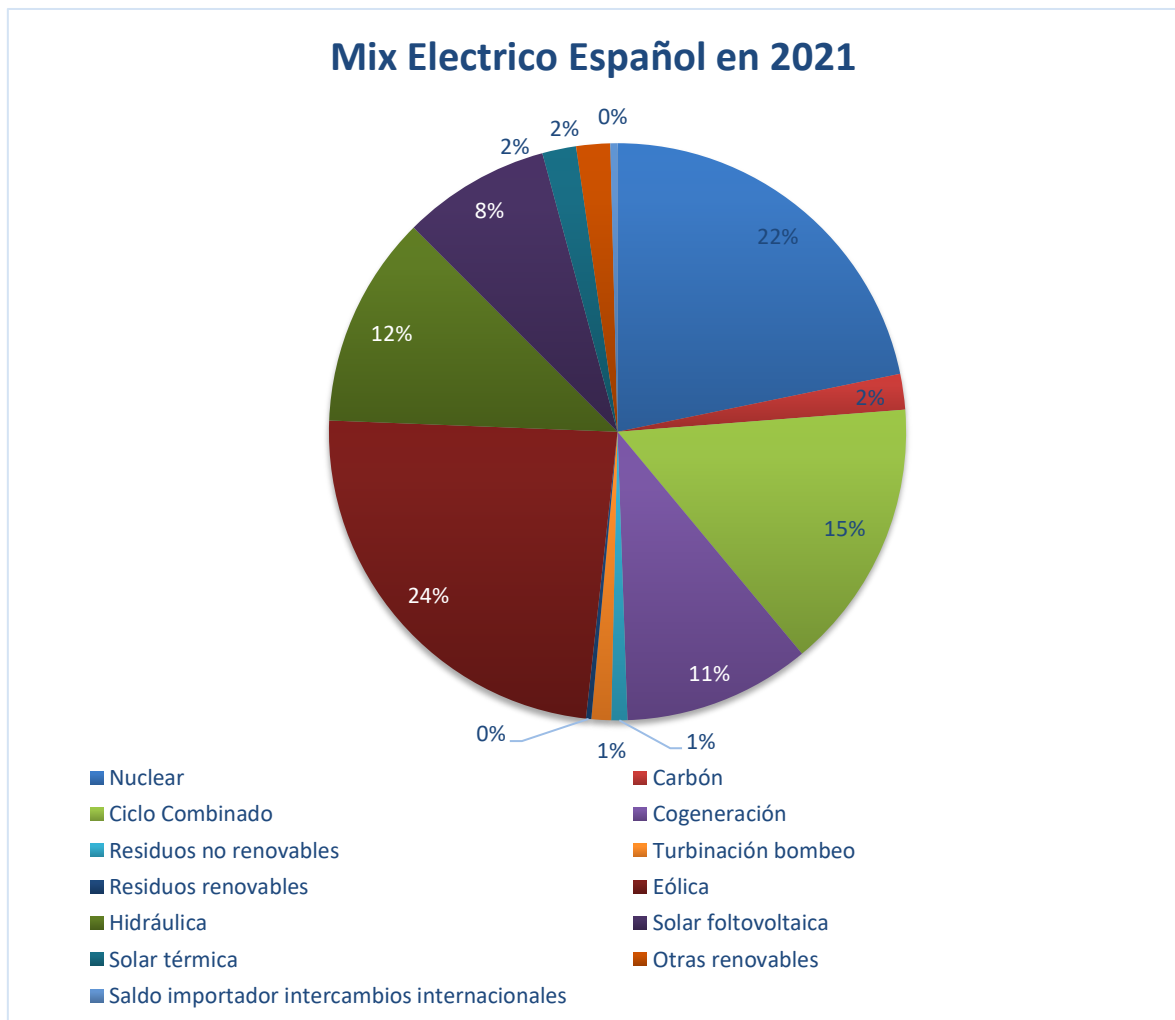
5.4.5 ELECTRICIDAD Y CALOR

Como se menciona en el apartado de objetivos y alcance, se va a hacer una comparativa entre la cogeneración con biogás y la producción de calor con gas natural y electricidad de la red eléctrica de media tensión. Para la producción de calor con gas natural y de electricidad de la red eléctrica se toma los datos de la base de datos de Ecoinvent 3 allocation cut-off con procesos unitarios.

Para la producción de calor, se toma una central a pequeña escala de gas natural en Europa excluyendo Suiza. Y se produce $1,87\text{kWh}_t$, que es la producción térmica que se genera con la unidad funcional en el proceso de cogeneración con biogás restando los consumos y las pérdidas. Para la electricidad se toma la del mix eléctrico español en media tensión calculados con datos de 2021, y se consume $1,59\text{kWh}_e$. El mix está generado por las fuentes indicadas en la Figura 5.

Figura 5. Mix eléctrico español de media tensión.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Redeia, 2022).



6. EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES

En este apartado se recogen los resultados obtenidos en el Análisis de Ciclo de Vida de producción de biogás mediante materia orgánica residual de la fracción resto de la planta de La Paloma y su combustión en una caldera de cogeneración.

En primer lugar, se definirán los impactos de cada una de las etapas de producción de calor y electricidad mediante biogás producido con MOR. Tras este estudio se compararán los impactos de los productos finales, calor y electricidad con la producción de calor mediante gas natural y electricidad de la red eléctrica de media tensión

Se han seleccionado estos dos escenarios para poder contrastar los impactos producidos mediante la producción de biogás, respecto al escenario de generación tradicional de combustibles fósiles.

6.1 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE CALOR Y ELECTRICIDAD MEDIANTE BIOGÁS

A la fase de pretratamiento llega la fracción resto de la recogida de residuos. Esta materia es almacenada en la planta sin ser tratada y produce emisiones de metano y amoníaco en el almacenamiento. Para estos procesos se autoconsume la electricidad demandada, de esta manera cuantos menores impactos totales produzca el proceso, menores impactos tendrá la electricidad utilizada.

En el proceso de digestión anaerobia se autoconsume electricidad y calor, del proceso de cogeneración. Por otra parte, se generan impactos por las fugas del biogás producido en el digestor, por la construcción de la infraestructura, que se toma de la base de datos de Ecoinvent, y también la MOR introducida en el digestor tiene impactos de los procesos anteriores.

En el último proceso, la cogeneración, se tiene en cuenta el aire y biogás consumido y la infraestructura utilizada, la cual se saca de la base de datos de Ecoinvent. De este proceso se genera energía en forma de calor y electricidad, además de emisiones.

La herramienta proporciona datos incrementales de las emisiones que se producen en las diferentes etapas. Para hacer un análisis específico de los impactos de cada etapa se han sustraído de cada uno de los procesos los impactos de etapas anteriores, de esta manera, se puede comparar de forma individual y exacta los impactos generados en cada una de las etapas.

En la Figura 6 se detalla la contribución en cada categoría, los impactos que se producen por las emisiones de gases, (emisiones pretratamiento (azul oscuro), electricidad en el pretratamiento (azul claro), las emisiones en el digestión anaerobio (verde oscuro), consumo eléctrico en la digestión (verde claro), consumo de calor en la digestión (gris) y las emisiones en la cogeneración (morado oscuro)), y también por las infraestructuras (digestor anaerobio (amarillo) y planta de cogeneración (morado claro)). Esta gráfica permite identificar para cada uno de los impactos aquellos procesos que son más perjudiciales, de esta manera se podrán tomar decisiones para la disminución de los impactos.

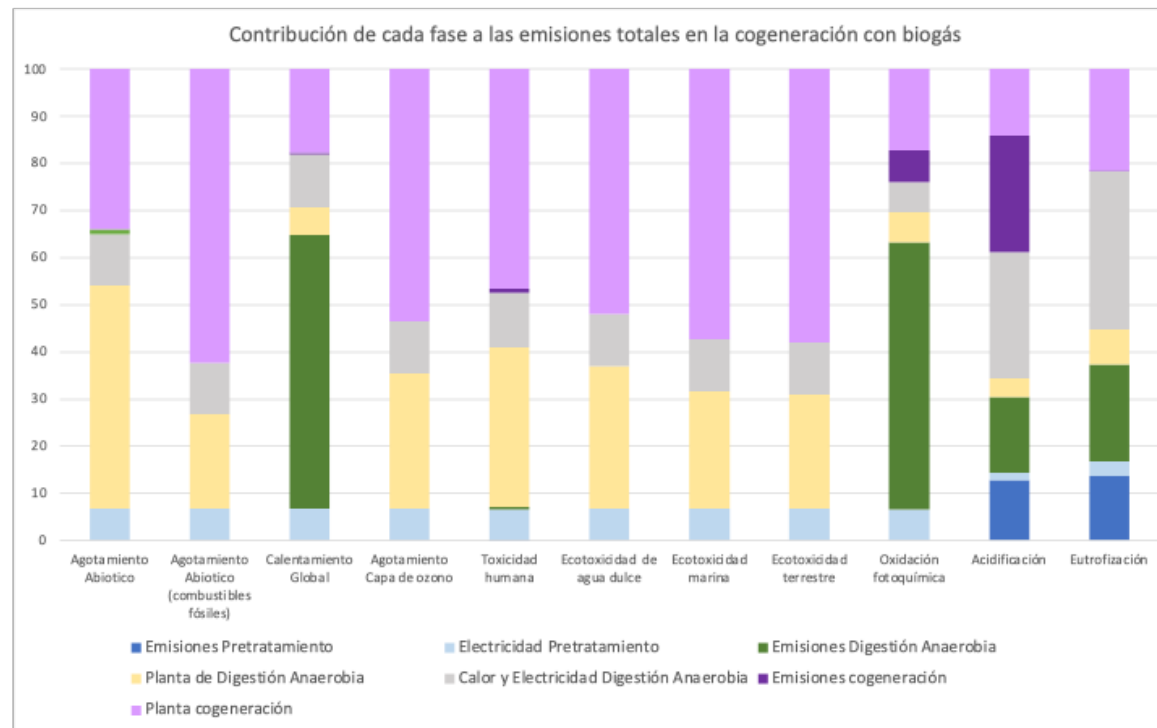


Figura 6. Contribución de cada fase a las emisiones totales en la cogeneración con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se explica cada una de las categorías de impacto que se producen en las diferentes etapas de generación energética.

- El agotamiento abiótico es el consumo de materias primas. En la fase de pretratamiento no se consume ninguna materia prima, pero existen emisiones por la electricidad consumida (7%), mientras que en las fases de digestión y de cogeneración se distribuyen los impactos generados del agotamiento como se muestra en la Figura 7. La planta de digestión requiere más infraestructura y materias primas que la de cogeneración, esto es debido al tamaño de las infraestructuras necesarias.

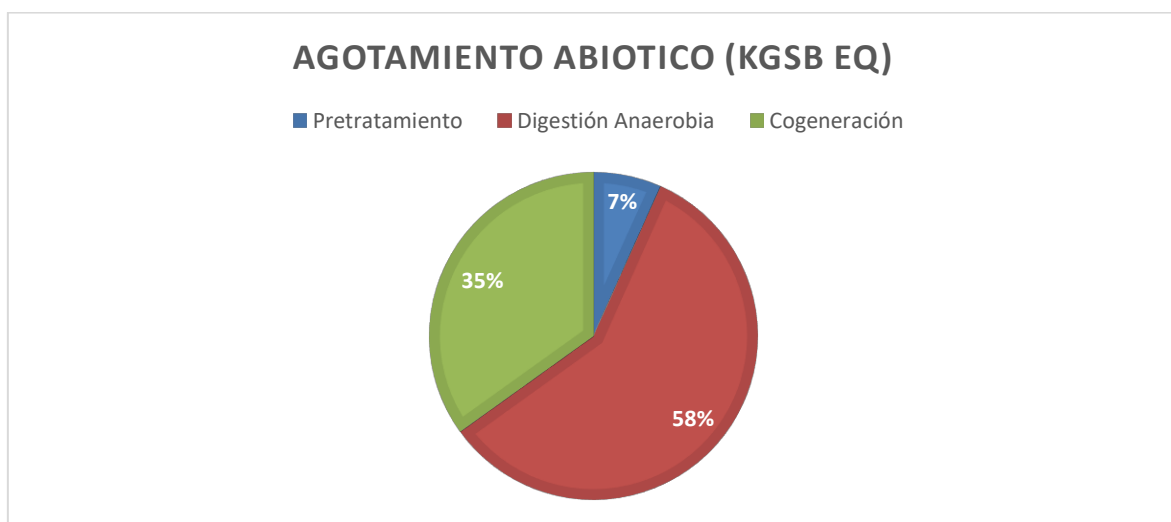


Figura 7. Agotamiento abiótico en la producción energética con biogás de MOR

Fuente: elaboración propia

- El agotamiento abiótico de los combustibles fósiles depende también de la construcción de las infraestructuras puesto que el resto de los consumos energéticos son abastecidos por la producción energética en la fase de cogeneración, como se indica en la Figura 8. En esta categoría de impacto, la fase con mayor impacto es la

de cogeneración. Esto es así porque en la construcción se utilizó más energía fósil que en la construcción de la planta.

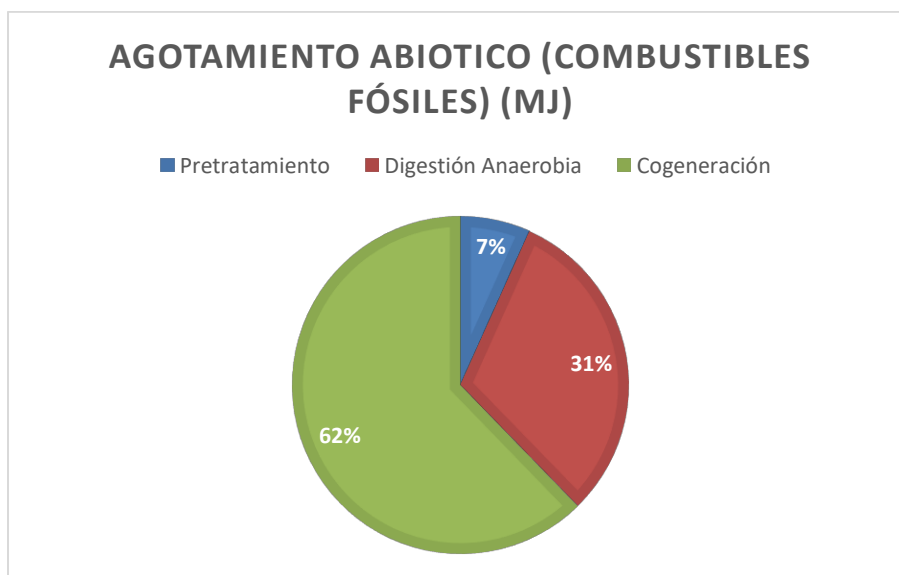


Figura 8. Agotamiento abiótico (combustibles fósiles) en la producción energética con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia

- El impacto de calentamiento global es mayor en el proceso de digestión anaerobia, como se ilustra en la Figura 9, esto se debe a las pérdidas fugitivas en el digestor del biogás en crudo, que suponen un 75% de las emisiones totales, a pesar de ser únicamente un 2% de pérdidas. El biogás tiene un 58,41% de metano y un 2,5% de dióxido de nitrógeno, el metano tiene un alto impacto en esta categoría, sin embargo, el NO₂ apenas produce impactos en esta categoría. Sin embargo, en la fase de cogeneración no hay tantos impactos provocados por las emisiones de gases, los impactos se producen en la fabricación de las infraestructuras. Esto se debe a que el metano cuando se combustiona se convierte en CO₂ que en este proceso es biogénico, por lo que no tiene impactos. Cabe destacar que al autoconsumir la energía los impactos generados en el proceso repercutirán en los impactos de cada una de las

categorías, y en este caso, el consumo energético supone un 17,86% de los impactos de esta categoría.

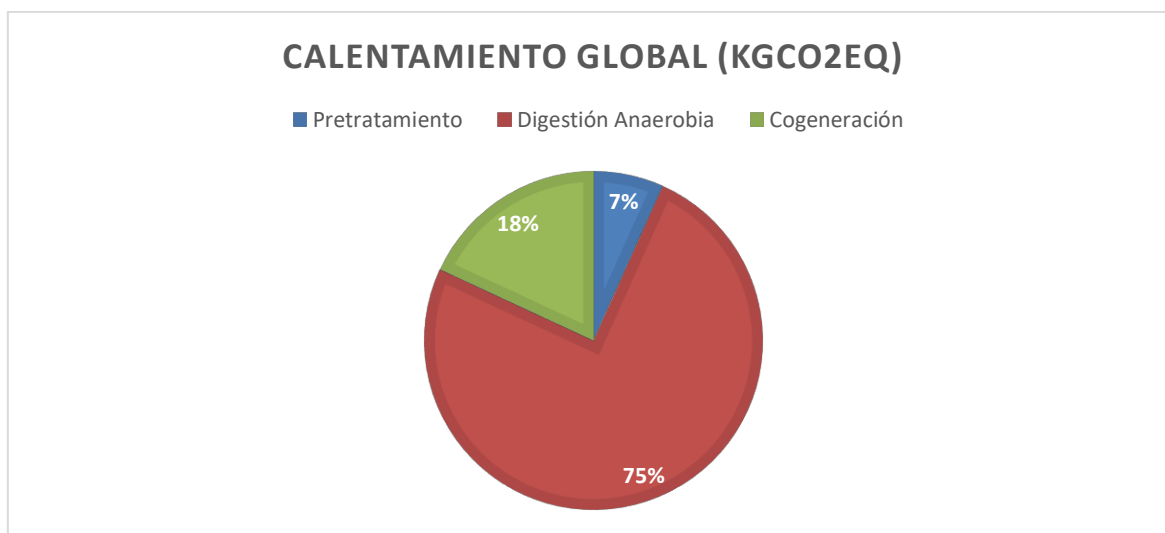


Figura 9. Calentamiento global en la producción energética con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia

- El agotamiento de la capa de ozono se da, mayoritariamente, en las etapas de digestión anaerobia y cogeneración. En la fase de pretratamiento sólo aplica en esta categoría de impacto la electricidad consumida en esta etapa. En las otras dos fases se producen mayores impactos en la cogeneración, 53% y un 40% en digestión anaerobia, como se indica en la Figura 10. Analizando los impactos se observa que 82% de los impactos generados en esta categoría se producen por la construcción de las diferentes infraestructuras, y el restante 18% por el consumo energético.

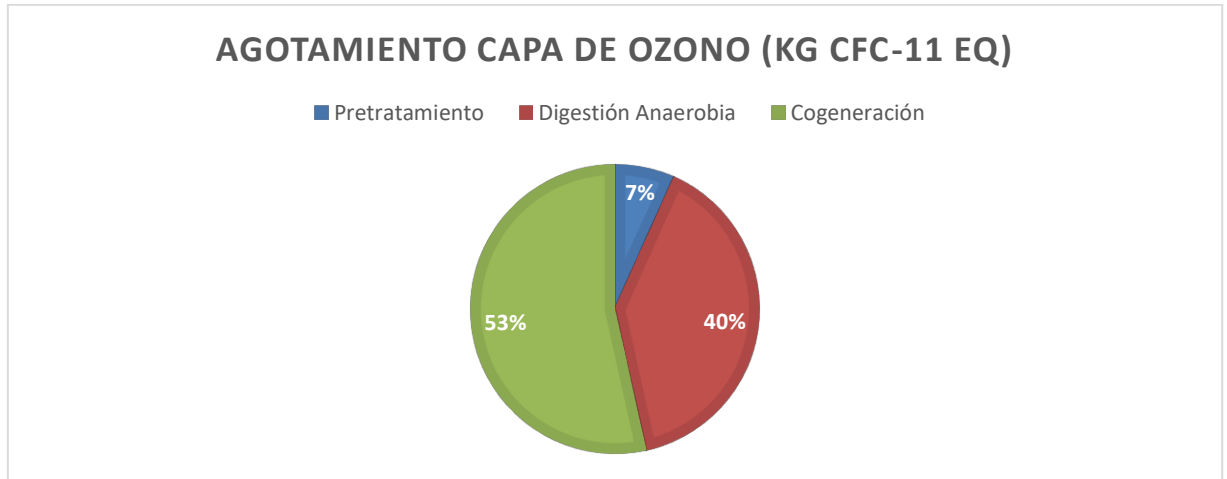


Figura 10. Agotamiento de la capa de ozono en la producción energética con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia

- La toxicidad humana tiene mayores valores en las etapas de cogeneración (47%) y de digestión anaerobia (46%), como se indica en la Figura 11. En todas las etapas se generan impactos de toxicidad, sin embargo, los más importantes se deben a las construcciones de las infraestructuras, en general, supone un 80,5% de los impactos en esta categoría.

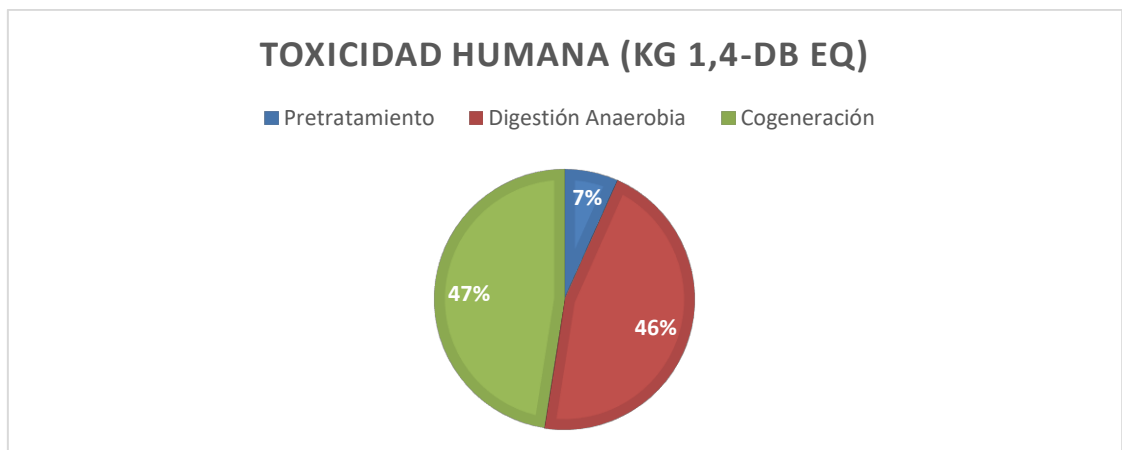


Figura 11. Toxicidad humana en la producción energética con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia

- En las categorías de ecotoxicidad de agua dulce (Figura 12), ecotoxicidad de agua marina (Figura 13) y ecotoxicidad terrestre (Figura 14), los impactos generados son producidos por la construcción de las infraestructuras (82% en todas), y por el consumo energético (18% en todas), aunque en menor medida. En estas categorías el mayor impacto se produce por la fabricación de la infraestructura de la cogeneración, que suponen (ecotoxicidad agua dulce 52%, ecotoxicidad marina 57,4%, ecotoxicidad terrestre 57,98%) siendo así superior a la de la digestión anaerobia (ecotoxicidad agua dulce 30,21%, ecotoxicidad marina 24,9% y ecotoxicidad terrestre 24,3%).

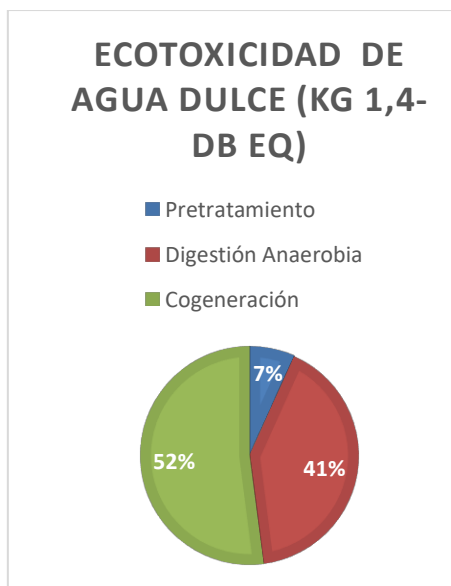


Figura 12. Ecotoxicidad acuática agua dulce en la producción energética con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia

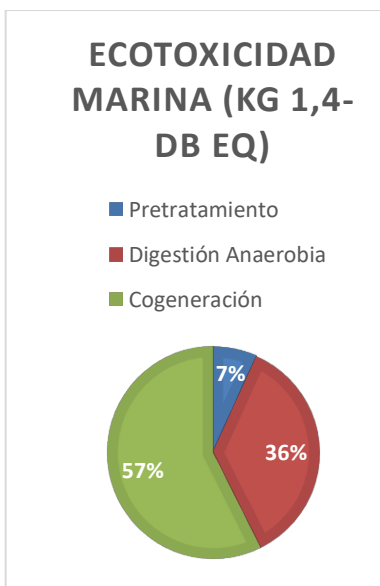


Figura 13. Ecotoxicidad marina en la producción energética con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia

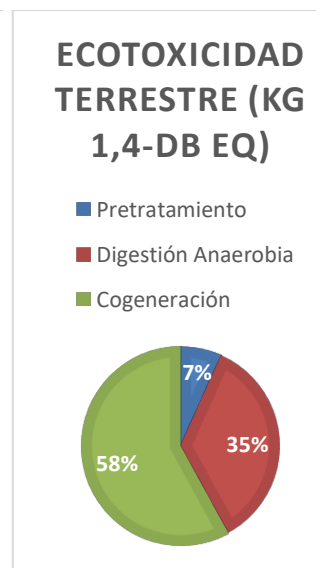


Figura 14. Ecotoxicidad terrestre en la producción energética con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia

- El 69% de la oxidación fotoquímica se produce en la fase de digestión anaerobia, como se indica en la Figura 15. De los impactos totales producidos, el 63,23% son debidos a las emisiones de los gases, distribuidos en un 56,57% en la fase de digestión anaerobia y un 6,75% en la fase de cogeneración.

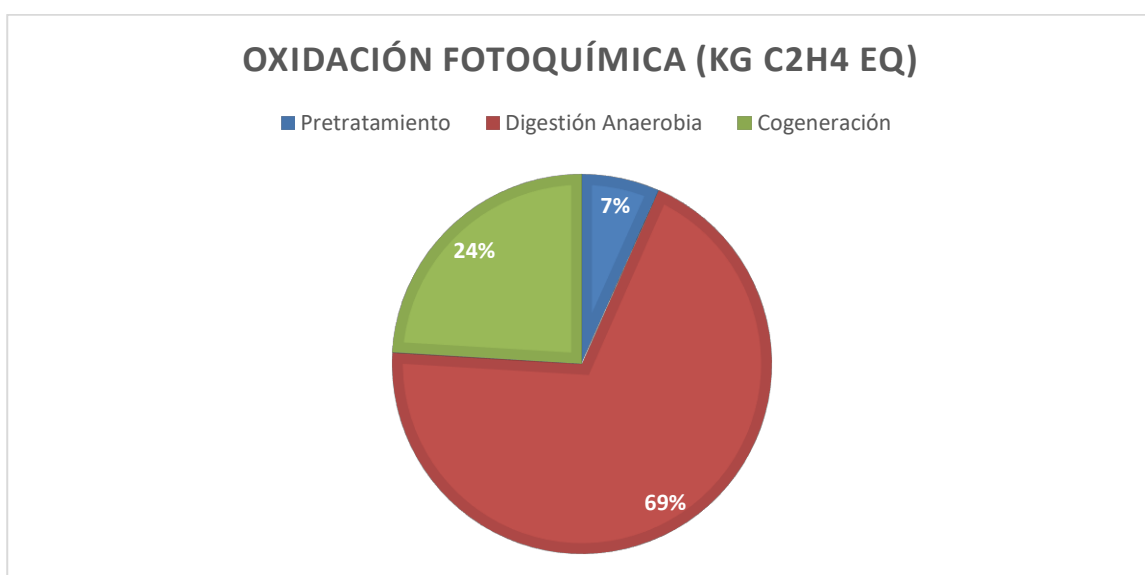


Figura 15. Oxidación fotoquímica de la producción energética con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia

- En la de acidificación el 47% de las emisiones se produce en la fase de digestión anaerobia, como se indica en la Figura 16. Además el 38% de los impactos se produce en la cogeneración. Estas emisiones se deben a la emisión de dióxido de carbono, que al no poder ser absorbido por la flora terrestre se absorbe en el mar, produciendo un cambio en el pH del agua. Además, la acidificación también aumenta en la emisión de productos nitrogenados y derivados del azufre. En la producción de biogás no se tiene en cuenta las emisiones de CO₂ puesto a que es biogénico, pero si de los productos nitrogenados. La emisión de estos gases genera el 53,54% de los

impactos en la acidificación en las tres etapas, un 28,38% en la edificación de las infraestructuras y un 18,0,7% el autoconsumo energético.

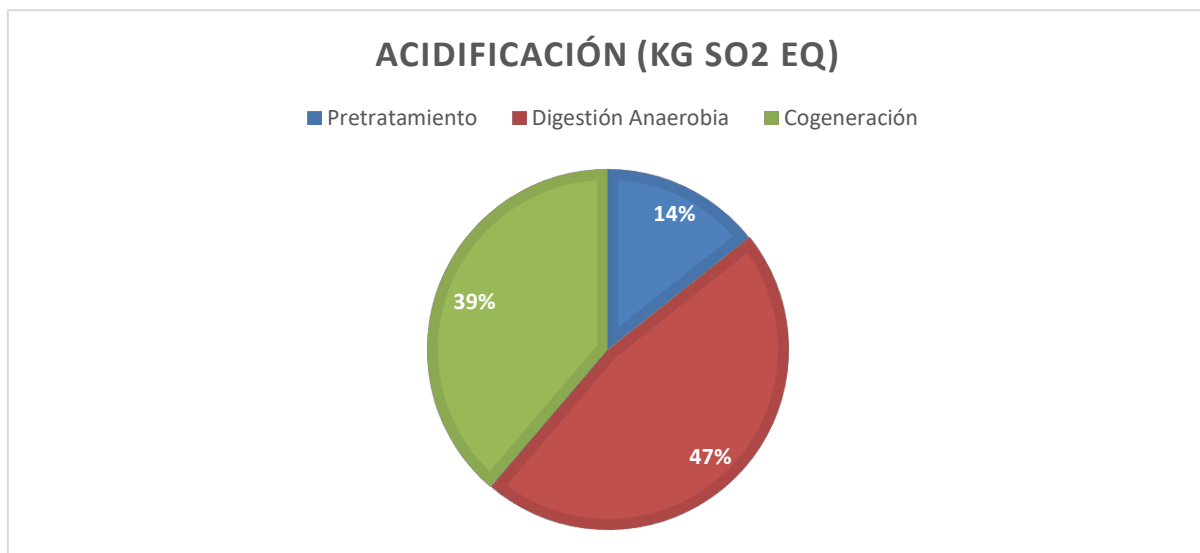


Figura 16. Acidificación de la producción energética con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia.

- En materia de eutrofización la mayor parte de las emisiones se produce en la fase de digestión (61%), como se ilustra en la Figura 17. En esta categoría de impacto las emisiones están distribuidas como: 33,46% de las emisiones son debidas a la fabricación de las infraestructuras, 20,66% de las emisiones son debidas a los gases de los procesos y 7,33% son debidas al consumo energético.

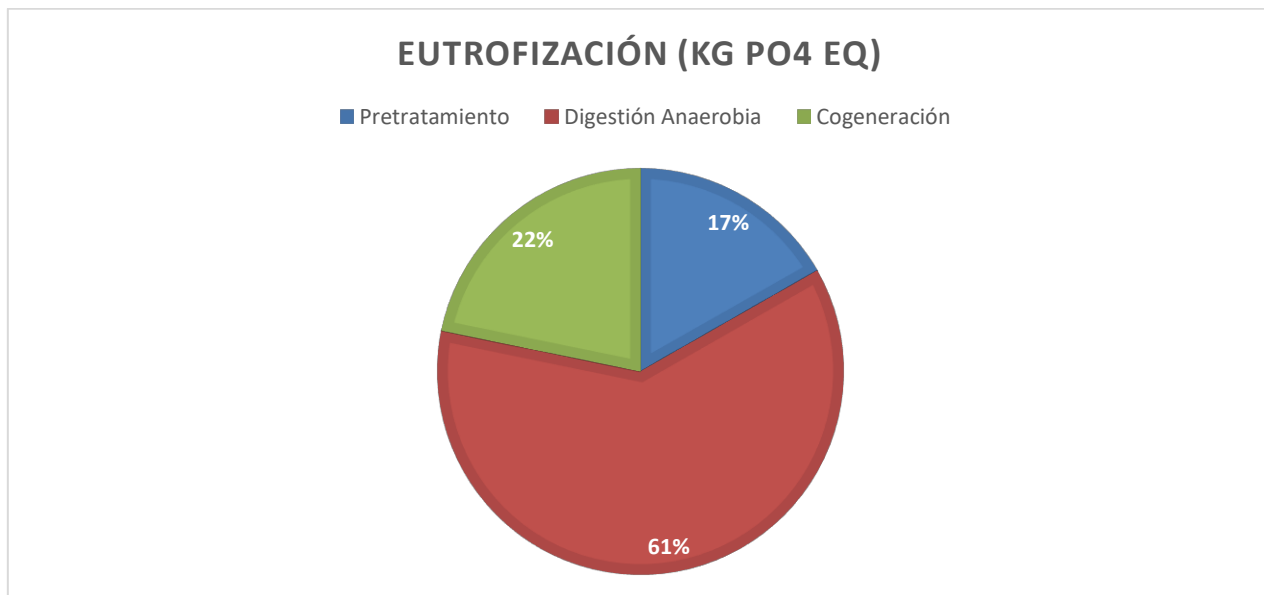


Figura 17. Eutrofización de la producción energética con biogás de MOR.

Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que el consumo energético supone alrededor de un 16% en la mayoría de las categorías de impacto estudiadas en este ACV. La energía consumida es la producida en la planta de cogeneración, por lo que una reducción de impactos en los procesos resultaría en una disminución global de los impactos. Además, en 8 de las 11 categorías, los impactos han sido producidos en su mayoría por la edificación de las infraestructuras. Las restantes 3 categorías, tienen más impactos por las emisiones de los gases en las diferentes etapas.

6.2 COMPARACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES ESCENARIOS

Como se menciona en el apartado de objetivo y alcance en este proyecto realizado se han estudiado dos escenarios para comprar los impactos generados en la digestión. Esta comparación se efectuará con base en la unidad funcional de 1Nm³ de biogás. A tal efecto, se han definido y delimitado claramente dichos escenarios para permitir una adecuada y precisa contrastación de los resultados obtenidos.

- **Caso de estudio (biogás):** En este sistema se genera calor y electricidad mediante la cogeneración de biogás producido con la materia orgánica de la fracción resto. La electricidad producida es utilizada en los procesos de producción del biogás y la sobrante es inyectada a la red eléctrica. El calor producido, es utilizado en la digestión anaerobia y el calor sobrante es utilizado en el resto de las instalaciones del Parque Tecnológico de Valdemingómez. La energía eléctrica producida con 1Nm^3 de biogás con su poder calorífico inferior es de $2,02\text{kWh}_e$, la electricidad producida mediante biogás es utilizada en la Planta de La Paloma para autoconsumo y la restante es inyectada a la red eléctrica de media tensión. La energía térmica producida con la unidad funcional es de $2,32\text{kWh}_t$, la energía térmica producida es utilizada como autoconsumo, en la planta de La Paloma y luego exportada a diferentes instalaciones del Parque Tecnológico de Valdemingómez. Tras el autoconsumo, se inyecta a la red eléctrica de media tensión $1,91\text{kWh}_e$, y se exportan al Parque Tecnológico de Valdemingómez $1,61\text{kWh}_e$.
- **Escenario referencia para las comparaciones:** En este escenario es el de referencia frente al cual se va a comparar. Se utiliza gas natural para la producción de calor y se consume electricidad de la red eléctrica de media tensión en España. Este proceso es el habitual en la producción de calor y electricidad. Se cogen los valores de calor que se exportan al Parque Tecnológico de Valdemingómez y electricidad que se exportan a la red eléctrica de media tensión, mediante la unidad funcional (1Nm^3 de biogás), en el Escenario 1:
 - Calor producido con gas natural ($1,61\text{kWh}_t$).
 - Electricidad de la red eléctrica española de media tensión ($1,91\text{kWh}_e$).

Para la comparación de ambos escenarios se utilizan los datos de los impactos del software Simapro. El escenario uno es el estudiado en el apartado 6.1. El escenario dos toma los

estudios de la base de datos de Ecoinvent cut-off, de donde se toma el calor producido con biogás y electricidad de la red eléctrica española de media tensión.

6.2.1 AGOTAMIENTO ABIÓTICO

En materia de agotamiento abiótico, caso de estudio, ($1,06E-07$ kgSb_{eq}) tiene un 40% menos de impacto, que el escenario de referencia ($2,55E-06$ kgSb_{eq}). Esto se debe a los impactos de la construcción de las infraestructuras y el uso de materias primas.

En el mix eléctrico hay más infraestructuras y plantas con mayor tamaño que en la digestión anaerobia estudiada, por ese motivo, los impactos son menores.

6.2.2 AGOTAMIENTO ABIÓTICO (COMBUSTIBLES FÓSILES)

El agotamiento abiótico de combustibles fósiles mucho mayor en el escenario de referencia, $142,5$ kgSb_{eq} frente a $0,89$ kgSb_{eq} en el caso de estudio, esto se debe al uso de combustibles fósiles para la producción energética. Por otra parte, en el caso de estudio el consumo de combustibles fósiles solo se realiza en los procesos de construcción de la infraestructura, ya que la energía consumida es la producida en la cogeneración de biogás, que es una fuente renovable.

6.2.3 CALENTAMIENTO GLOBAL

Las emisiones de calentamiento global son casi dos tercios menores en la cogeneración que en el uso de gas natural y electricidad de la red, caso de estudio y escenario de referencia. Asimismo, en el caso de estudio, las emisiones de calentamiento global suponen $0,308$ kgCO_{2eq} frente a $0,827$ kgCO_{2eq}. Cabe destacar, que en el escenario dos, el mix eléctrico está compuesto por diferentes fuentes fósiles que producen emisiones a la atmósfera, en cambio, en el escenario de referencia, parte de las emisiones son de CO₂ biogénico, por lo que no tienen impacto, reduciendo de esta manera los impactos generados en este escenario.

6.2.4 AGOTAMIENTO CAPA DE OZONO

El agotamiento de la capa de ozono es mayor en el escenario dos, $4,63E-08$ kgCFC-11_{eq}, frente a $1,17 E-09$ kgCFC-11_{eq} en el caso de estudio. Los valores son mucho menores en el caso de estudio puesto a que los únicos impactos generados en esta categoría se producen en la construcción de las infraestructuras y por tanto también en la energía consumida. En el caso de estudio esta categoría de impacto proporcionalmente es la que menos afecciones tiene en el medio ambiente.

6.2.5 TOXICIDAD HUMANA

En esta categoría de impacto los valores se reducen un 78% en el escenario 1, $0,127$ kg 1,4-DB_{eq} escenario 1 frente a $0,225$ kg 1,4-DB_{eq} en el escenario de referencia. Es decir, el caso de estudio, el de la producción de energía mediante la cogeneración produce un menor impacto en las personas, sobre todo en aquellas que viven cerca de las instalaciones o de los empleados.

6.2.6 ECOTOXICIDAD

Analizando la ecotoxicidad de agua dulce los valores se reducen un 53% en el caso de estudio, $0,084$ kg 1,4-DB_{eq}, frente al escenario de referencia, $0,12$ kg 1,4-DB_{eq}.

Por otra parte, la ecotoxicidad marina se ve muy disminuida por la producción de biogás, $140,5$ kg 1,4-DB_{eq} frente a 339 kg 1,4-DB_{eq} en el escenario de referencia.

En general, la reducción de impactos en la ecotoxicidad supone una gran mejora, ya que permite que la fauna y flora puedan seguir desarrollándose con normalidad y así conseguir un equilibrio en los ecosistemas.

Sin embargo, en materia de ecotoxicidad terrestre se aumentan los impactos con el uso de biogás, teniendo unos impactos de $0,00043$ kg1,4-DB_{eq} en el caso de estudio y en el escenario

de referencia 0,0026kg 1,4-DB_{eq}. Esto se debe a los impactos generados en la fabricación de las infraestructuras.

6.2.7 OXIDACIÓN FOTOQUÍMICA

En esta categoría el escenario de referencia tiene un 15% más de impactos que el caso de estudio, 0,000115kgC₂H_{4eq} y 0,0000995kgC₂H_{4eq} respectivamente. Es importante mencionar que para una mayor reducción en los impactos es necesario evitar las pérdidas producidas en el digestor anaerobio.

6.2.8 ACIDIFICACIÓN

Los impactos en la acidificación se aumentan un 43% en el caso de estudio, 0,0020kgSO_{2eq} y 0,0014kgSO_{2eq}, en el escenario de referencia. Es importante destacar que en esta categoría de impacto el 53% se produce por la emisión de gases a la atmósfera y que el 46% de los impactos se produce en la fase de digestión anaerobia.

6.2.9 EUTROFIZACIÓN

La eutrofización se ve aumentada en el caso de estudio en un 24%, 0,00033gPO_{4eq} en el escenario uno frente a 0,00041gPO_{4eq} en el escenario de referencia. Cabe destacar que el 61% de los impactos en el escenario base de esta categoría son producidos en la fase de digestión anaerobia.

Tras el análisis de los resultados, se presenta una gráfica resumen, Figura 18 donde se comparan los dos escenarios estudiados en este TFM.

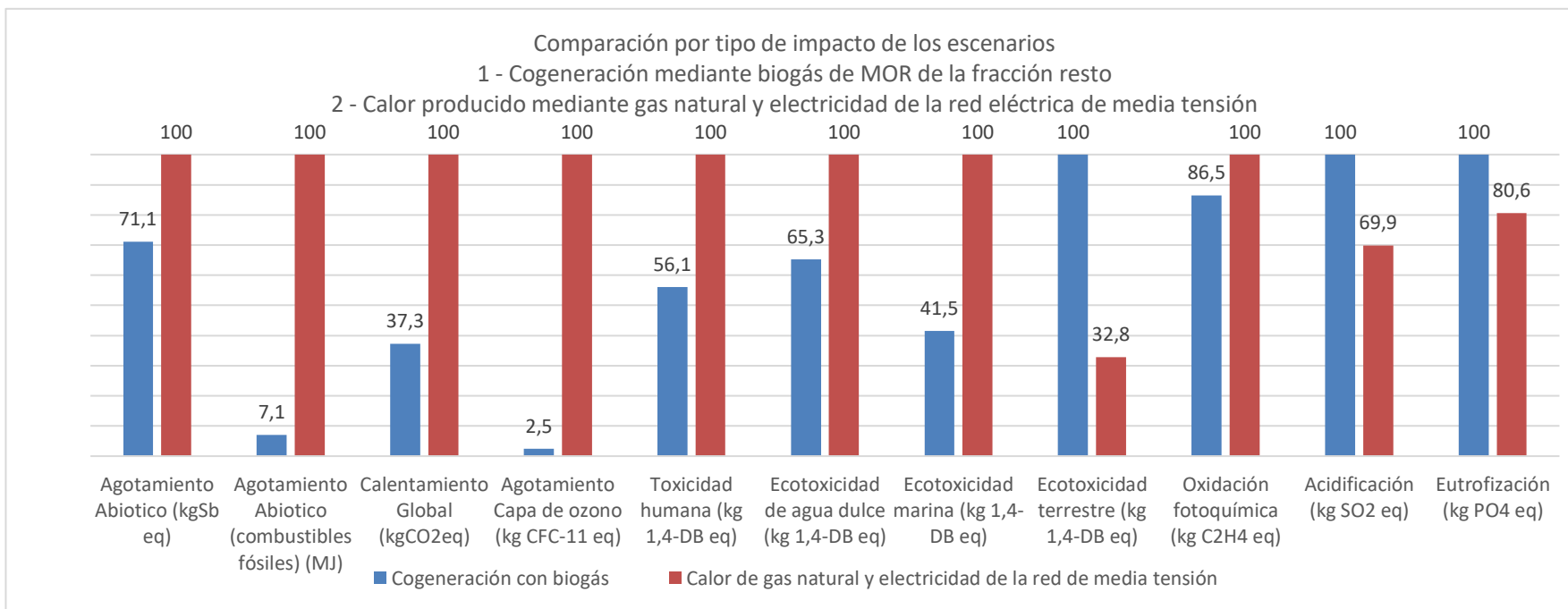


Figura 18. Comparación de los impactos entre los escenarios.

Fuente: elaboración propia

7. CONCLUSIONES

Como conclusión, el proceso de producción de biogás mediante Materia Orgánica Residual de la fracción resto supone un beneficio medioambiental respecto a la producción energética mediante gas natural y electricidad de la red. Este proceso permite reducir los impactos de ocho de las once categorías estudiadas, de acuerdo con el CLM, en comparación con el caso de estudio, la producción de calor con gas natural y electricidad de la red de media tensión, y el escenario de referencia, la cogeneración con gas natural. Además, en ocho de las once categorías, la mayor parte de los impactos se producen por la fabricación de las infraestructuras, no por el propio proceso de tratamiento en sí.

En seis de las categorías, donde más impactos se produce es en la fase de cogeneración, en su mayoría por las emisiones producidas por la fabricación de la infraestructura (agotamiento abiótico combustibles fósiles, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad marina y ecotoxicidad terrestre). En la digestión anaerobia se obtienen impactos más altos en las otras cinco categorías (agotamiento abiótico, calentamiento global, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización), debido a las emisiones del biogás en crudo. Estas características son imprescindibles para comprender que procesos producen más impactos y como reducirlos en la propia planta de La Paloma y en posibles futuras plantas.

La acidificación, la eutrofización y la toxicidad terrestre son las tres categorías de impacto donde la producción energética mediante biogás es más perjudicial que la producción de calor mediante gas natural y consumo eléctrico de la red de media tensión, esto se debe a las emisiones de los gases en crudo en el digestor anaerobio. Asimismo, algunos de los procesos son susceptibles de mejora desde el punto de vista de reducción de los impactos medioambientales.

Desde el Gobierno de España se quiere reducir un 21% las emisiones de efecto invernadero respecto a 1990 (Consejo de Ministros, 2019). Por lo que una reducción de los impactos en dos tercios supone una gran mejora respecto a los valores de emisiones actuales y permite acercarse al objetivo fijado.

Una de las principales sustancias emisoras en el proceso es el metano, gas que constituye un 12% de los GEI en Europa (Estefanía Narrillos, 2023). Este gas también contribuye a la oxidación fotoquímica, categoría de impacto muy afectada en este proceso. Desde el Parlamento Europeo se establece que para la reducción de metano se prohibirá la ventilación y la quema de metano a partir del año 2027.

Además, para la reducción de las emisiones de efecto invernadero y la oxidación fotoquímica, la UE pidió a la Comisión que se “... *publique orientaciones sobre los mejores métodos para construir y explotar plantas de biogás con el objetivo de solucionar las fugas provocadas por un mantenimiento, una explotación y un diseño deficientes;*” (Parlamento Europeo, 2021).

Como se ha mencionado en varias ocasiones en el análisis, las emisiones de gases en el digestor son los mayores causantes de los impactos en las categorías en las que aplica, por lo que para conseguir una reducción de emisiones en el ciclo de vida del biogás en la planta de La Paloma es necesario abordar estas pérdidas, ya que son las únicas que se pueden paliar.

Aunque los impactos producidos por las infraestructuras ya han sido generados, y por lo tanto no se pueden llevar a cabo acciones para paliarlos. Sin embargo, es indispensable que se pongan esfuerzos en alargar su vida útil, y así poder evitar posibles futuros impactos en la reconstrucción. Gracias al análisis presentado en este estudio, futuras plantas de digestión anaerobia se podrían ver beneficiadas, ya que se puede determinar cuáles son aquellas categorías de impacto más afectadas por la construcción de las infraestructuras e intentar reducir dichos impactos. Por ejemplo, el agotamiento abiótico se puede reducir mediante el uso de materiales reciclados para la construcción de las infraestructuras. Además, con el uso

de la energía producida mediante el biogás, se reducen los impactos que tienen las fuentes tradicionales de energía.

Pese a que aún exista un espacio para la mejora del proceso, este estudio avala que la producción de biogás a partir de materia orgánica residual no solo representa una opción tecnológica eficiente para la generación de calor y electricidad, sino también una herramienta poderosa en la búsqueda de una economía más circular y sostenible. Con sus beneficios medioambientales y su potencial para fomentar la adecuada gestión de los residuos, este enfoque puede contribuir de manera significativa a la construcción de un futuro energético más limpio, resiliente y equitativo. No obstante, se destaca la necesidad de continuar investigando y perfeccionando el proceso para alcanzar su máximo potencial y promover su adopción a gran escala en la sociedad. Con una firme determinación y el compromiso colectivo, el camino hacia una transición energética más responsable y respetuosa con el medio ambiente se vuelve cada vez más factible mediante el aprovechamiento de esta valiosa alternativa: la producción de biogás a partir de materia orgánica residual.

8. DESARROLLO FUTURO

La necesidad de mejorar el proceso de producción de biogás a partir de materia orgánica residual es indispensable en el camino hacia la sostenibilidad energética. A pesar de los alentadores resultados que evidencian su menor impacto ambiental en comparación con las fuentes convencionales, se observan áreas de oportunidad que requieren atención. Es fundamental enfocar esfuerzos en la optimización de la fase de cogeneración y la digestión anaerobia, abordando eficazmente la reducción de emisiones de metano durante el proceso de tratamiento, así como la fase de pretratamiento, para mejorar el almacenamiento de residuos y mitigar emisiones adicionales de metano. Mediante una constante búsqueda de soluciones y la adopción de enfoques más responsables, será posible maximizar los beneficios medioambientales del biogás y consolidarlo como un pilar esencial en la transición hacia una matriz energética más sostenible y respetuosa con el entorno natural.

El análisis de ciclo de vida (ACV) ha permitido detectar oportunidades de desarrollo futuro en varios aspectos. En primer lugar, el ACV identifica áreas de mejora en los procesos de producción de biogás mediante la digestión anaerobia de residuos orgánicos (MOR), por lo que mediante la mejora de estos procesos se podrá tener un producto con menor impacto ambiental.

Con base en los resultados y las conclusiones del ACV, se pueden implementar acciones y estrategias para optimizar los procesos de producción de biogás, como la implementación de tecnologías más eficientes, el uso de sustratos de mejor calidad o la optimización de los parámetros de operación. Estas mejoras contribuirán a reducir los impactos ambientales asociados a la producción de biogás y se podrá obtener un biogás de mayor calidad.

Además, este análisis puede servir como una herramienta para fomentar la producción de biogás mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos residuales. La práctica de utilizar

residuos orgánicos como materia prima para la producción de biogás es una opción sostenible y prometedora, ya que permite aprovechar y dar valor a los residuos que de otro modo terminarían en vertederos o tratados de manera menos eficiente. Al proporcionar información sobre los beneficios ambientales y la viabilidad de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos residuales, este análisis de ciclo de vida puede promover la adopción de esta práctica por parte de otras plantas de tratamiento de residuos en España. De este modo, se conseguiría un aumento significativo en la producción de biogás a nivel nacional, lo que contribuirá a la producción energética mediante fuentes renovables, disminuyendo el impacto de los combustibles fósiles y de los residuos.

El biogás producido tiene la capacidad de ser transformado en biometano, un gas con aproximadamente 95% de CH₄, que cumple con los estándares de calidad del gas natural. El biometano puede ser inyectado directamente en la red gasista, generando diferentes aplicaciones. Además, el biometano puede utilizarse como combustible para vehículos, tanto en forma comprimida (CNG) como en forma líquida (LNG). Esta opción contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejora la calidad del aire. Además, el biometano puede ser utilizado como combustible en la industria, como la producción de calor para diferentes procesos industriales, pudiendo realizar las mismas funciones que el gas natural.

En general, el biogás presenta grandes oportunidades al proporcionar energía renovable y sostenible, promover la valorización de residuos y facilitar su adecuado tratamiento. Asimismo, en línea con las políticas vigentes en España para fomentar la implementación de instalaciones de biogás, cuyo objetivo es multiplicar por 3,8 la producción de biogás, este informe proporciona información detallada sobre los procesos involucrados, así como los impactos asociados.

A modo de ejemplo, se destaca el caso de una planta en Artigas, en el País Vasco para 2030, la cual tiene como finalidad la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y su posterior biometanización, pudiendo abastecer a cerca de 6.000 viviendas. Por otra parte, la

producción local de biogás favorece la independencia energética de otros países permitiéndole tener seguridad y estabilidad en el suministro, siendo así menos vulnerable a las crisis energéticas que se puedan ocasionar.

A diferencia de las energías renovables como la eólica y la solar, dependientes del clima, el biogás puede ser almacenado por lo que es una fuente más estable. El biogás puede ser utilizado en las horas valle de producción de otras fuentes renovables como la eólica o la fotovoltaica, siendo un medio de almacenamiento óptimo para el balance del sistema energético global.

El biogás, además, presenta significativas ventajas económicas en comparación con otras fuentes de energía. En primer lugar, su producción a partir de materia orgánica residual brinda una oportunidad para aprovechar un recurso que de otro modo podría convertirse en un pasivo ambiental y costoso de gestionar. Esto se traduce en una reducción de costes asociados a la gestión de residuos, aliviando la carga económica para las autoridades locales y las empresas. Además, el biogás es un recurso renovable, lo que implica una mayor estabilidad en los precios a largo plazo, en contraposición a los combustibles fósiles, que están sujetos a las fluctuaciones volátiles en el mercado. Asimismo, el biogás puede ser utilizado de manera descentralizada, lo que fomenta la generación de empleo y oportunidades económicas a nivel local.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DESARROLLO FUTURO

9. BIBLIOGRAFIA

References

- Ackmez Mudhoo. (2012). In Mudhoo A. (Ed.), *Biogas Production : Pretreatment Methods in Anaerobic Digestion*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Antón Vallejo, M. A. (2011). *Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Capítulo 3*. Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10803/6827>
- Ardolino, F., Cardamone, G. F., Parrillo, F., & Arena, U. (2021). Biogas-to-biomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110588.
10.1016/j.rser.2020.110588
- Banks, C. J., Chesshire, M., Heaven, S., & Arnold, R. (2011). Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance. *Bioresource Technology*, 102(2), 612-620. 10.1016/j.biortech.2010.08.005
- Cedales Ladino, E. D., & Jiménez Castellanos, S. A. (2014). *Modelamiento computacional de la producción de energía renovable a partir del biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino*. ()

http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-81602014000200002&script=sci_arttext&tlng=es

Clerbaux, C., Cunnold, D. M., Anderson, J., Engel, A., Fraser, P. J., Mahieu, E., Manning, A., Miller, J., Montzka, S. A., Nassar, R., Prinn, R., Rinsland, C. P., Simmonds, P., Verdonik, D., Weiss, R., Wuebbles, D., & Yokouchi, Y. (2007). *SCIENTIFIC ASSESSMENT OF*

OZONE DEPLETION: 2006. World Meteorological Organization.

<https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BE2014102317>

Combs, A. R. (2011). *Life Cycle Analysis of Recycling Facilities in a Carbon Constrained World*. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/7808>

Comisión Europea. (2015). *La Comisión lleva a España ante los tribunales por la persistencia de vertederos ilegales*.

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_21_3541

Comisión Europea. (2021). *Pacto Verde Europeo: la Comisión propone transformar la economía y la sociedad de la UE para alcanzar los objetivos climáticos*

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP_15_5354

Consejo de Ministros. (2019). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030*

<https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/Paginas/enlaces/220219->

[plan.aspx#:~:text=fase%20de%20elaboraci%C3%B3n.-](#)

[.Reducci%C3%B3n%20de%20emisiones,una%20de%20cada%20tres%20toneladas.](#)

Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(24), 55-81. 10.22490/24629448.1717

Cozzi, L., Chen, O., & Kim, H. (2023, Feb 23,). THE WORLD'S TOP 1% OF EMITTERS PRODUCE OVER 1000 TIMES MORE CO2 THAN THE BOTTOM 1. *States News Service* <https://www.iea.org/commentaries/the-world-s-top-1-of-emitters-produce-over-1000-times-more-co2-than-the-bottom-1>

Demichelis, F., Tommasi, T., Deorsola, F. A., Marchisio, D., Mancini, G., & Fino, D. (2022). Life cycle assessment and life cycle costing of advanced anaerobic digestion of organic fraction municipal solid waste. *Chemosphere*, 289, 133058. 10.1016/j.chemosphere.2021.133058

Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingómez. (2022). *Memoria de Actividades PTV 2021* https://www.madrid.es/UnidadWeb/Contenidos/RC_Valdemingomez/Publicaciones/Memoria_Actividades_DGPTV_2021.pdf

Elena Fortunati, Siddharth Jain, edited by Deepak Verma, & Xiaolei Zhang. (2019).

Biomass, biopolymer-based materials, and bioenergy : construction, biomedical, and other industrial applications. Woodhead Publishing. 10.1016/C2017-0-00839-X

Elías Castells, X. (2012). La gestión de los RSU en España. *Reciclaje de residuos*

industriales : Residuos solidos urbanos y fangos de depuradora (). Editorial Díaz de Santos, S.A.

Estefanía Narrillos. (2023). *El PE pide acelerar la reducción de emisiones de metano del sector energético*

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20230505IPR84920/el-pe-pide-acelerar-la-reduccion-de-emisiones-de-metano-del-sector-energetico>

Esteves, E. M. M., Herrera, A. M. N., Esteves, V. P. P., & Morgado, C. d. R. V. (2019).

Life cycle assessment of manure biogas production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 219, 411-423. 10.1016/j.jclepro.2019.02.091

European Commission. (2022, 7 junio,). *Renewable energy targets*.

https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en

Eurostat. (2020). *Greenhouse gas emissions from waste*

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20200123-1>

Feliu, A., & Flotats, X. (2020). *Los Gases Renovables. Un vector energético emergente.*

1-151. 978-84-09-15270-4

<https://www.fundacionnaturgy.org/publicacion/los-gases-renovables-un-vector-energetico-emergente/>

Forster-Carneiro, T., de Lima Isaac, R., Perez, M., & Schwartz, C. (2012). *Biogas Production; Pretreatment methods in anaerobic digestion.* John Wiley & Sons, Inc.

10.1002/9781118404089

Gerardi, M. H. (2003). Types of Anaerobic Digesters. *The Microbiology of Anaerobic Digesters* (pp. 141-151). John Wiley & Sons, Inc. 10.1002/0471468967.ch23

Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712-725.

10.1016/j.rser.2014.10.013

Hijazi, O., Munro, S., Zerhusen, B., & Effenberger, M. (2016). Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1291-1300. 10.1016/j.rser.2015.10.013

10.1016/j.rser.2015.10.013

Hilal Ezgi Toraman. (2023). *Alternative Fuels from Biomass Sources*

[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Biological_Engineering/Alternative_Fuels_from_Biomass_Sources_\(Toraman\)](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Biological_Engineering/Alternative_Fuels_from_Biomass_Sources_(Toraman))

IDAE. (2007). *Biomasa. Digestores Anaerobios*. ()

https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_digestores_anerobios_a2007_0d62926d.pdf

IEA. (2022). *World Energy Balances*

<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>

IEA. (2023). *CO2 emissions in 2022*

<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>

IGN. (2022). *Tratamiento de residuos sólidos urbanos*. Instituto Geográfico Nacional.

https://www.ign.es/espmap/mapas_conta_bach/Contam_Mapas_Mapas_07.htm

INE. (2022). *Cuentas medioambientales: Cuenta de los residuos*

Año 2020. (). https://www.ine.es/prensa/cma_2020_res.pdf

Mibgas. (Julio 2023). *Resultados del mercado*. <https://www.mibgas.es/es/market-results?date=2023-05-17>

Norma ISO 14040: Gestión ambiental — Evaluación del ciclo de vida — Principios y marco, (2006). <https://iso.org/standard/37456.html>

Jacob-Lopes, E., Zepka, L. Q., Severo, I. A. & Maroneze, M. M. (2022, *3rd generation biofuels*.

Kimming, M., Sundberg, C., Nordberg, Å, Baky, A., Bernesson, S., Norén, O., & Hansson, P. -. (2011). Biomass from agriculture in small-scale combined heat and power plants – A comparative life cycle assessment. *Biomass and Bioenergy*, 35(4), 1572-1581.
10.1016/j.biombioe.2010.12.027

Kluppel, H. (2005). The Revision of ISO Standards 14040-3 - ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework - ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(3), 165.
10.1065/lca2005.03.001

Laura Golsteijn. (2022, 17 julio). *Life Cycle Assessment (LCA) explained*. PRé. <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/>

Li, Y., Alaimo, C. P., Kim, M., Kado, N. Y., Peppers, J., Xue, J., Wan, C., Green, P. G., Zhang, R., Jenkins, B. M., Vogel, C. F. A., Wuertz, S., Young, T. M., & Kleman, M. J. (2019). Composition and Toxicity of Biogas Produced from Different Feedstocks in California. *Environmental Science & Technology*, 53(19), 11569-11579.
10.1021/acs.est.9b03003

Mahapatra, S., Kumar, D., Singh, B., & Sachan, P. K. (2021). Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus. *Energy Nexus*, 4, 100036.
10.1016/j.nexus.2021.100036

Ministerio para la transición ecológica y reto demográfico. (2022). *El Consejo de Ministros aprueba la Hoja de Ruta del Biogás*. <https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Paginas/consejo-ministros-aprueba-hoja-ruta-biogas.aspx#:~:text=Se%20establece%20un%20objetivo%20pa%C3%ADs,un%2028%25%20de%20energ%C3%ADas%20renovables>.

Mudhoo, A. (2012). In Mudhoo A. (Ed.), *Biogas Production : Pretreatment Methods in Anaerobic Digestion*. John Wiley & Sons, Incorporated.

Murphy, J. D., McKeogh, E., & Kiely, G. (2004). Technical/economic/environmental analysis of biogas utilisation. *Applied Energy*, 77(4), 407-427.
10.1016/j.apenergy.2003.07.005

Naciones Unidas. (2015a, *ODS 11- Ciudades sostenibles*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

- Naciones Unidas. (2015b, *ODS 12- Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- Naciones Unidas. (2015c, *ODS 13- Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- Naciones Unidas. (2015d, *ODS 7- Energía asequible y no contaminante*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- OMS. (2021, 30 de octubre de). *Cambio climático y salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Omnie. (2023) *Evolución del mercado de electricidad. Informe Mensualidad. Julio 2023*. https://www.omie.es/sites/default/files/2023-08/Informe%20Mensual%20Julio_2023_ES.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*
Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG)
- Colección Documentos Técnicos N° 12

https://www.google.es/books/edition/Gu%C3%ADa_te%C3%B3rico_pr%C3%A1ctica_sobre_el_biog%C3%A1/CV2mDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1

Palau Estevan, C. V. (2016). *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás. Fundamentos*

https://explore.openaire.eu/search/other?orpid=od_1560::35e24ecf08ad3009c402b433acc1231b

Pantoja Matta, A. J., Cuatin Inguilán, M. F., & Muñoz Muñoz, D. (2015). Efecto del pretratamiento químico y enzimático en la deslignificación de biomasa agroindustrial típica del cauca. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 13(1), 45-53. doi:10.18684/BSAA(13)45-53 Retrieved from

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612015000100006&lng=en&tlng=en

Parlamento Europeo. (2020). *Pacto Verde Europeo: clave para una UE climáticamente neutra y sostenible*

https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20200618STO81513/pacto-verde-europeo-clave-para-una-ue-climaticamente-neutral-y-sostenible?&at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=

[TR_G&at_audience=pacto%20verde%20europeo&at_topic=Green_Deal&at_location=ES&gclid=Cj0KCOjwiIOMBhDjARIsAP6YhSU38xFtyaDJFaU8Op4Vvkuk2kJ_Y72ubQKcd4Eq--jJ3oAMw7pWmzdQaAthWEALw_wcB](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0436_ES.html)

Parlamento Europeo. (2021). *Resolución del Parlamento Europeo, de 21 de octubre de 2021, sobre una estrategia de la UE para reducir las emisiones de metano (2021/2006(INI))* https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0436_ES.html

PRTR. (Julio 2023). *Registro estatal de emisiones y fuentes contaminantes*. <https://prtr.es.es/>

Ramirez García, J. M., J. Webb, Amon, B., Broomfield, M., Haenel, H., Wulf, S., & Hutchings, N. (2019). *Biological treatment of waste –anaerobic digestion at biogas facilities*

Ramirez, A., Sarathy, S. M., & Gascon, J. (2020). CO2 derived E-fuels: research trends, misconceptions, and future directions. *Trends in Chemistry*, 2(9), 785-795.

Rasimphi, T. E., Tinarwo, D., Sambo, C., Mutheiwana, M. A., & Mhlanga, P. (2022). Chapter 24 - Decentralized biogas plants: status, prospects, and challenges. In S. Sahay (Ed.), *Handbook of Biofuels* (pp. 473-484). Academic Press. 10.1016/B978-0-12-822810-4.00024-5

Red Eléctrica. (2023, junio,). *PÉRDIDAS DE TRANSPORTE (GWh) | SISTEMA ELÉCTRICO:Peninsular*. Redeia. <https://www.ree.es/es/datos/demanda/perdidas-transporte>

Riitta Pipatti, Chhemendra Sharma, & Masato Yamada. (2006a).

DATOS DE GENERACIÓN, COMPOSICIÓN Y GESTIÓN DE DESECHOS.
Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (pp. 3.1-3.44)

Riitta Pipatti, Chhemendra Sharma, & Masato Yamada. (2006b).

ELIMINACIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (pp. 2.1-2.14)

Ritchie, H., Roser, M. & Rosado, P. (2022, *Energy*. owidenergy.

<https://ourworldindata.org/energy>

Secretaría de Estado de Energía. (2021). *Hoja de Ruta del biogás*. ().Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf

- Severo Ochoa, & Gabriel Ovejero Escudero. (2021). *Tratamiento de aguas residuales mediante oxidación húmeda*. <https://www.ucm.es/otri/complutransfer-tratamiento-de-aguas-residuales-mediante-oxidacion-humeda>
- Sikora, A. (2017). Anaerobic Digestion : I. a Common Process Ensuring Energy Flow and The Circulation of Matter in Ecosystems. Ii. a Tool For The Production of Gaseous Biofuels.10.5772/64645
- Sistema Español de Inventario. (2014). *Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera 1990-2012. Volumen 2: Análisis por Actividades SNAP. MITECO*. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/02%20Combusti%C3%B3n%20no%20industrial_tem30-179132.pdf
- Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2019). Environmental sustainability of anaerobic digestion of household food waste. *Journal of Environmental Management*, 236, 798-814. 10.1016/j.jenvman.2019.02.001
- Solomon, S. (2007). Climate change 2007: the physical science basis. Paper presented at the 211-214. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>

Takács-György, K., Lászlók, A., & Takács, I. (2020). Examination of first generation biofuel production in some selected biofuel producing countries in Europe: A case study. *Agricultural Economics*, 66(10), 469-476.

Tecnología y Recursos de la Tierra, S. A. (2023, *Centro de Tratamiento de La Paloma*.

<https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/El-Ayuntamiento/Parque-Tecnologico-de-Valdemingomez/Informacion-relativa-al-Parque/Centros-de-Tratamiento/Centro-de-La-Paloma/Centro-de-Tratamiento-La-Paloma/?vgnnextfmt=default&vgnextoid=d68abea995bf7210VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnnextchannel=c43735f988865210VgnVCM1000000b205a0aRCRD>

The World Bank. (2022, *Annual municipal solid waste generated per capita*

(kilograms/capita/day). world bank. https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html#:~:text=The%20world%20generates%202.01%20billion,from%200.11%20to%204.54%20kilograms.

U.S National Institute of food and agriculture. (2019, 5 marzo,). *Types of Anaerobic*

Digesters. LIVESTOCK AND POULTRY ENVIRONMENTAL LEARNING COMMUNITY Connecting agri-professionals advancing environmental stewardship in animal agriculture. <https://lpeic.org/types-of-anaerobic-digesters/>

United Nations Climate Change. (2016, *El Acuerdo de París*. <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>

Universidad Tecnológica Ecotec. (2021). *Propiedades físico química y biológicas de RSU*.

<https://www.studocu.com/ec/document/universidad-tecnologica-ecotec/derecho-politico/propiedades-fisico-quimica-y-biologicas-de-rsu/8552659>

Vázquez-Rowe, I., Golkowska, K., Lebuf, V., Vaneeckhaute, C., Michels, E., Meers, E.,

Benetto, E., & Koster, D. (2015). Environmental assessment of digestate treatment technologies using LCA methodology. *Waste Management*, 43, 442-459.

10.1016/j.wasman.2015.05.007

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., & Moreno-Ruiz, E. (2016). Ecoinvent,

Allocation, cut-off by classification, Ecoinvent database version 3.8., 1218-1230.

<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

ANEXO A. OBJETIVOS DE DESARROLLO

SOSTENIBLES

En este Trabajo de Fin de Máster (TFM), se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de los impactos generados en la producción y consumo de biogás mediante materia orgánica residual de la fracción resto.

A partir de los datos obtenidos en este estudio, es posible tomar decisiones estratégicas con el objetivo de reducir los efectos adversos en el medio ambiente y, al mismo tiempo, contribuir al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas.

Los ODS son un conjunto de 17 objetivos, desarrollados en diferentes metas, desarrollados por las Naciones Unidas para la protección de los ecosistemas, favorecer un desarrollo futuro y erradicar la pobreza, en los próximos 15 años. En la actualidad se está favoreciendo el desarrollo de proyectos que tengan como objeto los ODS ya que estos buscan actuar sobre las problemáticas más urgentes en la tierra.

Por ese motivo, este TFM, cuyo objetivo radica en la evaluación de los impactos ambientales relacionados con la producción y consumo de biogás para la producción energética, está alineado con diferentes ODS.

Mediante el análisis de ciclo de vida desarrollado, se han identificado y cuantificado los diferentes aspectos que generan un impacto significativo en el medio ambiente, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los residuos generados en el proceso. Este TFM busca el análisis de los impactos para ayudar a tomar medidas sobre los procesos desarrollados, para comprender cuales son los impactos generados y cuales son las

medidas que se pueden tomar en la planta de La Paloma y en futuras instalaciones para la reducción de impactos.

Al considerar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, se ha determinado que este estudio contribuye a la consecución de varios de ellos.

Uno de los principales ODS que se aborda en este TFM es el número 7, "**Energía asequible y no contaminante**" (Naciones Unidas, 2015d). En especial el objetivo 7.2 "De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas" El biogás, obtenido a partir de la materia orgánica residual, es una fuente de energía renovable que puede ser utilizada de manera accesible y sostenible, contribuyendo así a la consecución de este objetivo. Además, mediante los resultados de este ACV, se observa que la producción de biogás resulta en un descenso en las emisiones y además se definen los procesos con mayores impactos para tomar medidas preventivas y además reducir los impactos de futuros proyectos similares.

En cuanto al ODS número 11, "**Ciudades y comunidades sostenibles**" (Naciones Unidas, 2015a), en especial la meta "11.6 De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per capita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo". La producción de biogás mediante materia sólida residual puede ser implementada a nivel local, proporcionando una fuente de energía limpia y sostenible para comunidades urbanas. Esto ayuda a mejorar la calidad de vida de los habitantes y a reducir el impacto ambiental de las ciudades, reduciendo los impactos que generan los residuos.

El ODS número 12, "**Producción y consumo responsables**" (Naciones Unidas, 2015b), también es abordado en este TFM, en especial la meta 12.5 "De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización". La utilización de la materia sólida residual para la producción de biogás promueve un enfoque de consumo responsable, ya que se aprovechan

los residuos generados por otras actividades, evitando su disposición inadecuada y favoreciendo la economía circular.

Por último, el proyecto contribuye en especial al ODS número 13, "**Acción por el clima**" (Naciones Unidas, 2015c). En especial la meta: **13.3** "Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana". El ACV de la producción de biogás a partir de la materia sólida residual estudia la disminución de impactos ambientales y la búsqueda de soluciones que favorezcan la disminución la dependencia de combustibles fósiles, la contribución a mitigar el cambio climático y a promover un modelo energético más sostenible.

El ACV contribuye a fomentar el progreso de la sociedad hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible al proporcionar una base sólida de conocimiento y datos para la toma de decisiones. Permite identificar áreas de mejora y establecer acciones concretas para reducir los impactos ambientales y avanzar hacia un modelo de desarrollo más sostenible. Así, el ACV se convierte en una herramienta fundamental para lograr un futuro más equitativo, próspero y en armonía con el medio ambiente, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos a nivel global.