



UNIVERSITAT_{DE}
BARCELONA

Estudio de viabilidad para una planta de biogás en la industria agroalimentaria: El caso de La Fageda

Autor: Guillermo José Serra Calderón

Tutor: Josep Ma. Chimenos Ribera

Curs acadèmic: 2024-2025

Màster en Energies Renovables i
Sostenibilitat Energètica

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas las personas que me han acompañado y apoyado a lo largo de este año. A mi familia, por su confianza y apoyo a lo largo del camino.

A mis compañeros de clase, por las largas semanas de estudio y su brazo ofrecido en todo momento. Gracias por hacer de este máster un camino acompañado.

A la Fundación La Fageda, por compartir conmigo parte de su proceso y permitir una mayor exactitud en este trabajo.

A Paul, por su paciencia y motivación en esta etapa.

Finalmente, a Josep Chimenos, por su guía en este trabajo y por despertar en mí el interés por la molécula renovable.

RESUMEN

El presente trabajo analiza la viabilidad técnica, ambiental y económica de implantar una planta de biogás en el entorno agroindustrial de La Fageda (Girona), una entidad de economía social que integra actividades ganaderas, agroalimentarias y asistenciales. El estudio se enmarca en el contexto de la transición energética, la economía circular y la necesidad de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la gestión convencional de residuos orgánicos.

A partir de una caracterización detallada de las corrientes residuales —incluyendo estiércol bovino, suero lácteo, restos frutales y lodos de depuradora—, se plantea el diseño de un sistema de digestión anaerobia operado en régimen mesofílico, con capacidad para tratar hasta 18 toneladas diarias de materia orgánica. Se estima una producción de 363 m³/día de biogás, lo que permitiría cubrir hasta un 30–35 % de las necesidades térmicas de la industria, sustituyendo parcialmente el uso actual de gas propano.

Desde el punto de vista ambiental, se calcula una reducción potencial de más de 1.668 toneladas de CO₂ equivalente al año, mediante la valorización energética del metano y la sustitución de combustibles fósiles. El digestato resultante, con valor fertilizante, contribuiría a la mejora de suelos agrícolas y al cierre de ciclos de nutrientes. Asimismo, se identifica una mejora en la eficiencia global del sistema de gestión de residuos de la empresa y una reducción de la carga contaminante en su estación depuradora.

En el ámbito económico, el proyecto presenta un escenario favorable: con una inversión neta estimada de 485.000 €, la implantación de la planta permitiría ahorros operativos anuales superiores a los 89.000 €, lo que reduce el periodo de amortización de unos cinco años, especialmente si se accede a subvenciones públicas. El análisis concluye que el proyecto es técnicamente viable, ambientalmente beneficioso y económicamente rentable, y puede convertirse en un modelo replicable para otras industrias agroalimentarias de tamaño medio con vocación circular y social.

Palabras clave: digestión anaerobia, biogás, economía circular, valorización de residuos, transición energética, sostenibilidad industrial.

RESUM

Aquest treball analitza la viabilitat tècnica, ambiental i econòmica d'implantar una planta de biogàs en l'entorn agroindustrial de La Fageda (Girona), una entitat d'economia social que integra activitats ramaderes, agroalimentàries i assistencials. L'estudi s'emmarca en el context de la transició energètica, l'economia circular i la necessitat de mitigar les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle derivades de la gestió convencional de residus orgànics.

A partir d'una caracterització detallada de les corrents residuals —incloent fems boví, sèrum làctic, restes de fruita i fangs de depuradora—, es proposa el disseny d'un sistema de digestió anaeròbia operat en règim mesofílic, amb capacitat per tractar fins a 15 tones diàries de matèria orgànica. S'estima una producció de 363 m³/dia de biogàs, la qual cosa permetria cobrir fins a un 30–35 % de les necessitats tèrmiques de la indústria, substituint parcialment l'ús actual de gas propà.

Des del punt de vista ambiental, es calcula una reducció potencial de més de 1.668 tones de CO₂ equivalent anuals, mitjançant la valorització energètica del metà i la substitució de combustibles fòssils. El digestat resultant, amb valor fertilitzant, contribuiria a la millora dels sòls agrícoles i al tancament dels cicles de nutrients. Igualment, s'identifica una millora en l'eficiència global del sistema de gestió de residus de l'empresa i una reducció de la càrrega contaminant a l'estació depuradora.

En l'àmbit econòmic, el projecte presenta un escenari favorable: amb una inversió neta estimada de 485.000 €, la implantació de la planta permetria estalvis operatius anuals superiors als 89.000 €, la qual cosa redueix el període d'amortització de cinc anys, especialment si s'accedeix a subvencions públiques. L'anàlisi conclou que el projecte és tècnicament viable, ambientalment beneficiós i econòmicament rendible, i pot esdevenir un model replicable per a altres indústries agroalimentàries de mida mitjana amb vocació circular i social.

Paraules clau: digestió anaeròbia, biogàs, economia circular, valorització de residus, transició energètica, sostenibilitat industrial.

ABSTRACT

This study evaluates the technical, environmental, and economic feasibility of implementing a biogas plant within the agro-industrial operations of La Fageda (Girona), a social enterprise that integrates livestock farming, food production, and social care activities. The project is framed within the broader context of energy transition, circular economy, and the need to reduce greenhouse gas emissions associated with conventional organic waste management.

Based on a detailed characterization of the available organic waste streams—including cattle manure, whey, fruit residues, and wastewater sludge—a mesophilic continuous stirred-tank digester (CSTR) is proposed, with a treatment capacity of up to 15 tonnes of organic matter per day. The system is expected to produce approximately 363 m³/day of biogas, potentially covering 30–35 % of the facility's thermal energy demand and partially replacing the current use of propane gas.

From an environmental perspective, the system could reduce annual emissions by over 1,668 tonnes of CO₂ equivalent, primarily through methane recovery and fossil fuel substitution. The resulting digestate, with significant agronomic value, would improve soil fertility and close the nutrient loop. The project would also enhance the overall efficiency of the company's waste management system and ease the load on its wastewater treatment plant.

Economically, the project is promising: with a net investment estimated at €485,000, the biogas system could generate annual operational savings of more than €89,000, yielding a payback period of around five years—especially if public funding is secured. The analysis concludes that the project is technically viable, environmentally beneficial, and economically profitable, and could serve as a replicable model for other medium-sized agro-industrial enterprises with circular and social missions.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, circular economy, waste valorization, energy transition, industrial sustainability.

ÍNDICE

1. Introducción	7
1.1 Crisis energética y ambiental. Justificación del uso del biogás	7
1.2 Oportunidades para pequeñas industrias agroalimentarias.....	8
1.3 Desarrollo del biogás en Cataluña.....	8
1.4 Objetivos del trabajo.....	9
2. Contexto y antecedentes del caso de estudio: La Fageda	10
2.1 Presentación general de la empresa	10
2.2 Dimensión productiva y agroganadera	10
2.3 Compromisos en sostenibilidad	10
2.4 Sistema actual de gestión de residuos orgánicos	11
2.5 Justificación técnica del estudio.....	11
3. Caracterización de residuos orgánicos disponibles.....	13
3.1 Caracterización cualitativa y cuantitativa de corrientes de residuos	13
3.2 Propiedades fisicoquímicas	14
3.3 Potencial metanogénico (BMP).....	15
3.4 Función estratégica de cada residuo en la mezcla.....	16
4. Diseño preliminar de la planta de biogás.....	18
4.1 Dimensionamiento del digestor y parámetros de operación	18
4.2 Producción energética estimada de biogás y su aprovechamiento.....	19
4.3 Descripción del esquema técnico: líneas de entrada, digestor, almacenamiento, uso del biogás, digestato	21
5. Análisis ambiental	24
5.1 Estimación de reducción de emisiones de GEI.....	24
5.2 Impactos positivos en la gestión de residuos.....	25
5.3 Valor agronómico del digestato como fertilizante.....	26
6. Estudio económico de viabilidad.....	28
6.1 Costes de inversión inicial y mantenimiento	28
6.1.1. Tipo de planta considerado.....	28
6.1.2. Coste de inversión.....	28
6.1.3. Costes de operación y mantenimiento (OPEX)	28
6.2 Ahorros energéticos y reducción de costes en la gestión de residuos	29
6.3 Subvenciones y ayudas aplicables.....	30

6.4 Retorno de la inversión (ROI) y payback estimado	31
7. Conclusiones y recomendaciones	33
7.1 Síntesis de resultados.....	33
7.2 Conclusiones generales del estudio de viabilidad.....	33
7.3 Recomendaciones para la empresa	34
Bibliografía	36
ANEXOS	39
ANEXO I	39

1. Introducción

1.1 Crisis energética y ambiental. Justificación del uso del biogás

En las últimas décadas, el modelo energético global ha estado fuertemente basado en combustibles fósiles, lo que ha generado dos desafíos paralelos: el agotamiento progresivo de recursos no renovables y un aumento descontrolado de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Esta dependencia ha provocado que el sector energético represente más del 75 % de las emisiones globales de GEI, convirtiéndolo en el principal responsable antropogénico del cambio climático [1]. Además, la creciente inestabilidad geopolítica ha expuesto la vulnerabilidad de los países europeos en cuanto a seguridad energética, como se ha evidenciado durante la reciente crisis energética desencadenada por la guerra en Ucrania [2]. El estado geopolítico actual, con una escalada en los ataques entre Israel e Irán que podrían atraer inestabilidad al mercado de los combustibles fósiles, evidencia aún más la inconsistencia de su consumo.

El cambio climático, derivado del aumento de concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno, ya muestra impactos observables sobre la biosfera, la producción agroalimentaria, el régimen hidrológico y la salud pública [3]. En este contexto, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) advierte que limitar el calentamiento global a 1,5 °C requiere reducciones rápidas, profundas y sostenidas de emisiones en todos los sectores económicos, incluida la producción y consumo de energía [4].

Como respuesta, instituciones internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA), la Comisión Europea y Naciones Unidas han subrayado la necesidad de acelerar la transición hacia un sistema energético basado en fuentes renovables, eficiente y climáticamente neutro [5]. Dentro de las alternativas renovables, este trabajo se centra en el aprovechamiento de la biomasa. La biomasa se puede dividir en tres grandes grupos: la biomasa sólida con un 70% de la producción, los biocombustibles con un 23% y las basuras urbanas con el 3% restante [6]. Además, los biocombustibles se pueden subdividir en biodiésel, bioetanol y biogás, entre otros. Entre los diferentes tipos de biomasa, el biogás es el menos significativo, pero el más destinado a crecer para el 2030, en términos relativos, con respecto al 2023.

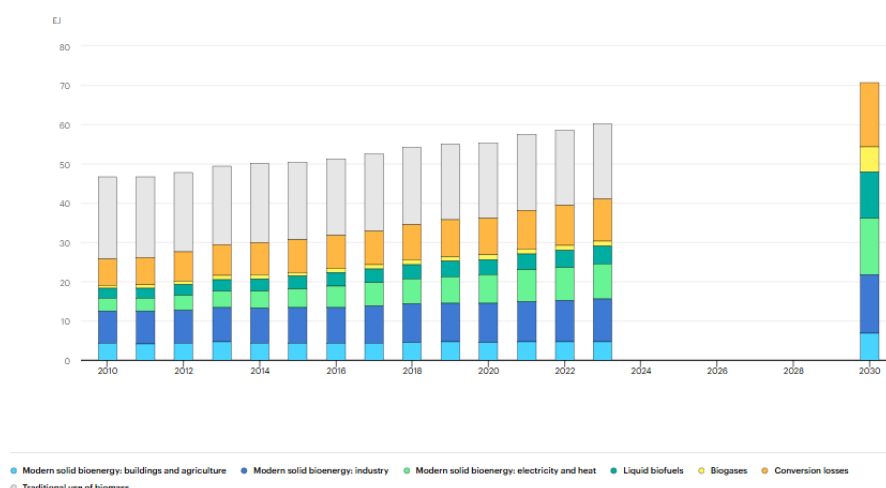


Figura 1. Uso de biomasa en por sector y tipo de biomasa. Se puede observar como el consumo de biogás (amarillo) se espera evoluciones de 1,3 EJ a 6,4 EJ para 2030. Esto es aumentar su consumo en casi un 500% (IEA). [7]

El biogás es una fuente de energía renovable obtenida mediante el proceso de digestión anaerobia, en el cual microorganismos degradan materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) [8]. Este proceso permite valorizar residuos biodegradables, tales como deyecciones ganaderas, subproductos agroalimentarios, lodos de depuradora y la fracción orgánica de residuos municipales [9].

Su versatilidad como combustible permite usarlo para la producción de electricidad y calor mediante motores de cogeneración, como sustituto directo del gas natural en aplicaciones térmicas industriales, o incluso tras depuración (upgrading), inyectarlo a la red como biometano o emplearlo como combustible vehicular [10].

Desde el punto de vista ambiental, el biogás presenta importantes beneficios. En primer lugar, su uso evita la emisión directa de metano, un gas de efecto invernadero 28 veces más potente que el CO_2 [11], el cual se liberaría si los residuos orgánicos se descompusieran sin control. En segundo lugar, permite reducir la demanda de combustibles fósiles. Adicionalmente, el digestato puede ser utilizado como fertilizante orgánico, cerrando el ciclo de nutrientes y reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos [12].

Numerosos estudios técnicos han demostrado que el aprovechamiento del biogás en pequeñas y medianas instalaciones descentralizadas no solo mejora el tratamiento de residuos orgánicos, sino que puede reducir hasta un 90 % de la DQO del efluente tratado [13].

1.2 Oportunidades para pequeñas industrias agroalimentarias

Las pequeñas y medianas industrias agroalimentarias generan residuos orgánicos con alta carga contaminante, como suero lácteo, restos de fruta o efluentes de lavado. A menudo, estas fracciones representan un coste de gestión [14]. Los residuos ganaderos han tenido un uso tradicional como fertilizante en agricultura, sin embargo, el cambio a una ganadería de tipo intensivo ha hecho que el número de animales por explotación haya aumentado, no pudiendo utilizarse directamente sobre el terreno sin originar problemas ambientales y sanitarios, por la gran cantidad de residuos generados [6].

La digestión anaerobia se presenta como tecnología adaptada a estas empresas. Las plantas de baja capacidad (<100 kW) pueden diseñarse con simplicidad operativa y retornos económicos aceptables si los sustratos provienen de residuos propios o de proximidad [15]. El tratamiento de suero mediante digestión anaerobia puede alcanzar producciones de metano superiores a $0,3 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$, convirtiéndolo en uno de los residuos más eficientemente digestibles [16].

Análisis recientes muestran que las inversiones en biodigestores pequeños pueden amortizarse en plazos de 6-10 años, especialmente en esquemas de autoconsumo eléctrico o térmico [17].

1.3 Desarrollo del biogás en Cataluña

Cataluña presenta un elevado potencial de generación de biogás debido a su especialización agroganadera e industrial. Solo el sector porcino genera más de 9 millones de toneladas de purines al año [18].

La Estrategia Catalana del Biogás 2024–2030 establece como meta alcanzar una producción de 2 TWh anuales antes de 2030, priorizando la co-digestión de residuos ganaderos, agrícolas e industriales [18]. Diversos informes técnicos señalan que las zonas rurales de Cataluña, especialmente en comarcas como Lleida y Girona, concentran gran parte del potencial regional de biogás debido a su alta carga ganadera y agroindustrial [19].

Uno de los casos pioneros en la región es la planta de biogás de Noguera Renovables (Lleida), que ha sido la primera en España en inyectar biometano a la red de gas natural [20].

1.4 Objetivos del trabajo

Evaluar la viabilidad técnica, energética, ambiental y económica de implementar una planta de digestión anaerobia en la industria agroalimentaria La Fageda.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar los residuos generados por la empresa.
2. Proponer un nuevo proceso de tratamiento de residuos que incluya un digestor.
3. Diseñar un modelo preliminar de planta de biogás adaptado a dichos residuos.
4. Analizar los impactos ambientales del sistema propuesto.
5. Identificar barreras y oportunidades para su implementación.

2. Contexto y antecedentes del caso de estudio: La Fageda

2.1 Presentación general de la empresa

La Fageda es una empresa social ubicada en la comarca de La Garrotxa (Girona), concretamente en la finca Mas Els Casals del municipio de Santa Pau, en pleno entorno del Parque Natural de la Zona Volcánica de La Garrotxa [22]. Este enclave geográfico se caracteriza por su rico entorno natural protegido, con suelos volcánicos y bosques caducifolios. La localización en un área rural y protegida ha influido en el fuerte compromiso ambiental de la organización, así como en las características de sus actividades agroganaderas.

En cuanto a su actividad económica principal, La Fageda se dedica a la producción alimentaria de derivados lácteos y otros productos de granja. Su negocio integra una explotación lechera y una planta de elaboración de yogures, postres lácteos, helados y mermeladas. Desde 1993 produce yogures de manera ininterrumpida, habiendo ampliado la gama de lácteos a postres y bífidos, así como diversificado a helados (desde 2010) y mermeladas (desde 2012) [22]. En la actualidad es una de las marcas reconocidas del sector lácteo en Cataluña, con una producción anual de más de 86 millones de unidades de yogures y postres en 2023 [23]. A ello se suman 68.806 kg de helados y 138.171 kg de mermeladas fabricados ese mismo año [23].

2.2 Dimensión productiva y agroganadera

La Fageda dispone de una granja propia con un ciclo de producción cerrado. Cuenta con un total de 251 vacas de raza frisona, de las cuales 123 son vacas adultas en producción, con un sistema de estabulación libre y tecnología de ordeño robotizado [23]. Cada vaca dispone de un espacio individual amplio y tiene acceso a pasto estacional, garantizando bienestar animal [24].

La producción anual de leche se estima en torno a 1,5 millones de litros, aunque el volumen requerido para la elaboración total de productos lácteos supera esa cifra, por lo que se complementa con leche de granjas externas certificadas [24]. Respecto a los residuos generados, derivados de la actividad agroganadera e industrial, La Fageda produce purines y estiércol sólido, suero lácteo residual, restos vegetales y fangos de depuradora. Su caracterización y cuantificación se abordará en el siguiente capítulo.

2.3 Compromisos en sostenibilidad

La Fageda ha adoptado un fuerte compromiso ambiental, que se traduce en una gestión integral orientada a la economía circular. Uno de los principales ejemplos es la sustitución parcial del gas propano por una caldera de biomasa forestal, que proporciona calor al proceso de pasteurización y ha reducido en un 26 % el consumo fósil térmico durante 2023 [23]. En 2023, La Fageda dio otro paso adelante con la instalación de placas fotovoltaicas para autoconsumo, que cubrieron un 11 % de su demanda eléctrica anual [23]. La empresa cuenta con una planta de depuración de aguas residuales, y el 88,66 % de los lodos generados en 2023 fueron reutilizados en compostaje interno junto con los estiércoles del ganado [21].

Entre los puntos críticos, destaca la no valorización energética de sus residuos orgánicos: purines, fangos y subproductos como el suero lácteo no se aprovechan actualmente para generar biogás o energía renovable, sino que se tratan exclusivamente mediante compostaje o depuración [21]. Esto representa una oportunidad clara para implementar una planta de digestión anaerobia.

2.4 Sistema actual de gestión de residuos orgánicos

En el sistema actual, los estiércoles, tras someterse a un proceso de secado parcial, se compostan en pilas aireadas con volteo periódico, y el compost se aplica en tierras de cultivo internas [26]. Los fangos de depuración se deshidratan parcialmente y se incorporan al compost. El sistema cumple adecuadamente su función agronómica, pero no permite recuperar la energía potencial contenida en la materia orgánica.

Los residuos orgánicos procedentes del proceso industrial, como excedentes de fruta o suero, se vierten a la depuradora o se entregan a gestores externos [26]. En ningún caso se aprovechan energéticamente. Una planta de biogás permitiría centralizar el tratamiento de residuos orgánicos, reduciendo emisiones y mejorando la gestión global de la materia orgánica. El sistema también podría aportar energía útil a los procesos térmicos de la fábrica, reduciendo el consumo de gas propano y sus emisiones relacionadas.

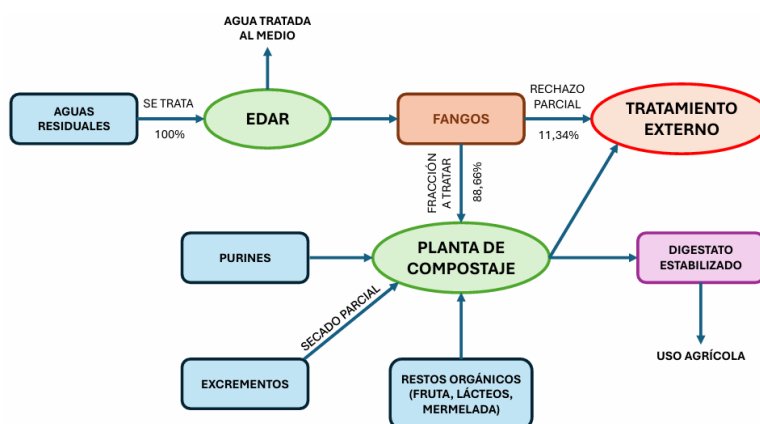


Figura 2. Diagrama de flujos del tratamiento de residuos actual llevado a cabo en La Fageda.

Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista técnico, se propone ubicar el digestor anaeróbico junto a la zona actual de compostaje. Sustituiría parcialmente el compostaje inicial, tratándose el digestato después para estabilizarlo. También reduciría la carga de la depuradora al desviar parte del suero y subproductos hacia el digestor.

2.5 Justificación técnica del estudio

La Fageda representa un caso de estudio idóneo por combinar actividad ganadera, agroalimentaria e industrial en una misma ubicación, con volúmenes de residuo suficientes y demanda energética constante. La presencia de una caldera de biomasa y una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) facilita la integración de un digestor anaerobio.

El presente estudio permitirá analizar el rendimiento energético, el ahorro económico y la reducción de emisiones asociada a una planta de biogás en este contexto. También se evaluará la viabilidad de inyectar biogás en el sistema térmico y eléctrico actual, y su impacto sobre la huella de carbono de la empresa.

Además, este análisis se alinea con la Hoja de Ruta del Biogás en España y con la Estrategia Catalana del Biogás 2024–2030, que fomenta instalaciones pequeñas y medianas integradas en entornos rurales [18].

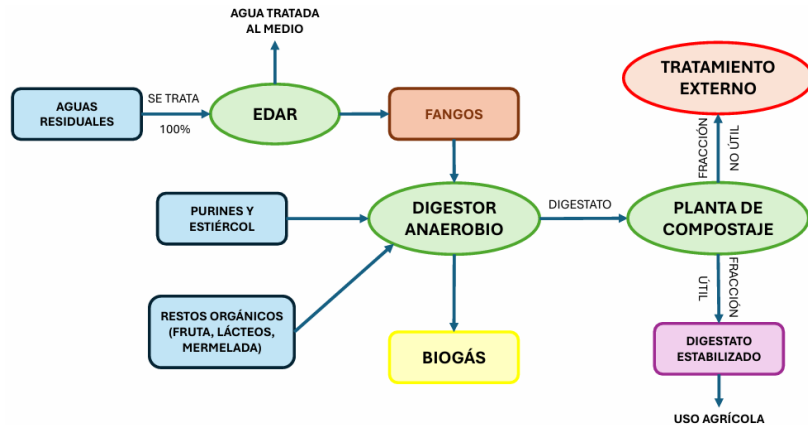


Figura 3. Diagrama de flujos del tratamiento de residuos llevado a cabo en la Fageda tras implementar un digestor anaerobio para la generación de biogás. *Fuente:* Elaboración propia.

Se puede observar cómo, al incluir un digestor anaerobio, se tratan la totalidad de los fangos producidos en el tratamiento de las aguas del proceso industrial. Esto reduce significativamente la gestión externa de residuos, dotando de mayor autosuficiencia a la planta.

3. Caracterización de residuos orgánicos disponibles

3.1 Caracterización cualitativa y cuantitativa de corrientes de residuos

La Fageda, como empresa agroalimentaria con actividad ganadera, láctea e industrial, genera diversas corrientes de residuos orgánicos susceptibles de valorización mediante digestión anaerobia. Se identifican cuatro flujos principales con potencial energético relevante. A continuación, se procede a describir tanto sus características cualitativas, como una estimación del volumen generado por la industria:

a) Purines y estiércol bovino:

Esta corriente se corresponde a la mezcla de excretas líquidas (purines) y sólidas (estiércol) generadas diariamente por las vacas lecheras en la granja. Incluye también materiales de cama vegetal y restos arrastrados por el lavado de establos. La generación de estiércol es continua y voluminosa, representando el residuo orgánico más abundante del sistema.

En explotaciones lecheras intensivas, una vaca puede generar entre 50 y 60 kg de estiércol fresco al día [29]. Un estudio realizado por el ITACyL en una granja mediana (160 vacas) reportó un promedio de 55 kg/vaca·día [29], por lo que se considera este valor para los cálculos realizados en los siguientes capítulos. Aplicando dicha ratio al rebaño de La Fageda (251 vacas) [23], se obtiene una producción diaria estimada de 13.805 kg, equivalente a unas 5.035 toneladas anuales. No obstante, la cifra final se considera entre los 9.000 y 10.000 toneladas por año, pues se incluye también el aporte adicional de purines líquidos, materiales de cama vegetal y restos arrastrados por el lavado de establos. Actualmente, estos residuos se gestionan mediante compostaje en instalaciones propias, pero no se valoriza su contenido energético.

b) Suero lácteo sobrante:

El lactosuero es el subproducto líquido que se origina en los procesos de separación de la cuajada durante la elaboración de yogur o productos fermentados. Tiene una alta carga orgánica y está compuesto fundamentalmente por lactosa, proteínas solubles, minerales y pequeñas fracciones de grasa [27].

La producción de leche en La Fageda supera el millón y medio de litros anuales [21]. En la elaboración de quesos y yogures colados, aproximadamente el 85–90% de la leche se convierte en suero [27]. Si se destina un 10% del volumen total de leche a este tipo de productos (~150.000 L), se generarían entre 130.000 y 140.000 L de suero al año (~130–140 toneladas, dada su densidad próxima a 1 kg/L [27]). A pesar de su volumen comparativamente bajo, el suero presenta una alta carga orgánica y un elevado potencial de generación de biogás [27].

Actualmente, este residuo suele verterse a la EDAR interna o entregarse a gestores externos [21], sin recuperación energética.

c) Restos de fruta y excedentes hortofrutícolas:

La actividad de transformación frutal para la elaboración de mermeladas genera residuos sólidos compuestos por pieles, semillas, pulpas sobrantes y fruta descartada no apta para el consumo o la transformación.

La producción anual de mermeladas de La Fageda ronda las 20–24 toneladas de producto final [21]. Teniendo en cuenta que el contenido de fruta oscila entre el 52% y el 63% [23], esto implica el uso de entre 10 y 15 toneladas de fruta al año. La proporción de residuos

generados durante el procesado varía según el tipo de fruta, pero se estima entre un 5% y un 10% del peso total, lo que supondría entre 0,5 y 1,5 toneladas/año de residuos frutales. La producción frutal es estacional, con picos en determinadas campañas, y los residuos representan un flujo de volumen moderado pero alto valor energético debido a su contenido en azúcares y materia orgánica fácilmente biodegradable [28].

d) Lodos de depuradora:

La empresa dispone de una EDAR que trata el 100 % del caudal industrial. El sistema es mixto, con tratamiento fisicoquímico y biológico, y genera lodos primarios (decantación y coagulación) y secundarios (biomasa del proceso biológico). Estos lodos presentan una alta carga de humedad y contienen restos orgánicos, sales minerales y biomasa microbiana [14].

La carga contaminante de las aguas residuales de industrias lácteas suele situarse entre 2.000 y 4.000 mg DQO/L [30]. Suponiendo que La Fageda trate unos 50–100 m³/día en su EDAR, la masa de DQO eliminada estaría en el rango de 100–400 kg/día. Por cada kilo de DQO consumido en tratamiento aerobio se generan entre 0,4 y 0,5 kg de sólidos volátiles en forma de lodo biológico [30]. Esto se traduce en una producción de lodo de entre 50 y 200 kg/día de sólidos, lo que equivale a unas 9–73 toneladas anuales de lodo húmedo, considerando un contenido en sólidos del 20% tras deshidratación.

No obstante, cabe mencionar que gran parte de la alimentación de la EDAR es el efluente de suero lácteo residual del proceso productivo. En este sentido, se debe considerar que la idea principal es derivar parte de ese efluente al digestor. Por lo tanto, la cantidad final de lodos obtenido se espera sea menor a la original. Más adelante se estudiará el volumen de lodos generados, con mayor detalle.

Actualmente se someten a compostaje junto con estiércoles, sin aprovechamiento energético directo [24].

Una vez se han estudiado los diferentes efluentes del sistema, se procede a evaluar las propiedades que afectan a la etapa digestiva evaluar la estabilidad de la mezcla.

3.2 Propiedades fisicoquímicas

La viabilidad y el rendimiento de la digestión anaerobia dependen de propiedades clave como el contenido de sólidos, la materia orgánica biodegradable, los nutrientes (N, P), pH y la relación carbono/nitrógeno (C/N) [6]. Estos parámetros determinan la biodegradabilidad del residuo y su efecto sobre la estabilidad del proceso.

Por limitaciones a la hora de conseguir datos exactos por parte de la industria de estudio, y dado que los recursos disponibles son limitados, en este trabajo se va a obviar el efecto que los medicamentos tienen sobre las bacterias del digestor. Es conocido que la industria agroalimentaria incluye el tratamiento con medicamentos de su ganado, con el fin de prevenir enfermedades que puedan afectar a la calidad del producto, o incluso comprometer la supervivencia de los animales presentes en la granja de La Fageda. También se obviarán residuos clorados o de desinfección utilizados en la limpieza de las áreas designadas a los animales.

La siguiente tabla sintetiza las propiedades típicas de los residuos generados en La Fageda, en función de datos bibliográficos y residuos agroindustriales análogos:

Tabla 1. Resumen de las características de los efluentes de entrada al digestor anaerobio. Caracterización de los recursos disponibles en La Fageda. Fuente: (Mata-Alvarez et al., 2010; Parra-Huertas, 2010; Cesano, 2024; Molinuevo et al., 2022; Redondo et al., 1995)

Residuo	Humedad (% p/p)	ST (% p/p)	SV/ST (%)	DQO (g/kg)	N total (% ST)	C/N (ratio)
Purín/estiércol bovino	88–92%	8–12%	70–80%	500–1000	3%	15:1 – 30:1
Suero lácteo (ácido)	93–94%	5–7%	>90%	500–800	<1%	30:1 – 40:1
Restos de fruta (mixtos)	80–90%	10–20%	>90%	100–150	1–2%	20:1 – 30:1
Lodos de EDAR	96–98%	2–4%	50–70%	200–500	5–7%	10:1 – 15:1

Estas propiedades se han integrado en el análisis técnico posterior del modelo de digestión, considerando su complementariedad para mantener la estabilidad del proceso y maximizar el rendimiento metanogénico.

Una vez caracterizados fisicoquímicamente, es posible estimar el potencial energético de cada residuo mediante su BMP.

3.3 Potencial metanogénico (BMP)

El Potencial Bioquímico de Metano (BMP, por sus siglas en inglés) representa la máxima producción teórica de metano que puede obtenerse por unidad de sustrato orgánico en condiciones óptimas de digestión anaerobia [6]. Se expresa habitualmente en metros cúbicos de CH₄ por kilogramo de sólidos volátiles (SV) añadidos. Este indicador es clave para dimensionar la planta de biogás y estimar la producción energética asociada al tratamiento de residuos.

los valores de BMP utilizados en este estudio se han extraído de referencias especializadas:

a) Estiércol bovino:

Diversos estudios reportan valores de BMP en el rango de 0,15 a 0,25 m³ CH₄/kg SV, dependiendo de la dieta del ganado y del contenido en fibras no degradables [29]. Un valor promedio representativo es de **0,20 m³ CH₄/kg SV**.

b) Lactosuero (suero lácteo):

En estudios experimentales, se han alcanzado rendimientos de hasta 0,35 m³ CH₄/kg SV [14]. Dado que prácticamente todos los sólidos del lactosuero son biodegradables, su conversión a biogás es muy eficiente. Por ejemplo, Molinuevo et al. (2022) registraron rendimientos superiores al 0,30 m³ CH₄/kg DQO en co-digestión con estiércol [29].

c) Residuos de fruta:

Estudios de Cesano (2024) en residuos de pulpa de frutas reportan valores entre 0,27 y 0,32 m³ CH₄/kg SV, dependiendo de la composición del residuo [28]. Para los residuos de fruta generados en La Fageda, que incluyen pieles, pulpa cocida y excedentes blandos, se estima un BMP promedio de 0,28 m³ CH₄/kg SV, en una hipótesis basada en las frutas utilizadas en el proceso productivo de La Fageda [22].

d) Lodos de EDAR:

Este residuo, al haber pasado por una etapa de estabilización biológica, presentan una fracción biodegradable más baja. Su BMP varía ampliamente entre 0,10 y 0,20 m³ CH₄/kg SV [14]. Se opta por tomar un valor promedio de unos 0,15 m³ CH₄/kg SV y considerando la proporción de SV en lodo espesado (~60%).

3.4 Función estratégica de cada residuo en la mezcla

La decisión sobre qué corrientes de residuos integrar en una planta de digestión anaerobia debe basarse en criterios técnicos, logísticos y ambientales. Es por esto que la cantidad de cada residuo a digerir no debe basarse exclusivamente en su disponibilidad y el potencial metanogénico, sino también en su aporte dentro de la mezcla global.

a) Estiércol bovino:

Actúa como sustrato estructurante y estabilizador del proceso. Aporta macronutrientes (nitrógeno, fósforo), oligoelementos, materia orgánica parcialmente degradada y compuestos tampón (amoníaco) que favorecen la regulación del pH [29]. Su disponibilidad continua y homogénea lo convierten en la base de alimentación del digestor.

b) Suero lácteo:

Se incorpora como cosustrato debido a su alta biodegradabilidad y contenido en lactosa. Estudios indican que mezclar entre un 10–20% de SV de suero con estiércol bovino aumenta la producción de biogás sin afectar la estabilidad del proceso [27, 29]. Su relación C/N elevada compensa el exceso de nitrógeno del estiércol, mejorando el equilibrio nutricional. En el caso de La Fageda, el volumen disponible es bajo, lo que facilita su integración sin riesgo de sobrecarga orgánica.

c) Residuos de fruta:

A pesar de su bajo volumen, son valiosos como aceleradores del proceso, por su elevado contenido en azúcares y su carácter fácilmente fermentable. Los residuos de fruta presentan una biodegradabilidad muy elevada, aumentando la tasa de producción de biogás cuando se emplean como cosustrato [28]. Dado la menor disponibilidad de este recurso, su uso puede ser puntual, permitiendo mayor flexibilidad a la operación.

d) Lodos de depuradora:

Los lodos de EDAR de La Fageda presentan un BMP bajo, pero su inclusión conlleva otras ventajas operativas: reducción del volumen de lodo, higienización, estabilización y recuperación energética parcial [31]. Logísticamente, su proximidad al digestor permite una integración directa. Por tanto, se propone su codigestión controlada en proporciones bajas para evitar dilución excesiva de la mezcla.

En conjunto, la combinación de estos residuos ofrece una sinergia técnica favorable, que permite estabilizar el proceso, optimizar la producción de biogás y avanzar hacia un modelo de gestión circular en la propia finca agroindustrial.

Finalmente, considerando los datos de generación de residuos y su disponibilidad real, se ha reformulado la mezcla diaria de alimentación al digestor aplicando un procedimiento iterativo. Este ajuste se justifica por la interacción entre el suero lácteo y los lodos generados en la EDAR: dado que el suero representa hasta un 70 % de la carga de DQO del sistema de depuración, su redirección al digestor reduce significativamente la producción de lodos.

A partir de un total de 15.000 kg/día de materia orgánica tratada, y considerando un volumen máximo disponible de estiércol (13.300 kg/día), se alcanza una mezcla estable tras sucesivas iteraciones, obteniendo la siguiente proporción final:

- 88,67 % de estiércol y purines bovinos.
- 7,30 % de suero lácteo.
- 0,90 % de lodos de depuradora.
- 3,13 % de restos de fruta.

Esta composición se adapta a la disponibilidad real de cada corriente residual, optimiza la relación C/N global de la mezcla ($\approx 20:1$) y mantiene la estabilidad del proceso, evitando excesiva dilución o sobrecarga orgánica [8, 14, 27, 30].

4. Diseño preliminar de la planta de biogás

4.1 Dimensionamiento del digestor y parámetros de operación

El diseño preliminar del digestor anaerobio constituye uno de los pilares técnicos para la valorización energética de los residuos orgánicos generados en La Fageda. Esta etapa implica la selección del tipo de digestor, el régimen operativo, el volumen de trabajo, así como los principales parámetros cinéticos y de carga. Las decisiones de diseño deben estar alineadas con las características de los sustratos disponibles evaluadas en el capítulo anterior, el contexto productivo de la empresa y las condiciones operativas del emplazamiento.

Dada la naturaleza de los residuos generados se propone el uso de un digestor de mezcla completa, operado en condiciones mesofílicas (entre 35 y 37 °C). Este tipo de digestor ha demostrado ser especialmente adecuado para el tratamiento de sustratos con alta carga orgánica y elevada humedad, como los generados en explotaciones agroganaderas e industrias agroalimentarias [8].

Los residuos de La Fageda presentan una densidad próxima a la del agua y un comportamiento fluido, lo que permite una mezcla eficaz dentro del digestor. En concreto, el estiércol/purines y el suero representan fracciones dominantes, ambos con una humedad superior al 90 %, lo cual descarta la utilización de digestores de tipo seco o discontinuo. La elección del digestor de mezcla completa (Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR) también facilita la homogeneización de la carga orgánica diaria y mejora el contacto entre la biomasa microbiana y los sustratos, condición necesaria para alcanzar altos niveles de conversión biológica [13].

Desde un punto de vista operativo, se opta por un régimen semicontinuo, con alimentación diaria y agitación interna. Este enfoque aporta ventajas en cuanto a la estabilidad del proceso, simplifica la automatización y reduce los riesgos asociados a sobrecargas repentinas o inhibiciones por compuestos tóxicos [13]. Además, este tipo de operación es técnicamente viable para instalaciones agroindustriales de tamaño medio/alto como La Fageda, donde la generación de residuos se produce de forma constante y controlada. Se establecen los siguientes parámetros de diseño:

- **Tiempo de Retención Hidráulico (TRH):** Se adopta un TRH de 30 días, valor considerado óptimo para la biodegradación de sustratos agroindustriales en condiciones mesofílicas. Este tiempo permite una degradación suficiente de la fracción orgánica sin comprometer la estabilidad del sistema [31].
- **Carga Orgánica Volumétrica (COV):** Se prevé operar en un rango comprendido en torno a 4 kg de sólidos volátiles (SV) por metro cúbico de digestor y por día, tal como recomiendan estudios de referencia para digestión anaerobia de residuos agroalimentarios [8] [16]. Este intervalo equilibra productividad y estabilidad microbiana.
- **Volumen útil del digestor:** Asumiendo un caudal total de alimentación de 15 toneladas diarias (considerando una densidad media cercana a la del agua), y un TRH de 30 días, el volumen útil requerido del digestor se estima en 430–400 m³. A este volumen se le añade una reserva del 10–15 % para acumulación de biogás [31], lo que resulta en un volumen total de operación de entre 457 y 477 m³. Esta alimentación diaria incorpora la mezcla ajustada compuesta por estiércol, suero, fruta y lodos en las proporciones calculadas en el apartado anterior. El diseño final garantiza condiciones óptimas de carga orgánica y una mezcla compatible con las capacidades reales de generación de residuos de la industria.

Este diseño preliminar ofrece una base técnica robusta para la valorización energética de los residuos de La Fageda, permitiendo una integración eficiente en el modelo de economía circular de la empresa.

4.2 Producción energética estimada de biogás y su aprovechamiento

La estimación del biogás generado a partir de los residuos orgánicos disponibles en La Fageda es un paso clave para evaluar la viabilidad energética de una planta de digestión anaerobia. Este proceso se basa en el potencial metanogénico (BMP) de cada residuo, que ha sido desarrollado en el *Capítulo 3.3*, su proporción en la mezcla, y su contenido en materia orgánica degradable, expresada como sólidos volátiles (SV).

1. Sólidos Volátiles (SV):

Cada residuo tiene un contenido característico de sólidos totales (ST) y una fracción de estos que es volátil (SV), es decir, biodegradable por las bacterias metanogénicas [8]. Para estimar cuánta materia orgánica efectiva se introduce al sistema cada día, se debe determinar el peso seco (ST) del residuo a partir de su peso en húmedo y calcular qué parte de estos sólidos son volátiles (SV).

$$SV\left(\frac{kg}{día}\right) = Masa\ húmeda\left(\frac{kg}{día}\right) \cdot \left(\frac{ST}{100}\right) \cdot \left(\frac{\%SV/ST}{100}\right) \quad \text{Ecuación 1}$$

2. Estimación del metano generado

Una vez determinada la masa diaria de SV de cada corriente, se multiplica por el BMP bibliográfico, es decir, el volumen de metano que puede producirse por cada kilogramo de SV.

$$CH_4\text{ bruto}\left(\frac{m^3}{día}\right) = SV\left(\frac{kg}{día}\right) \cdot BMP\left(\frac{m^3}{kg\ SV}\right) \quad \text{Ecuación 2}$$

El volumen producido por cada corriente concuerda con estudios de referencia para digestión anaerobia [8, 16].

3. Suma del metano bruto y eficiencia del sistema

Se suman los volúmenes de metano diarios generados por cada residuo para obtener el total bruto. No obstante, en la práctica, la eficiencia del proceso no es del 100 %. Factores como la heterogeneidad del sustrato, las condiciones del digestor o los tiempos de retención hacen que no todo el potencial se convierta en gas útil.

$$CH_4\text{ útil} = CH_4\text{ bruto} \cdot Eficiencia \quad \text{Ecuación 3}$$

Por ello, se aplica un coeficiente de eficiencia del 90 %, aceptado en estudios técnicos y literatura especializada [8].

4. Conversión de metano a biogás

El biogás generado en la digestión anaerobia está compuesto en un 60 % por metano, siendo el resto dióxido de carbono y trazas de otros gases [14]. Por tanto, para conocer el volumen total de biogás producido, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Biogás Total} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) = \frac{\text{Metano útil} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)}{0,6} \quad \text{Ecuación 4}$$

Tras realizar el procedimiento de cálculo para los cuatro residuos introducidos en el digestor anaerobia, se muestra la siguiente tabla, con los resultados obtenidos en el *Anexo I*, donde quedan recogidos en mayor detalle las operaciones y el uso de las *Ecuaciones 1, 2, 3 y 4*.

Tabla 2. Resumen por residuo y total del biogás generado, según los cálculos del Anexo I.
Fuente: (Mata-Alvarez et al., 2010; Parra-Huertas, 2010; Cesano, 2024; Molinuevo et al., 2022; Redondo et al., 1995)

Residuo	t/día	SV (kg/día)	CH ₄ bruto (m ³ /día)	CH ₄ útil (m ³ /día)	Biogás (m ³ /día)
Estiércol bovino	13,30	997,50	199,50	179,55	299,25
Suero lácteo	1,095	62,42	21,85	19,67	32,78
Restos de fruta	0,469	63,32	19,00	17,10	28,50
Lodos EDAR	0,135	12,15	1,82	1,64	2,73
Total	15,00	1.135,39	242,17	217,96	363,26

Se puede observar en los cálculos obtenidos cómo la generación de biogás no es proporcional a la cantidad de residuo presente en la mezcla. Esto es debido a que lo realmente importante es la cantidad de sólidos volátiles, o digeribles, que hay en el residuo, así como su BMP.

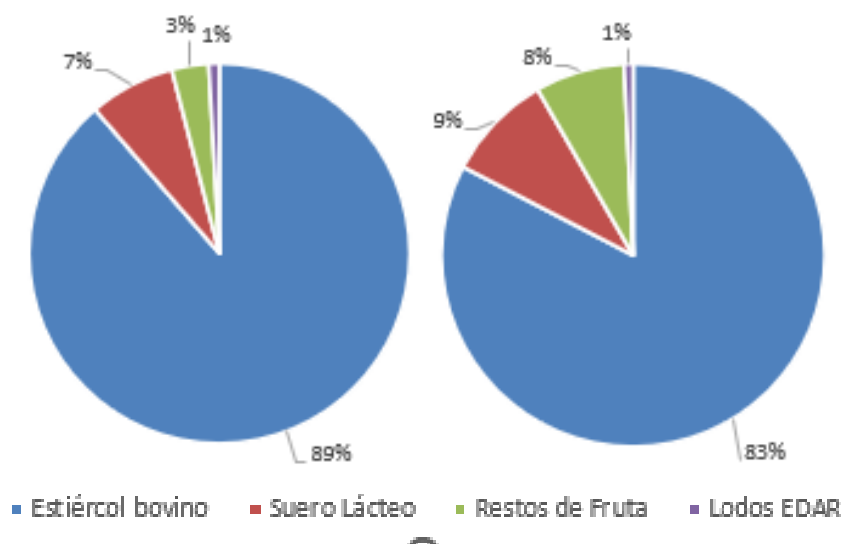


Figura 4. Representación del reparto en % sobre la cantidad de cada residuo introducido en el digestor (izq.) Vs reparto en % sobre la cantidad de metano útil generada por cada residuo.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa como el suero lácteo y los resto de fruta, tienen mayor potencial para la generación de metano. No obstante, su introducción en el sistema se ve limitada por la relación C/N.

5. Potencial energético del biogás

Para transformar el volumen de biogás en energía útil, se emplea su poder calorífico inferior (PCI), que para el biogás es de aproximadamente 22 MJ/m³ [28].

$$Energía_{biogás} = V_{Biogás} \cdot PCI \quad Ecuación 5$$

Según el *Anexo I*, la energía generada por combustión del biogás en un año es de unos **2.917 GJ**.

Esta energía puede cubrir una parte significativa de las necesidades térmicas o eléctricas de la fábrica, mejorando la autonomía energética y reduciendo dependencia de combustibles fósiles.

4.3 Descripción del esquema técnico: líneas de entrada, digestor, almacenamiento, uso del biogás, digestato

Para la implementación de una planta de digestión anaerobia en el entorno agroindustrial de La Fageda, se propone un esquema técnico integral que contemple todas las etapas del proceso, desde la recepción de residuos hasta el aprovechamiento energético del biogás y la gestión del digestato generado.

1. Líneas de entrada de residuos

La planta dispondrá de una zona de **recepción y pretratamiento** para los cuatro tipos principales de residuos identificados:

- **Estiércol y purines bovinos:** procedentes de la limpieza diaria de los establos. Se canalizan mediante canaletas y bombeo hacia un tanque intermedio de homogenización.
- **Suero lácteo:** captado directamente desde las líneas de producción láctea, con transporte mediante tuberías cerradas hacia el sistema de alimentación líquida del digestor.
- **Restos de fruta:** acopiados en contenedores desde el obrador de mermeladas. Se trituran o desmenuzan para facilitar su degradación.
- **Lodos de EDAR:** extraídos de la depuradora industrial existente. Se conducen al digestor tras un proceso de espesamiento.

La biomasa de origen ganadero es menos homogénea que la industrial [6]. Por esta razón, se propone que todos estos residuos se mezclen en un tanque de homogeneización provisto de agitación mecánica, con el fin de asegurar una alimentación uniforme y evitar estratificaciones. Esta mezcla se introduce de forma semicontinua en el digestor, con un caudal promedio estimado de 15 toneladas diarias.

2. Digestor anaerobio

Se propone un digestor de tipo mezcla completa en régimen mesofílico (35–37 °C). Este diseño es adecuado para residuos de alta humedad y baja concentración de sólidos (por debajo del 15 %) [23], como los presentes en La Fageda.

El digestor contará con:

- Sistema de agitación interna, que garantiza la homogeneidad del contenido y previene la sedimentación.
- Aislamiento térmico y calefacción, utilizando parte del biogás para mantener la temperatura óptima.
- Sensores de pH, temperatura, nivel y presión, con sistema de control automatizado.
- Volumen útil estimado: 441 m³, con una reserva adicional del 10–15 % para acumulación de biogás.

3. Almacenamiento y acondicionamiento del biogás

El biogás producido se acumula en la parte superior del digestor o en un gasómetro externo flexible. Este gas contiene entre un 55–65 % de metano (CH₄), junto a dióxido de carbono (CO₂) y trazas de H₂S, humedad y otros compuestos [14].

Para su aprovechamiento, el biogás pasará por un sistema de purificación básica compuesto por:

- Filtro de desulfuración (H₂S): mediante lecho de óxidos de hierro o biofiltro.
- Deshumidificador: que evita la condensación en las tuberías de gas.

Tras su acondicionamiento, el biogás podrá ser usado en una caldera térmica para generar calor que se aproveche en los propios procesos industriales de La Fageda (e.g., pasteurización de leche).

El biogás también puede ser dirigido a un sistema de cogeneración (CHP) para producir simultáneamente electricidad y calor. Cabe destacar la importancia de contar con capacidad de almacenamiento en depósitos de reserva, permitiendo un uso más flexible.

4. Tratamiento del digestato

El efluente del digestor, conocido como digestato, se almacenará en una balsa o tanque cerrado. Dada la infraestructura actual de compostaje en La Fageda [23], se contempla su valorización a través de dos efluentes diferentes:

- **Fracción sólida** ($\approx 20\%$): será enviada a la planta de compostaje, donde se mezclará con restos vegetales para producir abono estabilizado.
- **Fracción líquida** ($\approx 80\%$): rica en nutrientes, podrá aplicarse como fertilizante líquido en cultivos cercanos, bajo las condiciones establecidas por la normativa agrícola española [32].

De esta forma, se cierra el ciclo de nutrientes en la finca y se reducen las necesidades de fertilizantes químicos. Del mismo modo, se genera una estrategia de comercialización y reducción de costes. La Fageda compra leche de granjas cercanas para satisfacer sus niveles de producción [24]. Se pueden generar contratos de compraventa de fertilizantes líquidos por leche, reduciendo los costes de materias primas para la industria.

Los principales escenarios de uso energético para el biogás que han sido contemplados son:

- **Uso térmico directo:** Ideal para procesos como la pasteurización, mediante calderas alimentadas con biogás, complementando o sustituyendo el uso de biomasa forestal [23].
- **Cogeneración (CHP):** Mediante un motor de combustión interna se puede generar electricidad y recuperar el calor residual, con eficiencias globales del 70–80 % [9].

En instalaciones mayores, el biogás puede depurarse e inyectarse en la red gasista [20]. No obstante, por su escala y falta de infraestructura, esta opción no se prioriza para el caso de La Fageda.

5. Análisis ambiental

5.1 Estimación de reducción de emisiones de GEI

La implantación de una planta de digestión anaerobia en el entorno agroindustrial de La Fageda permitiría reducir de forma significativa las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI). Esta reducción se debe a dos mecanismos principales. Por un lado, la sustitución de combustibles fósiles por biogás renovable y, por otro lado, la captura del metano que de otro modo se emitiría a la atmósfera durante la descomposición natural de los residuos orgánicos.

Sustitución de combustibles fósiles

Actualmente, La Fageda utiliza 184.379 kg de gas propano al año como fuente energética en sus instalaciones [23]. El poder calorífico inferior (PCI) del propano es de 46,3 MJ/kg [33], lo que supone, haciendo uso de la *Ecuación 5*, un consumo energético anual de:

$$Energía_{C_3H_8} = 184.379 \text{ kg}_{C_3H_8} \cdot 46,3 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{C_3H_8}} = 8.536.748 \text{ MJ} \cong \mathbf{8.537 \text{ GJ}}$$

Se puede observar cómo la generación de energía actual en La Fageda es superior al potencial energético del biogás generado (2.917 GJ). Igualmente, aunque no se logró sustituir en su totalidad el consumo de combustibles fósiles, sí que se lograría evitar una cantidad importante de emisiones asociadas.

Dado que el PCI no varía, se calcula la cantidad de propano ahorrado por la sustitución parcial de este por biogás, a través de una regla de tres. Además, el factor de emisión de CO₂ para el propano es de 2,94 kg CO₂ por kg de propano [34], por lo que el ahorro en emisiones sería:

$$\frac{184.379 \text{ kg}_{C_3H_8}}{8.537 \text{ GJ}} = \frac{x \text{ kg}_{C_3H_8}}{2.917 \text{ GJ}} \quad \rightarrow \quad 63.000 \text{ kg } C_3H_8 \text{ evitados}$$

$$Emisiones \text{ evitadas}_{CO_2} = Consumo_{CO_2(kg)} \cdot Factor \text{ Emisiones}_{CO_2-C_3H_8} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$Emisiones \text{ evitadas}_{CO_2} = 63.000 \text{ kg}_{C_3H_8} \cdot 2,94 \frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{kg}_{C_3H_8}}$$

Finalmente, se genera un ahorro de **185.220 kg CO₂/año**. Este ahorro corresponde exclusivamente a la reducción de emisiones derivadas del consumo energético y no contempla aún los beneficios asociados al tratamiento de residuos.

Captura de metano biogénico

El proceso de digestión anaerobia permite capturar y valorizar el metano generado en la descomposición de materia orgánica. En condiciones aerobias o sin tratamiento adecuado, residuos como estiércol bovino, suero lácteo o lodos de depuradora generan emisiones de CH₄ que contribuyen al calentamiento global. El potencial de calentamiento global (GWP) del metano es 28 veces superior al del CO₂ en un horizonte de 100 años [35].

Se estima que con la digestión anaerobia se podrían capturar y aprovechar 217,96 m³ de CH₄ diarios, lo que equivale a:

$$217,96 \text{ m}^3/\text{día} \times 365 \text{ días} = 79.555 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{año}$$

Dado que 1 m³ de metano equivale a 0,67 kg [28], esto supone:

$$\text{Masa de CH}_4 \text{ evitado} \approx 79.555 \text{ m}^3 \times 0,67 \text{ kg/m}^3 = 53.302 \text{ kg CH}_4/\text{año}$$

El impacto climático evitado por la valorización del metano se calcula como:

$$53.302 \text{ kg CH}_4 \times 28 \text{ (GWP)} \approx 1.492.456 \text{ kg CO}_2\text{-eq/año}$$

Este cálculo supone una captura completa del metano generado por la digestión, lo cual es viable bajo condiciones operativas estables y controladas.

Emisiones evitadas por tratamiento de residuos

El uso de digestión anaerobia como alternativa al compostaje tradicional o al vertido permite reducir emisiones de GEI asociadas al manejo convencional de residuos orgánicos. En el caso del estiércol y los lodos, se evitaría la generación de emisiones directas de CH₄ y N₂O durante la descomposición aerobia prolongada [36]. En particular:

- El estiércol bovino en sistemas de gestión tradicionales puede emitir entre 0,1 y 0,2 m³ CH₄ por kg de SV si no se gestiona adecuadamente [37].
- La aplicación directa de lodos no estabilizados también conlleva emisiones difusas de metano y óxidos de nitrógeno, evitables mediante estabilización anaerobia.

En resumen, se estima que la instalación permitiría evitar anualmente:

- 185.220 kg de CO₂ (sustitución de propano)
- 1.492.456 kg de CO₂-eq (captura de CH₄ biogénico)
- A lo que habría que añadir las emisiones difusas evitadas por tratamiento mejorado de residuos

El balance potencial total se sitúa por encima de **1.677.676 kilogramos equivalentes de CO₂ evitadas al año**, una contribución climática significativa en el marco de los objetivos europeos y nacionales de descarbonización.

5.2 Impactos positivos en la gestión de residuos

Además del aprovechamiento energético, la digestión anaerobia tiene un impacto muy positivo en la gestión de residuos. Esta tecnología es capaz de tratar y valorizar residuos de muy distinta naturaleza, tanto líquidos como sólidos, lo que la convierte en una herramienta especialmente útil para entornos agroindustriales complejos [8], como La Fageda.

Actualmente, los residuos generados en la actividad de la empresa (estiércoles, suero, restos frutales y lodos de depuradora) se gestionan a través de compostaje y envío a gestores autorizados. Aunque estas estrategias permiten estabilizar la materia orgánica, presentan limitaciones: no recuperan el potencial energético de los residuos, implican tiempos de maduración largos y generan emisiones no controladas de gases de efecto invernadero y olores durante el proceso [31].

La digestión anaerobia, en cambio, permite:

- Reducir el volumen y peso de los residuos, al degradar una parte significativa de la fracción orgánica biodegradable. Según diversas fuentes, el proceso permite reducir entre el 30 % y el 50 % de la materia seca [13].
- Eliminar patógenos: en función del régimen térmico, especialmente si se opera en condiciones termofílicas, se produce una higienización parcial del residuo, facilitando su posterior uso agrícola [32].
- Reducir emisiones de olor: al tratarse de un sistema cerrado, se minimizan las emisiones de compuestos volátiles como el amoníaco o el sulfuro de hidrógeno, que sí están presentes en el compostaje [10].
- Disminuir la carga orgánica líquida a tratar en la EDAR: al codigirir residuos líquidos como el suero y reducir su carga en DQO, se disminuye el volumen y la carga contaminante que llega a la depuradora, mejorando su eficiencia y reduciendo costes [27].
- Revalorizar internamente residuos actualmente gestionados por terceros, lo que reduce la dependencia de gestores, costes de transporte y riesgos normativos.

En el contexto de La Fageda, la digestión anaerobia permitiría integrar en un solo proceso residuos ganaderos, lácteos, frutales y lodos, facilitando una gestión descentralizada, en planta, más eficiente, trazable y controlada.

5.3 Valor agronómico del digestato como fertilizante

El digestato generado en la planta de biogás de La Fageda representa un subproducto con un alto potencial agronómico. Este material, compuesto por la fracción no degradada de los residuos, biomasa microbiana muerta y nutrientes minerales, posee propiedades que permiten su uso como fertilizante orgánico o enmienda del suelo [12].

Tal como se estimó en el capítulo 4, el digestato se genera tras la degradación del 40–60 % de los sólidos volátiles (SV), manteniendo un contenido elevado de agua ($\approx 90\%$). Su composición varía en función de los residuos tratados, pero en general presenta:

- Fracción líquida: rica en nitrógeno amoniacal, potasio soluble y fósforo biodisponible. Es apta para fertirrigación o aplicación directa, especialmente en cultivos de rotación o praderas [8].
- Fracción sólida: contiene materia orgánica estabilizada, fósforo total y micronutrientes. Su aporte al suelo mejora la estructura, retención hídrica y contenido de carbono, siendo adecuada para compostaje [28].

La aplicación del digestato contribuye, por tanto, a la mejora de la fertilidad del suelo y al cierre de ciclos de nutrientes dentro del sistema agroganadero. Diversos estudios han demostrado que el digestato puede sustituir parcialmente fertilizantes nitrogenados y fosfatados, con eficiencias agronómicas comparables, siempre que se aplique de forma adecuada [12] [31].

La normativa española permite la utilización del digestato en agricultura bajo las condiciones establecidas en el Real Decreto 506/2013 sobre productos fertilizantes. Además, la Guía sobre utilización agrícola del digestato del MITECO establece requisitos analíticos (nutrientes, metales pesados, patógenos), criterios de aplicación y medidas de control para prevenir impactos negativos en el entorno [32].

En Cataluña, la Estrategia Catalana del Biogás 2024–2030 fomenta expresamente la valorización agronómica del digestato, y contempla incentivos para proyectos que integren digestión anaerobia y aprovechamiento agrícola local [18].

Para concluir, la Fageda puede hacer uso de su infraestructura presente del compostaje para la fracción sólida del digestato, mejorando su maduración y reduciendo olores. Por su parte, la fracción líquida podría aplicarse directamente como fertilizante líquido, en rotación con fertilizantes químicos.

De esta forma, el digestato permitiría cerrar el ciclo de nutrientes en la finca, reduciendo la dependencia de productos externos y alineando el modelo de producción de La Fageda con los principios de la economía circular y la agroecología.

6. Estudio económico de viabilidad

6.1 Costes de inversión inicial y mantenimiento

El análisis económico preliminar para la implantación de una planta de digestión anaerobia en La Fageda requiere estimar los costes asociados a la inversión inicial (CAPEX) y a la operación y mantenimiento anual (OPEX). Estos valores pueden variar significativamente en función del tamaño de la planta, la tecnología empleada y las características del sitio, por lo que se ha optado por utilizar rangos de referencia validados por organismos técnicos y experiencias reales de implementación.

6.1.1. Tipo de planta considerado

Se plantea una planta de biogás agroindustrial, basada en un digestor de mezcla completa (CSTR) operando en condiciones mesofílicas (35–37 °C), con un volumen útil de 415 m³ y un volumen total aproximado de 467 m³, equivalente a una alimentación diaria de 15 toneladas de residuos. El sistema incluye almacenamiento de biogás mediante gasómetro, sistema de agitación, calefacción interna, pretratamiento mecánico y sistema de control y monitorización.

6.1.2. Coste de inversión

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), el coste de inversión de una planta de biogás de mediana escala puede estimarse entre 1.800 y 2.500 €/kW eléctrico instalado, en función del grado de automatización y complejidad del proyecto [38]. Para plantas de menor escala orientadas a cogeneración térmica o solo calor, este valor puede oscilar entre 700 y 1.200 €/m³ de volumen útil del digestor [39].

Considerando el volumen útil de 415 m³, y aplicando un ratio conservador de 1.000 €/m³:

$$CAPEX \text{ Estimado} = \text{Volumen útil}_{CH_4} (m^3) \cdot \text{Coste Inversión} \left(\frac{\text{€}}{m^3} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$CAPEX \text{ Estimado} = 415 m^3 \cdot 1.000 \frac{\text{€}}{m^3} = 415.000 \text{ €}$$

A esta cifra se le añaden los costes de ingeniería, obra civil, permisos y conexión de servicios auxiliares, estimados en un 15–20 % adicionales [40]. Por tanto, el presupuesto total de inversión se sitúa entre **477.250 y 498.000 €**.

Estos valores están alineados con estimaciones del sector. Según el blog técnico de Miogas, una planta de pequeña a mediana escala con cogeneración puede tener costes de inversión entre 500.000 y 900.000 €, incluyendo digestor, motogenerador, gasómetro, sistemas auxiliares y obra civil [41].

6.1.3. Costes de operación y mantenimiento (OPEX)

El coste anual de operación y mantenimiento (O&M) de una planta de biogás incluye consumos energéticos, control del proceso, mantenimiento mecánico y análisis de proceso. Según IRENA y la literatura técnica, los costes de O&M suelen representar entre 4 % y 10 % del CAPEX [42].

$$OPEX \text{ Anual} = CAPEX \cdot \text{Estimación de costes O\&M} \quad \text{Ecuación 8}$$

Tomando un valor medio del 7 %:

$$OPEX \text{ Anual} = 415.000 \cdot 0,07 = 29.050 \text{ €}$$

El mantenimiento incluye revisiones mecánicas, limpieza de sistemas de alimentación y evacuación, calibración de sensores y eventuales sustituciones de piezas de desgaste. El coste del personal técnico puede estimarse aparte si no se dispone de recursos internos, aunque en muchos casos se integra parcialmente con el personal ya disponible en instalaciones agroindustriales [43].

La siguiente tabla recoge un resumen estimativo de cuales serían los costes principales de la inversión y el mantenimiento de una planta de biogás con características como las descritas:

Tabla 3. Principales costes y vida útil del proyecto

Concepto	Valor estimado
Inversión total (CAPEX)	477.250 – 498.000 €
Coste por m³ útil de digestor	~1.000 €/m ³
O&M anual (7 % de CAPEX)	~29.050 €/año
Vida útil estimada del sistema	15 – 20 años

Esta estimación proporciona una base sólida para evaluar la viabilidad económico-financiera del proyecto en los siguientes apartados.

6.2 Ahorros energéticos y reducción de costes en la gestión de residuos

La integración de una planta de biogás en las instalaciones de La Fageda permite no solo generar energía renovable in situ, sino también reducir significativamente los costes operativos asociados tanto al consumo de combustibles fósiles como a la gestión de residuos orgánicos.

Ahorros por sustitución energética

La planta de biogás proyectada tiene una capacidad de producción de aproximadamente 363,26 m³ de biogás por día, lo que equivale a 2.216 kWh/día o unos 810 MWh al año, considerando un poder calorífico inferior (PCI) medio de 6,1 kWh/m³, típico del biogás crudo al 60 % de metano [34]. Esta producción energética sería suficiente para cubrir parcialmente el consumo actual de propano en un 34,17%.

A nivel económico, con un precio medio del propano de 110 €/MWh [45], el ahorro derivado de esta sustitución energética alcanzaría los 89.000 €/año. Esta cifra representa un ahorro significativo en la factura energética y contribuiría a una mayor estabilidad frente a la volatilidad de los precios del gas en los mercados internacionales.

Esta cifra representa un ahorro significativo en la factura energética, y supone además una mayor estabilidad frente a la volatilidad de los precios del gas en los mercados internacionales [41].

Ahorros en gestión de residuos

Actualmente, La Fageda gestiona diversas corrientes de residuos orgánicos: estiércol bovino, suero lácteo, restos de fruta y lodos de EDAR. Algunas de estas fracciones requieren tratamiento

externo o transporte a plantas de compostaje o gestores autorizados, lo cual implica un coste económico y logístico.

El coste medio de gestión de residuos orgánicos en España, según datos recogidos por IDAE y el ICAEN, oscila entre 20 y 40 €/tonelada dependiendo del tipo de residuo y el destino final [39] [40]. Suponiendo un volumen de 15 toneladas diarias tratadas en la planta de biogás (≈ 5.475 t/año), el ahorro por evitar el tratamiento externo puede estimarse de forma conservadora:

$$Ahorro_{Gestión\ Residuos} = Residuos \left(\frac{ton}{año} \right) \cdot Costes_{Gestión\ Residuos} \quad Ecuación\ 9$$

$$Ahorro_{Gestión\ Residuos} = 5.475 \frac{ton}{año} \cdot 30 \frac{€}{ton} = 164.250 \frac{€}{año}$$

Este cálculo no incluye el valor añadido derivado del digestato ni otros ahorros indirectos como la reducción de la carga en la EDAR. Si se consideran también los costes asociados a transporte y cánones ambientales, el ahorro real podría superar los 180.000 €/año, especialmente en el caso de fracciones líquidas con alta carga orgánica, como el suero [44].

Ahorro total combinado

Combinando los ahorros estimados por sustitución energética y los costes evitados en la gestión de residuos, se puede proyectar un ahorro operativo total cercano a:

$$Ahorro_{Total} = 89.000€ + 164.250€ = 253.250€$$

Este resultado respalda la viabilidad económica del proyecto, y demuestra que, más allá del retorno energético, la planta de biogás actúa como una herramienta eficaz para optimizar los costes estructurales de producción y reducir la dependencia de agentes externos.

6.3 Subvenciones y ayudas aplicables

La instalación de una planta de biogás en La Fageda se enmarca dentro de las prioridades de transición energética, economía circular y descarbonización que promueven tanto la Unión Europea como las administraciones española y catalana. En consecuencia, existen diversas líneas de subvención y apoyo financiero que podrían aplicarse total o parcialmente a un proyecto de este tipo.

1. Ayudas estatales – Programa de incentivos al biogás (IDAE)

El programa estatal de apoyo a instalaciones de producción de biogás, gestionado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), contempla subvenciones a fondo perdido para proyectos que utilicen residuos biodegradables, especialmente en ámbito agroindustrial [46].

Este programa, dotado con 150 millones de euros provenientes de fondos Next Generation EU, contempla ayudas de hasta 65 % de la inversión subvencionable para pymes agroalimentarias, cobertura para obra civil, digestor, pretratamientos, almacenamiento, valorización del biogás y control de emisiones, priorización de proyectos integrales con gestión local de residuos y autoconsumo.

Aunque la convocatoria 2022-2023 ya ha sido resuelta, está prevista una ampliación o reedición en el marco del PERTE de energías renovables y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [40].

2. Programas europeos – Horizonte Europa y LIFE

A nivel europeo, existen varios instrumentos que permiten cofinanciar inversiones en bioenergía y tecnologías de valorización de residuos:

- **Programa LIFE**, en su subprograma de economía circular, cofinancia hasta el 60 % del coste elegible en proyectos que introduzcan tecnologías limpias y replicables [48].
- **Horizonte Europa – Clúster 5 (Clima, Energía y Movilidad)**, financia proyectos piloto e innovación en procesos de generación y uso de biogás, especialmente si se integran en cadenas agroalimentarias sostenibles [49].

Estos fondos exigen una formulación técnica sólida, un consorcio o colaboración institucional, y una justificación detallada del impacto ambiental y social del proyecto.

3. Ayudas autonómicas – Cataluña

En el caso catalán, el Institut Català d'Energia (ICAEN) y el Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural disponen de líneas específicas para energías renovables y agroindustrias sostenibles. Destacan:

- Ayudas a instalaciones de biogás en zonas rurales (publicadas en 2023), con cobertura de hasta 40–50 % del coste elegible [47].
- Incentivos a proyectos acogidos a la Estrategia Catalana del Biogás, que promueve la implantación de pequeñas y medianas plantas en entornos locales [39].
- Compatibilidad con programas de eficiencia energética o mejora ambiental en explotaciones ganaderas y agroindustriales.

Además, Cataluña suele actuar como canalizador de fondos europeos en convocatorias propias, lo que puede facilitar la tramitación y ajuste a la escala del proyecto.

4. Ventajas complementarias

Además de ayudas directas, un proyecto como el de La Fageda puede beneficiarse de, deducciones fiscales en el Impuesto de Sociedades por inversiones en eficiencia energética o reducción de huella de carbono [50], así como de la reducción de tasas de vertido o gestión de residuos, al disminuir la generación de subproductos no valorizados. También existen bonificaciones medioambientales en licencias o tributos locales, según el municipio o consorcio comarcal.

6.4 Retorno de la inversión (ROI) y payback estimado

El análisis del retorno de la inversión (ROI) y del período de amortización (payback) es esencial para determinar la viabilidad económica del proyecto de digestión anaerobia en La Fageda. Este análisis se basa en los costes de inversión y operación presentados en el apartado 6.1 y en los ahorros generados, detallados en el apartado 6.2.

A partir de la información recopilada y validada, se toman la *Tabla 4* tomará las siguientes estimaciones conservadoras sobre la recuperación económica.

Tabla 4. Resumen de los resultados obtenidos en el análisis económico para la inversión y mantenimiento de una planta de biogás.

Concepto	Valor corregido
CAPEX total	485.000 €
OPEX anual	29.050 €/año
Ahorro energético por sustitución de propano	89.000 €/año
Ahorro por gestión interna de residuos	25.000 €/año
Subvención pública (35 % CAPEX) [46]	145.250 €

- El **retorno sobre la inversión** (ROI) se calcula como:

$$ROI = \frac{\text{Beneficio Neto Aual}}{\text{Inversión inicial}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

Considerando el beneficio neto como la suma del ahorro energético en la gestión de residuos, menos los costes operativos anuales:

$$ROI = \frac{89.000 + 25.000\text{€} - 29.050\text{€}}{485.000\text{€}} \cdot 100 = 17,50\%$$

Esto indica una recuperación de la inversión en, aproximadamente, 5 años y medio.

Además del ROI económico, deben considerarse los beneficios ambientales (reducción de emisiones, economía circular) y reputacionales de la empresa ante clientes e instituciones. Sin embargo, existen factores como fluctuación del precio del propano, variabilidad de producción de residuos o disponibilidad de subvenciones pueden afectar estos valores.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Síntesis de resultados

El estudio de viabilidad para la implantación de una planta de biogás en La Fageda ha demostrado un alto potencial de aprovechamiento energético, medioambiental y económico a partir de los residuos generados en sus actividades agroindustriales. La valorización de estiércol bovino, suero lácteo, restos de fruta y lodos de EDAR mediante digestión anaerobia permitiría transformar residuos actualmente infrutilizados en energía renovable y biofertilizantes.

Desde el punto de vista técnico, se ha propuesto un digestor anaerobio de mezcla completa, operado en condiciones mesofílicas, con capacidad para tratar 15 toneladas diarias de residuo húmedo. El sistema permitiría una producción estimada de 363,26 m³/día de biogás, equivalente a aproximadamente 7,99 GJ/día de energía, lo que daría para cubrir el consumo de propano casi en su totalidad.

En el ámbito ambiental, la sustitución parcial del gas propano por biogás permitiría evitar la emisión de unas 500 toneladas de CO₂ al año, además de reducir emisiones indirectas derivadas de la fermentación de estiércoles, del uso de fertilizantes minerales y del transporte externo de residuos. Asimismo, el uso del digestato como fertilizante contribuiría a cerrar el ciclo de nutrientes y a reforzar la estrategia de economía circular implementada por la empresa.

Económicamente, se ha estimado una inversión inicial de entre de unos 415.000 euros, con costes operativos anuales de mantenimiento en el entorno del 10 % de la inversión. La valorización energética permitiría un ahorro anual de aproximadamente 115.000 € entre reducción de consumo de propano y costes evitados en gestión de residuos. Este escenario, considerando líneas de ayudas públicas disponibles, situaría el retorno de la inversión en un plazo en torno a los 5 años, reforzando la viabilidad económica del proyecto en el medio plazo.

En conjunto, la planta de biogás representa una solución eficiente y sostenible para La Fageda, alineada con los compromisos ambientales, la autosuficiencia energética y los principios de producción responsable. Este modelo podría servir de referencia para otras iniciativas similares en el ámbito agroalimentario catalán y nacional.

7.2 Conclusiones generales del estudio de viabilidad

El presente estudio ha abordado de manera integral la viabilidad técnica, ambiental y económica de implantar una planta de biogás en La Fageda. A la luz de los resultados obtenidos y de los objetivos definidos al inicio del trabajo, se puede afirmar que estos se han cumplido en su totalidad:

- 1. Caracterizar los residuos generados por la empresa.**

Se ha realizado un análisis detallado de los residuos orgánicos generados por La Fageda, incluyendo estiércol bovino, suero lácteo, restos de fruta y lodos de depuradora. Se identificaron sus volúmenes anuales, características fisicoquímicas y estacionalidad, basándose en fuentes bibliográficas sectoriales y la memoria de sostenibilidad de la empresa.

2. **Proponer un nuevo proceso de tratamiento de residuos que incluya un digestor.**

En el capítulo 4 se desarrolló un nuevo esquema de valorización mediante digestión anaerobia, proponiendo un digestor de mezcla completa en condiciones mesofílicas. Este sistema permite integrar todas las fracciones orgánicas disponibles, optimizando el aprovechamiento energético y reduciendo los impactos de la gestión actual.

3. **Diseñar un modelo preliminar de planta de biogás adaptado a dichos residuos.**

Se dimensionó un digestor de 415 m³ de volumen útil y de unos 467 m³ de volumen total, capaz de tratar 15 toneladas diarias de residuos. Se definieron los parámetros operativos clave (TRH, COV, mezcla de entrada) y se propuso un esquema técnico completo, incluyendo pretratamiento, almacenamiento de biogás y gestión del digestato.

4. **Analizar los impactos ambientales del sistema propuesto.**

En el capítulo 5 se presenta una estimación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (≈ 500 t CO₂/año), junto con beneficios en la gestión de residuos, mejora de la fertilidad del suelo mediante digestato y contribución a la economía circular y a la descarbonización de la industria agroalimentaria.

5. **Identificar barreras y oportunidades para su implementación.**

A lo largo del capítulo 6 se exploraron los aspectos económicos y regulatorios del proyecto, estimando costes de inversión, ahorros energéticos y retornos. Se identificaron oportunidades en forma de ayudas públicas (IDAE, fondos europeos) y se reconocieron barreras como la escala limitada, la logística del biogás o la necesidad de integración operativa. No obstante, los resultados apuntan a una viabilidad sólida con un retorno estimado en torno a los 5 años.

En conclusión, el estudio demuestra que La Fageda dispone de las condiciones técnicas y ambientales adecuadas para poner en marcha una planta de biogás. Este sistema permitiría avanzar hacia un modelo energético más autónomo, sostenible y alineado con los objetivos de neutralidad climática y economía circular establecidos en la estrategia ambiental de la empresa.

7.3 Recomendaciones para la empresa

A la luz del análisis técnico, ambiental y económico desarrollado en este estudio de viabilidad, se proponen las siguientes recomendaciones estratégicas para La Fageda con el objetivo de facilitar la implementación progresiva de una planta de biogás y maximizar su impacto positivo:

a) **Priorizar la valorización energética de los residuos disponibles**

Dada la heterogeneidad y volumen de residuos orgánicos generados, particularmente estiércol bovino, suero lácteo y restos de fruta, se recomienda avanzar hacia su valorización mediante digestión anaerobia como solución centralizada y sostenible. Esto permitiría transformar pasivos ambientales en activos energéticos, reducir costes operativos y cerrar el ciclo de nutrientes en finca.

b) Iniciar una fase piloto o modular del proyecto

Se sugiere valorar una implantación progresiva, comenzando con una planta de escala intermedia capaz de tratar ~15 toneladas/día. Esta opción reduce la inversión inicial, facilita la integración operativa y permite validar los rendimientos reales del sistema antes de una posible ampliación futura.

c) Aprovechar las infraestructuras existentes

La presencia de una planta de compostaje y de una red de recogida de residuos orgánicos es una ventaja clave. Se recomienda integrar el digestato sólido en los procesos actuales de compostaje, y valorar la aplicación del digestato líquido en cultivos propios o en colaboración con explotaciones agrícolas cercanas.

d) Optimizar el aprovechamiento energético del biogás

Aunque inicialmente se contemple el autoconsumo térmico (por ejemplo, sustituyendo el uso actual de gas propano en procesos de pasteurización), se recomienda evaluar a medio plazo la instalación de un sistema de cogeneración (CHP). Esta alternativa permitiría producir simultáneamente electricidad y calor, aumentando el rendimiento global del sistema.

e) Acceder a líneas de financiación pública

Se aconseja realizar un seguimiento activo de convocatorias de ayudas a nivel nacional (IDAE, MITECO) y europeo (Next Generation, LIFE, Horizon Europe), así como de las específicas de Cataluña (ICAEN), con el fin de cubrir parte de los costes de inversión. Se recomienda designar un equipo técnico o consultoría especializada para la tramitación de subvenciones y permisos.

f) Establecer alianzas con centros tecnológicos o universidades

La colaboración con entidades expertas en bioenergía puede facilitar el diseño detallado del sistema, el seguimiento de indicadores de rendimiento (producción de gas, calidad del digestato, emisiones) y la obtención de datos científicos útiles para futuras ampliaciones o replicaciones del modelo.

g) Fortalecer la comunicación del proyecto

Dado el carácter social, ambiental y económico del proyecto, se sugiere incluir esta iniciativa en las memorias de sostenibilidad de la empresa y utilizarla como herramienta de comunicación con consumidores, empleados y administraciones públicas. El proyecto puede servir como ejemplo replicable de transición ecológica en el sector agroalimentario catalán.

Bibliografía

- [1] International Energy Agency. (2022). *World Energy Outlook 2022*. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [2] European Commission. (2022). *REPowerEU Plan*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu_en
- [3] IPCC. (2023). *Sixth Assessment Report – Synthesis Report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [4] IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- [5] United Nations. (2021). *Our Common Agenda*. <https://www.un.org/en/common-agenda>
- [6] Núñez Sarompas, A. (2021). *Manual de biomasa y biocombustibles: uso y aprovechamiento energético* (2.^a ed.). Centro de Estudios Financieros. ISBN 978-84-454-4121-3.
- [7] International Energy Agency. (2024). *Bioenergy use by sector globally in the Net Zero Scenario, 2010-2030*. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/bioenergy-use-by-sector-globally-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>
- [8] Mata-Alvarez, J., Dosta, J., & Macé, S. (2010). *Fundamentals and practice of anaerobic digestion*. Universitat de Barcelona.
- [9] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2022). *Guía técnica sobre valorización energética de residuos mediante biogás*. <https://www.idae.es/publicaciones>
- [10] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2018). *Biogas for road vehicles: Technology brief*. <https://www.irena.org/publications>
- [11] IPCC. (2021). *AR6 Climate Change: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [12] Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 160, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.016>
- [13] Muñoz, R., & Meza, C. (2017). Digestión anaerobia: tratamiento de residuos orgánicos y producción de biogás. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 21(3), 45–52. <https://www.scielo.org.pe>
- [14] López Cabanes, J. M. (2008). *Digestión anaerobia de lodos de depuradora: etapas controlantes y cinética del proceso* [Tesis doctoral, Universidad de Alicante]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/10045/11805>
- [15] Rodríguez-Abalde, Á., & Lema, J. M. (2014). Biogás a pequeña escala: experiencias en el medio rural. *Revista CYTEMA*, 6(1), 33–42. <https://digital.csic.es/handle/10261/88439>
- [16] González-Tomé, L., & Cuevas, P. (2022). Codigestión de purines y suero lácteo: una revisión del rendimiento energético. *Revista CYTEMA*, 10(1), 33–45. <https://digital.csic.es/handle/10261/288472>

- [17] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2021). *Guía para el aprovechamiento energético de residuos agroalimentarios*. <https://www.idae.es/publicaciones>
- [18] Generalitat de Catalunya. (2024). *Estrategia Catalana del Biogás 2024–2030*. Institut Català d’Energia (ICAEN). <https://icaen.gencat.cat/ca/estrategia-bioenergia>
- [19] Institut Català d’Energia (ICAEN). (2023). *Informe técnico de potencial de biogás en Cataluña*. <https://icaen.gencat.cat>
- [20] Enagás. (2023). *Caso Noguera Renovables: primera inyección de biometano en red en España*. <https://www.enagas.es>
- [21] Fundación La Fageda. (2023). Memoria de sostenibilidad 2022. <https://www.fageda.com>
- [22] La Fageda. (s.f.). Nuestra historia. <https://www.fageda.com/es/la-historia>
- [23] Fundación La Fageda. (2024). Memoria de sostenibilidad 2023. <https://www.fageda.com>
- [24] Fundación La Fageda. (2023). Sistema de producción ganadera. <https://www.fageda.com/granja>
- [25] Institut Català d’Energia (ICAEN). (2021). Diagnosi energètica del sector làctic a Catalunya. <https://icaen.gencat.cat>
- [26] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2021). Hoja de Ruta del Biogás. <https://www.miteco.gob.es>
- [27] Parra-Huertas, R. A. (2010). Digestión anaerobia de lactosuero: efecto de altas cargas puntuales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1), 5385–5394. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17911761036>
- [28] Cesano, M. M. (2024). Potencial metanogénico de residuos agroindustriales en co-digestión con macroalgas. *Actas 7as Jornadas Doctorales UTN*. <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/rtyc/article/view/598>
- [29] Molinuevo, B., Riaño, B., & García, M. C. (2022). La digestión anaerobia como vía de valorización para el lactosuero. ITACyL – Innovagri. <https://rica.chil.me/post/valoracion-energetica-del-lactosuero-mediante-codigestion-289356>
- [30] Redondo, J., et al. (1995). Relación carbono/nitrógeno en abonos orgánicos. Ayuntamiento de Lleida – Agenda 21. <https://urbanisme.paeria.cat>
- [31] Córdova, D., & Méndez, R. (2017). Codigestión anaerobia de residuos agroindustriales: fundamentos y experiencias en España. *Revista Ingeniería Ambiental*, 38(2), 45–56. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6467818>
- [32] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2021). *Guía sobre utilización agrícola del digestato*. <https://www.miteco.gob.es>
- [33] IDAE – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2022). *Valores medios de poder calorífico de combustibles*. <https://www.idae.es>

- [34] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2021). *Factores de emisión de GEI para el cálculo de la huella de carbono*. <https://www.miteco.gob.es>
- [35] IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report – Climate Change: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch>
- [36] FAO. (2018). *Livestock and climate change mitigation*. <http://www.fao.org>
- [37] Naciones Unidas. (2021). *Objetivos de Desarrollo Sostenible – Agenda 2030*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- [38] Miogas. (2025). *Estimación de costes para plantas agroindustriales*.
- [39] Institut Català d’Energia. (2024). *Estratègia Catalana del Biogàs 2024–2030*. <https://icaen.gencat.cat>
- [40] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2022). *Hoja de Ruta del Biogás*. <https://www.idae.es/publicaciones>
- [41] Energía Estratégica. (2023). *Convocatorias y costes del biogás agroindustrial*.
- [42] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022). *Guía técnica sobre valorización energética de residuos mediante biogás*. <https://www.miteco.gob.es>
- [43] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Biogas production and use in agriculture*.
- [44] European Biogas Association. (2023). *Technical factsheets*. <https://www.europeanbiogas.eu>
- [45] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Coste de producción del biogás y digestato*. <https://www.miteco.gob.es>
- [46] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2023). *Resolución del Programa de Incentivos a Instalaciones de Biogás*.
- [47] Generalitat de Catalunya. (2024). *Ayudas a instalaciones de biogás en entornos rurales*.
- [48] European Commission. (2023). *LIFE Programme – Environment and Climate Action*. Retrieved from <https://ec.europa.eu/easme/en/section/life>
- [49] European Commission. (2023). *Horizon Europe – Work Programme 2023–2024: Cluster 5 – Climate, Energy and Mobility*. Retrieved from <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020>
- [50] Agencia Tributaria. (2023). *Incentivos fiscales medioambientales: Guía práctica del Impuesto de Sociedades*. Retrieved from <https://www.agenciatributaria.es>

ANEXOS

ANEXO I. Cálculos para la producción de biogás por corrientes de residuos:

Para los cálculos realizados, se toman como variables los parámetros resumidos en la *Tabla 1* de este proyecto. Se procede a calcular la producción de biogás para cada corriente, así como los resultados globales y su conversión en biogás total generado:

- Estiércol + Purines:**

$$SV_{Estiércol} \left(\frac{kg}{día} \right) = 13.300 \left(\frac{kg}{día} \right) \cdot \left(\frac{10\%}{100} \right) \cdot \left(\frac{75\%}{100} \right) = 997,50 \frac{kg}{día}$$

$$CH_4 \text{ bruto } Estiércol \left(\frac{m^3}{día} \right) = 997,50 \left(\frac{kg}{día} \right) \cdot 0,2 \left(\frac{m^3}{kg \text{ SV}} \right) = 199,50 \frac{m^3}{día}$$

$$CH_4 \text{ útil } Estiércol = 199,50 \cdot 0,9 = 179,55 \frac{m^3}{día}$$

$$Biogás_{Estiércol} \left(\frac{m^3}{día} \right) = \frac{179,55}{0,6} = 299,25 \frac{m^3}{día}$$

- Suero Lácteo:**

$$SV_{Suero} \left(\frac{kg}{día} \right) = 1.095 \left(\frac{kg}{día} \right) \cdot \left(\frac{6\%}{100} \right) \cdot \left(\frac{95\%}{100} \right) = 62,42 \frac{kg}{día}$$

$$CH_4 \text{ bruto } Suero \left(\frac{m^3}{día} \right) = 62,42 \left(\frac{kg}{día} \right) \cdot 0,35 \left(\frac{m^3}{kg \text{ SV}} \right) = 21,85 \frac{m^3}{día}$$

$$CH_4 \text{ útil } Suero = 21,85 \cdot 0,9 = 19,67 \frac{m^3}{día}$$

$$Biogás_{Suero} \left(\frac{m^3}{día} \right) = \frac{19,67}{0,6} = 32,78 \frac{m^3}{día}$$

- Restos de Fruta:**

$$SV_{Fruta} \left(\frac{kg}{día} \right) = 469 \left(\frac{kg}{día} \right) \cdot \left(\frac{15\%}{100} \right) \cdot \left(\frac{90\%}{100} \right) = 63,32 \frac{kg}{día}$$

$$CH_4 \text{ bruto } Fruta \left(\frac{m^3}{día} \right) = 63,32 \left(\frac{kg}{día} \right) \cdot 0,3 \left(\frac{m^3}{kg \text{ SV}} \right) = 19,00 \frac{m^3}{día}$$

$$CH_4 \text{ útil } Fruta = 19,00 \cdot 0,9 = 17,10 \frac{m^3}{día}$$

$$Biogás_{Fruta} \left(\frac{m^3}{día} \right) = \frac{17,10}{0,6} = 28,50 \frac{m^3}{día}$$

- **Lodos EDAR:**

$$SV_{Lodos} \left(\frac{kg}{día} \right) = 135 \left(\frac{kg}{día} \right) \cdot \left(\frac{15\%}{100} \right) \cdot \left(\frac{60\%}{100} \right) = 12,15 \frac{kg}{día}$$

$$CH_4 \text{ bruto } Lodos \left(\frac{m^3}{día} \right) = 12,15 \left(\frac{kg}{día} \right) \cdot 0,15 \left(\frac{m^3}{kg \text{ SV}} \right) = 1,82 \frac{m^3}{día}$$

$$CH_4 \text{ útil } Lodos = 1,82 \cdot 0,9 = 1,64 \frac{m^3}{día}$$

$$Biogás \text{ } Lodos \left(\frac{m^3}{día} \right) = \frac{1,64}{0,6} = 2,73 \frac{m^3}{día}$$

El sumatorio de todas las corrientes dará el metano útil y el biogás generados diariamente:

$$\sum_{\text{Estiércol}}^{Lodos \text{ EDAR}} CH_4 \text{ bruto} = 217,96 \frac{m^3}{día}$$

$$\sum_{\text{Estiércol}}^{Lodos \text{ EDAR}} Biogás = 363,26 \frac{m^3}{día}$$

Finalmente, se procede a calcular el Potencial Energéticos del metano generado:

$$Energía_{biogás} = 363,26 \frac{m^3}{año} \cdot 22 \frac{MJ}{m^3} \cdot 365 \frac{días}{año} = 2.916.978 \text{ MJ} \cong 2.917 \text{ GJ}$$