

Financiado por:



Junta de Andalucía

Consejería de Transformación Económica,
Industria, Conocimiento y Universidades



TECNOLOGÍAS DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DEL SECTOR OLEÍCOLA

DIGESTIÓN ANAEROBIA



Elaborado por:



**CIT
OLIVA**
CENTRO TECNOLÓGICO
DEL OLIVAR Y
EL ACEITE

INDICE

1.	El proceso de digestión anaerobia.....	4
1.1.	Parámetros del proceso de digestión anaerobia.....	5
	Temperatura	5
	pH	6
	Relación carbono/nitrógeno (C/N).....	7
	Tiempo de retención hidráulica (TRH).....	7
1.2.	Etapas del proceso de digestión anaerobia	8
	Hidrólisis	8
	Acetogénesis	9
	Metanogénesis.....	9
1.3.	Técnicas del proceso de digestión anaerobia: Tipos de biodigestores.....	10
	Biodigestores de flujo pistón.....	10
	Biodigestores de mezcla completa	11
	Biodigestores discontinuos	12
2.	Subproductos de la industria oleícola utilizables en el proceso de digestión anaerobia	12
2.1.	Alperujo.....	12
2.2.	Poda y Hojín	13
2.3.	Hueso	13
3.	Productos obtenidos de la digestión anaerobia de los subproductos de la industria oleícola.	14
3.1.	Biogás	14
3.2.	Digestato.....	15
4.	Industria andaluza dedicada a la gasificación de biomasa	16
5.	Patentes sobre técnicas dedicadas a la digestión anaerobia	19
6.	Proyectos de investigación sobre la tecnología de digestión anaerobia de subproductos de la industria oleícola en Andalucía.....	32
7.	Análisis económico de la instalación de la tecnología de gasificación	34
7.1.	Costos de inversión inicial	34
	Construcción e infraestructura.....	34



Digestores anaeróbicos.....	34
Equipos auxiliares	34
Licencias y permisos	34
Consultoría e ingeniería	34
Elementos adicionales	35
7.2. Costos operativos anuales.....	35
Costos de personal.....	35
Costos de energía.....	35
Costos de materiales y productos consumibles.....	35
Costos de gestión de residuos.....	35
Costos de transporte de biomasa y residuos	36
Mantenimiento preventivo y correctivo	36
Costos administrativos y de gestión.....	36
Seguros y licencias	36
7.3. Ingresos estimados.....	36
Venta de energía generada a partir de biogás	36
Venta de digestato como fertilizante	36
Subvenciones y ayudas públicas	37
Créditos de carbono y certificaciones ambientales	37
7.4. Retorno de la inversión (ROI).....	37
Ejemplo de cálculo del ROI.....	37
8. Bibliografía.....	38

1. El proceso de digestión anaerobia

La digestión anaerobia, o biometanización, es un proceso biotecnológico controlado en el que los residuos orgánicos se descomponen en ausencia de oxígeno. Este proceso da como resultado la producción de biogás, una mezcla de gases compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), junto con un subproducto sólido o líquido conocido como digestato. Este último puede ser utilizado como fertilizante, mientras que el biogás se emplea para la generación de energía eléctrica y térmica. La digestión anaerobia es ampliamente utilizada para la valorización de residuos en sectores como la agricultura y la industria oleícola, donde los subproductos como el alperujo pueden ser transformados en energía (Flotats Ripoll et al., 2016).

El proceso se puede llevar a cabo en dos rangos de temperatura:

- Condiciones mesofílicas (15°C - 45°C), que son las más utilizadas en la digestión anaerobia, debido a su estabilidad y costo operativo relativamente bajo. Estas condiciones permiten que los microorganismos metanogénicos, responsables de la producción de biogás, se desarrollen de manera eficiente, aunque el proceso es algo más lento que en las condiciones termofílicas (Palau Estevan, 2016; Castro Rivera et al., 2020).

En los sistemas mesofílicos, los rangos óptimos de temperatura están entre 33°C y 38°C , donde se maximiza la producción de metano. Este rango es particularmente adecuado para tratar residuos orgánicos comunes, como estiércol y desechos agrícolas, que son abundantes y altamente biodegradables (Castro Rivera et al., 2020). La digestión anaerobia mesofílica es especialmente ventajosa en áreas rurales y granjas, donde el estiércol bovino y porcino son las fuentes predominantes de residuos, permitiendo un tratamiento eficiente de grandes volúmenes de materia orgánica (Palau Estevan, 2016).

La codigestión, que combina estiércol con otros residuos orgánicos (como restos vegetales), es una estrategia común bajo condiciones mesofílicas. Este enfoque ha mostrado un aumento en la producción de metano cuando se utilizan combinaciones adecuadas de sustratos. La mezcla de residuos agrícolas como el tomate o el maíz con estiércol mejora la calidad y cantidad del biogás producido (Castro Rivera et al., 2020). Además, estudios han demostrado que la producción de metano aumenta aproximadamente un 1% por cada grado de temperatura adicional dentro del rango mesofílico, destacando la importancia de un control preciso de la temperatura para optimizar el proceso (Palau Estevan, 2016).

- Las condiciones termofílicas, que operan en el rango de 45°C a 70°C , presentan ventajas significativas sobre las condiciones mesofílicas en términos de velocidad de reacción y producción de biogás. A temperaturas elevadas, las bacterias responsables de la digestión anaerobia se vuelven más activas, lo que acelera la descomposición de la materia orgánica y, por lo tanto, aumenta la producción de metano (Flotats Ripoll et al., 2016).

Bajo estas condiciones, el proceso puede ser entre 10 y 20 veces más rápido que en el rango mesofílico, lo que es particularmente ventajoso para tratar residuos



de alto contenido energético, como lodos industriales y ciertos residuos agrícolas. Según estudios, la digestión termofílica también ofrece una mayor remoción de patógenos y una mejor eficiencia en la eliminación de materia orgánica (Sarabia Méndez et al., 2017). Sin embargo, estas condiciones requieren mayor control y costos operativos más elevados, debido al consumo de energía necesario para mantener la temperatura dentro del rango óptimo. Además, el proceso es más sensible a cambios de temperatura, lo que implica un manejo más cuidadoso de los biodigestores para evitar la inhibición del proceso (Sarabia Méndez et al., 2017). Otro desafío asociado es la producción de amoníaco a estas temperaturas, que puede inhibir la actividad microbiana si no se controla adecuadamente. A pesar de los mayores costos energéticos, los sistemas termofílicos son preferidos en situaciones donde se busca maximizar la eficiencia del proceso y reducir el tiempo de retención de los residuos. Estos sistemas también son efectivos para residuos con un alto contenido de grasas y proteínas, lo que los hace ideales para aplicaciones industriales.

1.1. Parámetros del proceso de digestión anaerobia

El control de varios parámetros clave es esencial para asegurar la eficiencia y estabilidad del proceso de digestión anaerobia. Los principales son:

Temperatura

Como se ha expuesto anteriormente, la temperatura es uno de los parámetros más críticos que afecta la eficiencia de la digestión anaerobia, ya que influye en la actividad microbiana y en la velocidad de descomposición de los materiales orgánicos.

En cuanto a las condiciones mesofílicas, aunque son más comunes debido a su estabilidad y menor costo, hay particularidades a considerar. Por ejemplo, la diversidad microbiana en sistemas mesofílicos es mayor, lo que facilita la adaptación a variaciones en los sustratos y las condiciones ambientales. Esto contribuye a la resiliencia del proceso, permitiendo la digestión de una amplia variedad de subproductos, especialmente en industrias que generan residuos orgánicos heterogéneos, como la oleícola (Zhang et al., 2016). Sin embargo, la producción de biogás es menos eficiente en comparación con las condiciones termofílicas, y se requiere un mayor tiempo de retención para lograr una descomposición completa de la materia orgánica.

En sistemas termofílicos, la producción de biogás se maximiza y el tiempo de retención se reduce significativamente, siendo un proceso que permite un mayor rendimiento en un menor período. Las altas temperaturas contribuyen a la destrucción de patógenos y resultan efectivas para tratar residuos con alto contenido de sólidos, grasas y proteínas, algo que es relevante en subproductos más complejos de la industria oleícola. Sin embargo, el desafío radica en el control preciso de la temperatura y la mayor sensibilidad a las fluctuaciones, lo que requiere un mayor consumo energético y un monitoreo constante del proceso para evitar inhibiciones por amoníaco y otros compuestos tóxicos (Weiland, 2010).



En cuanto a la aplicación práctica en la valorización de subproductos oleícolas, la elección entre condiciones mesofílicas y termofílicas dependerá de las características del residuo y de los objetivos del proceso. Las condiciones mesofílicas son ideales para residuos con composición más homogénea y cuando se busca una operación más estable y de menor costo (Kothari et al., 2010). Por otro lado, las condiciones termofílicas serán preferibles cuando se requiere maximizar la producción de biogás y reducir el tiempo de procesamiento, aunque a un costo energético más elevado (Kothari et al., 2010).

pH

El pH es un factor fundamental en el proceso de digestión anaerobia, ya que influye directamente en la actividad y viabilidad de los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica y la producción de biogás. Mantener el pH dentro de un rango óptimo de 6.5 a 7.5 es crucial para garantizar el equilibrio entre los diferentes grupos de bacterias involucradas, especialmente las bacterias acidogénicas y metanogénicas.

Las bacterias acidogénicas, que convierten la materia orgánica en ácidos grasos volátiles (AGVs) como el acético, propiónico y butírico, prefieren un pH ligeramente más ácido, alrededor de 6.0 a 6.5 (Schnürer y Jarvis, 2010). Por otro lado, las bacterias metanogénicas, que son responsables de la conversión de estos ácidos en metano, requieren un entorno ligeramente alcalino, con un pH óptimo cercano a 7.0. La coexistencia y actividad eficiente de ambos grupos de bacterias son esenciales para mantener un proceso estable y eficiente de producción de biogás. Cuando el pH se desvía de este rango, la actividad microbiana se ve afectada y, como resultado, la producción de metano disminuye.

Si el pH cae por debajo de 6.5, se produce la acidificación del sistema, generalmente debido a la acumulación excesiva de ácidos grasos volátiles, que puede inhibir severamente la actividad de las bacterias metanogénicas. Esta situación, conocida como "shock ácido", reduce la capacidad de las bacterias para producir metano y puede llevar a la interrupción total del proceso si no se corrige a tiempo (Angelidaki y Ahring, 1993). Un pH demasiado bajo favorece la proliferación de bacterias acidogénicas, que producen más ácidos, creando un círculo vicioso que agrava la acidificación y, por lo tanto, dificulta la recuperación del proceso de digestión anaerobia.

En el otro extremo, un pH superior a 7.5 puede causar la formación de amoníaco libre, especialmente en sustratos ricos en nitrógeno, como los residuos agroindustriales y subproductos oleícolas. El amoníaco libre (NH_3) es tóxico para las bacterias metanogénicas y puede inhibir su actividad, resultando en una disminución de la producción de metano (Koster y Lettinga, 1988). En concentraciones elevadas, el amoníaco no solo reduce la actividad metabólica de las bacterias, sino que también puede provocar la lisis celular, afectando la estabilidad del proceso de digestión anaerobia.



Relación carbono/nitrógeno (C/N)

Esta relación se refiere a la proporción de átomos de carbono (C) y nitrógeno (N) presentes en la materia orgánica que se introduce en el biodigestor. Mantener una relación C/N adecuada, en torno a 25:1 a 30:1, es esencial para garantizar el equilibrio y funcionamiento óptimo de los microorganismos que participan en la digestión anaerobia (Yenigün y Demirel, 2013).

El carbono es la principal fuente de energía para los microorganismos anaerobios, mientras que el nitrógeno es necesario para la síntesis de proteínas y el crecimiento microbiano. Si la relación C/N es demasiado alta (es decir, hay un exceso de carbono), el proceso se ralentiza porque los microorganismos no tienen suficiente nitrógeno para sintetizar proteínas y multiplicarse. Como resultado, la degradación de la materia orgánica es más lenta y la producción de biogás disminuye. En estos casos, los microorganismos no pueden utilizar el carbono de manera efectiva, y se produce un proceso de digestión menos eficiente (Ward et al., 2008).

Por otro lado, si la relación C/N es demasiado baja (exceso de nitrógeno), la descomposición de la materia orgánica genera cantidades excesivas de amoníaco (NH_3). El amoníaco libre es tóxico para las bacterias metanogénicas, y en concentraciones elevadas puede inhibir su actividad, resultando en una disminución significativa de la producción de metano y, en casos extremos, en la interrupción del proceso de digestión anaerobia (Koster y Lettinga, 1984). Además, el exceso de amoníaco puede elevar el pH del sistema, lo que también contribuye a la inhibición de la actividad bacteriana.

Para asegurar que la digestión anaerobia se lleve a cabo de manera eficiente, es crucial mantener un equilibrio adecuado entre el carbono y el nitrógeno. Los residuos agrícolas y vegetales, como los subproductos oleícolas, suelen tener una relación C/N alta debido a su elevado contenido de lignina y celulosa, mientras que los residuos animales, como el estiércol, suelen tener una relación C/N más baja. Por esta razón, la codigestión, que consiste en mezclar diferentes tipos de residuos orgánicos con relaciones C/N complementarias, es una práctica común que permite ajustar la proporción C/N a niveles óptimos, mejorando la producción de biogás y la estabilidad del proceso (Li et al., 2011).

Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es un parámetro crucial en la digestión anaerobia, ya que define el período durante el cual los residuos permanecen en el biodigestor. Este tiempo determina cuánto tiempo tienen los microorganismos para descomponer la materia orgánica y convertirla en biogás. El TRH se mide generalmente en días y puede variar significativamente según el tipo de residuos, la concentración de sólidos y la temperatura del proceso.

Un TRH más largo proporciona a los microorganismos más tiempo para descomponer completamente la materia orgánica, lo que resulta en una mayor producción de biogás y un tratamiento más eficiente de los residuos. Esto es particularmente importante en la digestión de materiales complejos o menos biodegradables, como ciertos subproductos agrícolas o residuos lignocelulósicos, que requieren más tiempo para descomponerse



(Angelidaki et al., 2006). Además, un TRH más prolongado contribuye a la estabilización del proceso y a la producción de un digestato de mejor calidad, que puede ser utilizado como fertilizante.

Sin embargo, un TRH más largo también implica que el volumen del biodigestor se utiliza durante más tiempo, lo que reduce la capacidad del sistema para procesar nuevas entradas de residuos. Esto puede ser un inconveniente en instalaciones donde se manejan grandes volúmenes de materia orgánica, ya que limita la capacidad de tratamiento del biodigestor y puede requerir equipos más grandes y costosos para manejar el flujo constante de residuos (Chen et al., 2008).

Por otro lado, un TRH más corto permite que los residuos se procesen más rápidamente, aumentando la capacidad de tratamiento del sistema y reduciendo los costos operativos. Sin embargo, si el TRH es demasiado breve, es probable que la materia orgánica no se descomponga por completo, lo que resulta en una menor producción de biogás y en un digestato con un contenido orgánico más elevado. Este digestato no solo representa una pérdida de potencial energético, sino que también puede requerir tratamiento adicional antes de su eliminación o reutilización (Kothari et al., 2014).

El equilibrio del TRH es, por tanto, fundamental para la eficiencia del proceso. En sistemas de digestión anaerobia a escala industrial, el TRH suele oscilar entre 15 y 30 días, aunque puede ser mayor o menor dependiendo de la composición del residuo y las condiciones del proceso. Por ejemplo, en digestores de residuos líquidos o con bajo contenido en sólidos, se pueden usar TRH más cortos, mientras que para residuos sólidos o materiales complejos se prefieren tiempos de retención más largos. Optimizar el TRH es crucial para maximizar la producción de biogás y garantizar un proceso de digestión eficiente y rentable.

1.2. Etapas del proceso de digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia se compone de varias etapas interrelacionadas, cada una jugando un papel crucial en la transformación de los residuos orgánicos en biogás:

Hidrólisis

La hidrólisis es la etapa inicial del proceso de digestión anaerobia y constituye un paso fundamental para la conversión de la materia orgánica en biogás. Durante esta fase, las bacterias hidrolíticas descomponen los polímeros complejos presentes en los residuos, como proteínas, carbohidratos y grasas, en moléculas más simples y solubles, tales como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Este proceso es esencial porque las moléculas grandes no pueden ser utilizadas directamente por las bacterias metanogénicas en las etapas posteriores del proceso anaerobio (Vavilin et al., 2008).

La hidrólisis es facilitada por la acción de enzimas extracelulares producidas por las bacterias hidrolíticas. Estas enzimas catalizan la ruptura de las macromoléculas complejas en subunidades más pequeñas que pueden ser absorbidas y transformadas por otros microorganismos presentes en el biodigestor. Por ejemplo, las proteasas descomponen las proteínas en péptidos y aminoácidos, las lipasas convierten las grasas en ácidos grasos y glicerol, y las celulasas descomponen los carbohidratos complejos en



azúcares simples (Angelidaki y Ellegaard, 2002). La eficiencia de esta etapa depende de varios factores, como la temperatura, el pH, la relación carbono/nitrógeno (C/N), el tamaño de las partículas y la naturaleza de los residuos orgánicos.

El ritmo de la hidrólisis es un factor limitante en la digestión anaerobia, especialmente cuando se procesan materiales con un alto contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, como los subproductos agrícolas y oleícolas. Estos compuestos son más difíciles de descomponer y requieren un tiempo de retención más prolongado para que las bacterias hidrolíticas actúen de manera efectiva (Zhao et al., 2012). Además, la estructura y composición de los residuos afectan la tasa de hidrólisis, y la pretratación de los materiales, como el corte, la molienda o el uso de agentes químicos, puede mejorar la eficiencia de esta etapa al aumentar la superficie disponible para la acción enzimática.

El éxito de la hidrólisis es crucial para la eficiencia global del proceso de digestión anaerobia, ya que determina la disponibilidad de sustratos para las etapas posteriores. Si la hidrólisis no es eficiente, la conversión de materia orgánica a metano se verá limitada, reduciendo así la producción total de biogás.

Acetogénesis

La siguiente etapa del proceso de digestión anaerobia, tras la hidrólisis, es la acetogénesis. En esta fase, las bacterias acidogénicas transforman los productos resultantes de la hidrólisis, como los azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, en ácidos grasos volátiles (AGVs) de cadena corta, hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2) (Wu et al., 2016). Estos AGVs incluyen compuestos como el propionato y el butirato, que necesitan ser convertidos antes de que puedan ser utilizados en la etapa final del proceso.

Las bacterias acetogénicas intervienen transformando estos ácidos grasos volátiles en acetato, hidrógeno y más CO_2 . El acetato es un producto fundamental en la digestión anaerobia, ya que será el principal sustrato para las bacterias metanogénicas en la siguiente etapa del proceso, la metanogénesis, donde se producirá metano (CH_4) y CO_2 . Además, el hidrógeno generado durante la acetogénesis es aprovechado por las bacterias metanogénicas hidrogenotróficas para producir metano (Stams y Plugge, 2009).

La eficiencia de la acetogénesis depende en gran medida del equilibrio entre la producción y el consumo de hidrógeno. Si se acumula demasiado hidrógeno en el sistema, las bacterias acetogénicas pueden experimentar una inhibición en su actividad, lo que ralentiza la conversión de los ácidos grasos volátiles en acetato y afecta negativamente la producción de biogás. La acumulación de AGVs como resultado de una acetogénesis ineficiente puede llevar a la acidificación del sistema, alterando el equilibrio del proceso y perjudicando la actividad microbiana (Zehnder, 1988).

Metanogénesis

La metanogénesis es la fase final y una de las más importantes en el proceso de digestión anaerobia, en la cual las bacterias metanogénicas convierten el acetato y el hidrógeno (H_2) en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), resultando en la formación de biogás.



Este proceso es crucial, ya que el metano es el principal componente del biogás y constituye la mayor parte de su valor energético. La metanogénesis representa la etapa que más influye en la eficiencia y rentabilidad de la producción de biogás (Alvarado Turcios, 2017).

Las bacterias metanogénicas pertenecen al dominio Archaea y son organismos altamente especializados y sensibles a las condiciones del entorno, como el pH, la temperatura y la concentración de amoníaco. Existen dos principales rutas metabólicas en la metanogénesis: la acetoclástica, donde el acetato se convierte en metano y CO₂, y la hidrogenotrófica, que utiliza hidrógeno y CO₂ para producir metano (Liu y Whitman, 2008). Aproximadamente el 70% del metano producido en la digestión anaerobia proviene de la ruta acetoclástica, mientras que el 30% restante es generado a través de la ruta hidrogenotrófica (Angelidaki et al., 2011).

El equilibrio entre estas rutas metabólicas es fundamental para la producción eficiente de biogás. En condiciones óptimas de pH (entre 6.5 y 7.5) y temperatura, las bacterias metanogénicas pueden funcionar de manera efectiva. Sin embargo, si las concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGVs) aumentan o si el pH se desvía del rango óptimo, la actividad de las bacterias metanogénicas se ve inhibida, lo que reduce la producción de metano (Gerardi, 2003).

Un factor crítico para maximizar la producción de biogás durante la metanogénesis es la baja concentración de hidrógeno en el medio. Si los niveles de hidrógeno se mantienen bajos, las reacciones de acetogénesis y metanogénesis son favorecidas, lo que resulta en una mayor producción de metano. Esto se debe a la relación simbiótica entre las bacterias acetogénicas y las metanogénicas, donde las primeras generan hidrógeno que es consumido inmediatamente por las segundas, manteniendo un ambiente propicio para la producción de biogás (Stams y Plugge, 2009).

En resumen, la metanogénesis es el proceso determinante en la producción de biogás, y su eficiencia depende de la interacción de varios factores, incluidos el pH, la temperatura y la concentración de hidrógeno. Un control adecuado de estas variables es esencial para optimizar la generación de metano y, por lo tanto, el rendimiento energético del biogás.

1.3. Técnicas del proceso de digestión anaerobia: Tipos de biodigestores

Existen varios tipos de biodigestores diseñados para optimizar el proceso de digestión anaerobia según el tipo de residuo y las necesidades operativas. Estos sistemas juegan un papel fundamental en la maximización de la producción de biogás y la eficiencia del proceso. Los principales tipos de biodigestores son:

Biodigestores de flujo pistón

Los biodigestores de flujo pistón son sistemas de digestión anaerobia diseñados para optimizar la descomposición de los residuos a lo largo de una cámara de digestión alargada, permitiendo un proceso continuo en el que los materiales avanzan lentamente

desde el punto de entrada hasta la salida. La principal característica de este tipo de biodigestores es que los residuos se degradan de manera gradual mientras se desplazan por el interior del digestor, lo que permite una mayor eficiencia en la producción de biogás y un tratamiento más completo de la materia orgánica.

- El **modelo horizontal** es una de las variantes más comunes y es especialmente adecuado para el tratamiento de residuos que requieren un tiempo prolongado de descomposición, como los restos de sacrificio de animales y otros desechos sólidos con alto contenido de materia orgánica. Este diseño se caracteriza por la presencia de cámaras de carga y descarga situadas en los extremos del biodigestor, lo que evita la mezcla del material fresco con el material en etapa avanzada de digestión, asegurando así una degradación más efectiva y controlada del material (Awe et al., 2017). Además, el diseño alargado y horizontal favorece el flujo unidireccional de los residuos, lo que garantiza que el material pase por todas las etapas del proceso anaerobio, desde la hidrólisis hasta la metanogénesis, maximizando la producción de biogás.
- Por otro lado, el **modelo de bajo costo** es una variante que utiliza bolsas de polietileno tubular como cámara de digestión, lo que reduce significativamente los costos de instalación y operación. Este tipo de biodigestor es ideal para regiones rurales y comunidades con recursos limitados, ya que su estructura simple y flexible permite su implementación en áreas donde no se dispone de tecnologías más avanzadas (Castro et al., 2017). Las bolsas de polietileno permiten la retención de los gases producidos durante la digestión y proporcionan un ambiente anaerobio adecuado para la descomposición de la materia orgánica. Aunque este modelo tiene una vida útil más corta y es menos duradero que los biodigestores de materiales más resistentes, su bajo costo y facilidad de instalación lo convierten en una opción viable para pequeños agricultores y comunidades rurales que buscan aprovechar los desechos orgánicos y producir biogás de manera eficiente.

Biodigestores de mezcla completa

Los biodigestores de mezcla completa son uno de los sistemas más comunes y versátiles en el proceso de digestión anaerobia, ya que permiten la adición periódica de residuos orgánicos, que se mezclan con el contenido ya presente en el digestor. Esta mezcla continua mejora la descomposición de la materia orgánica y favorece la producción de biogás, al garantizar que los microorganismos estén en contacto constante con el sustrato disponible (Khalid et al., 2011).

- El **modelo chino** es uno de los más tradicionales y ampliamente utilizados, especialmente en zonas rurales de países en desarrollo. Está fabricado con materiales duraderos, como cemento o ladrillo, lo que le otorga una vida útil de hasta 15 años (Lansing et al., 2008). Este biodigestor requiere un gasómetro externo para almacenar el biogás producido, permitiendo un uso eficiente del biogás para diversas aplicaciones. El uso del gasómetro facilita el

almacenamiento y distribución del biogás, aunque implica un costo adicional de instalación y mantenimiento (Bond y Templeton, 2011).

- El **modelo indio** es un diseño más sencillo y eficiente en cuanto a la regulación de la presión interna del biodigestor. En lugar de un gasómetro, utiliza una campana flotante que se coloca sobre el tanque de fermentación, manteniendo una presión constante en el interior a medida que el biogás se produce y se consume (Rajendran et al., 2012). Esto lo convierte en una opción más fácil de construir y operar, siendo ideal para pequeñas explotaciones agrícolas o comunidades rurales que buscan una solución de menor costo y adaptable a diferentes tamaños y capacidades.

Biodigestores discontinuos

Los biodigestores discontinuos funcionan mediante la carga de residuos orgánicos en lotes, y el proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo hasta que se ha producido todo el biogás posible. Una vez completada la digestión, el biodigestor se descarga y se vuelve a llenar con un nuevo lote de residuos, lo que hace que este sistema sea más simple en términos de operación y manejo (Abbassi-Guendouz et al., 2012).

Estos biodigestores son especialmente adecuados para el tratamiento de residuos sólidos con bajo contenido de agua, como el estiércol, ya que requieren una menor cantidad de agua en comparación con otros sistemas. Esta característica los hace más eficientes en áreas donde la disponibilidad de agua es limitada o cuando se trabaja con materiales que no requieren dilución (Abbassi-Guendouz et al., 2012).

Al no necesitar una carga continua de residuos, los biodigestores discontinuos permiten un mayor control sobre el proceso y son ideales para pequeños agricultores o instalaciones donde la producción de residuos es intermitente. Sin embargo, su principal desventaja es que la producción de biogás es menos constante y tiende a ser más baja en comparación con los sistemas de flujo continuo, ya que el proceso debe detenerse cada vez que se vacía y recarga el biodigestor (Angelidaki et al., 2006).

Este tipo de biodigestores resulta más rentable y de menor complejidad en su instalación y mantenimiento, por lo que son una opción popular para proyectos de biogás a pequeña escala, especialmente en zonas rurales donde los recursos son limitados y se busca aprovechar los residuos agrícolas y ganaderos.

2. Subproductos de la industria oleícola utilizables en el proceso de digestión anaerobia

2.1. Alperujo

El alperujo ha demostrado ser un sustrato con gran potencial para la digestión anaerobia, aunque presenta ciertos desafíos debido a su composición. Uno de los principales obstáculos es su alto contenido de compuestos fenólicos y ácidos grasos de cadena larga, que pueden inhibir la actividad microbiana durante la digestión. Para abordar este problema, se han estudiado diversos pretratamientos que mejoran la eficiencia del

proceso. Por ejemplo, estudios han demostrado que la aplicación de ultrasonidos y pretratamientos químicos con ácidos o bases aumenta la solubilidad de la materia orgánica y reduce el efecto inhibitor de los compuestos fenólicos, mejorando así la producción de biogás (Carlini et al., 2015).

La codigestión del alperujo con otros residuos orgánicos también es una estrategia eficaz para incrementar la producción de biogás y minimizar los efectos inhibidores. Mezclar alperujo con estiércol de ganado o lodos de depuradora mejora la relación C/N y aumenta la diversidad de sustratos disponibles para los microorganismos, resultando en una producción más estable y eficiente de metano (Al Afif y Amon, 2019).

En cuanto al rendimiento, el alperujo tiene un potencial significativo de producción de metano, que puede variar entre 200 y 400 m³ de CH₄ por tonelada de materia seca, dependiendo de las condiciones del proceso y del pretratamiento aplicado (Fernández et al., 2022). Este rendimiento convierte al alperujo en un recurso interesante para la producción de energía renovable, contribuyendo a la valorización de subproductos en la industria oleícola y promoviendo un modelo de economía circular.

2.2. Poda y Hojín

El uso de residuos de poda y hojas de olivo (hojín) en la digestión anaerobia presenta un gran potencial para la producción de biogás, ya que estos residuos contienen una cantidad significativa de biomasa lignocelulósica que puede convertirse en energía. Un estudio realizado en la región de Achaia, en Grecia, mostró que los residuos de poda y los huesos de aceituna pueden ser aprovechados eficientemente mediante digestión anaerobia, contribuyendo así a un modelo de agricultura más sostenible (Papachristopoulos et al., 2023).

En cuanto a la composición y las características físicas y químicas de las hojas de olivo, éstas contienen una alta proporción de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que las hace adecuadas para procesos de digestión anaerobia una vez que se aplican pretratamientos adecuados que faciliten la degradación de estos compuestos. Se estima que, en España, la cantidad total de hojas de olivo recolectadas alcanza aproximadamente 750,000 toneladas al año (Espeso et al., 2021).

El proceso de digestión anaerobia de estos residuos puede verse influido por factores como la estructura lignocelulósica de las hojas y la presencia de compuestos fenólicos que actúan como defensa de la planta. Para maximizar la producción de biogás, se han investigado distintas estrategias, como la codigestión con otros residuos y el uso de pretratamientos que faciliten la degradación de la biomasa lignocelulósica.

2.3. Hueso

El hueso de aceituna es un subproducto oleícola que tiene un gran potencial para la producción de biogás a través de la digestión anaerobia. Se estimó que el uso de huesos de aceituna triturados puede generar una cantidad significativa de energía, alcanzando hasta 769 kWh por tonelada debido a su alto contenido en sólidos volátiles y materia orgánica (Uddin et al., 2021). Sin embargo, uno de los principales desafíos en el proceso

es su alto contenido en compuestos fenólicos, que pueden tener efectos inhibitorios sobre la actividad microbiana durante la digestión.

Para superar esta inhibición, se han utilizado pretratamientos, como la aplicación de la reacción de Fenton (que utiliza sales de hierro y peróxido de hidrógeno), que ayudan a descomponer estos compuestos fenólicos y mejorar la producción de biogás. Este enfoque permite superar el efecto bacteriostático de los fenoles y mejorar la eficiencia del proceso de metanogénesis, reduciendo además la presencia de sulfuro de hidrógeno en el biogás final (Girardi et al., 2023).

3. Productos obtenidos de la digestión anaerobia de los subproductos de la industria oleícola.

Este proceso genera dos productos principales: biogás y digestato. La composición del biogás, que está formado mayormente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), puede variar en función de varios factores, como el tipo de residuos orgánicos utilizados, el tiempo de retención y la temperatura de operación del digestor. Factores como el pH, la concentración de nutrientes y la relación carbono/nitrógeno también influyen significativamente en la eficiencia del proceso y en la proporción final de metano en el biogás (Khalid et al., 2011). Por otro lado, el digestato es un residuo sólido o semilíquido que contiene una alta concentración de materia orgánica estabilizada y nutrientes esenciales para las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio. Su calidad y composición dependen de las características iniciales del sustrato y de las condiciones operativas del proceso. Si bien el digestato se utiliza principalmente como fertilizante orgánico, puede requerir tratamientos adicionales para mejorar su manejo y minimizar su impacto ambiental (Möller y Müller, 2012).

3.1. Biogás

El Biogás, al igual que otras fuentes de energía renovable como el syngas, se produce de manera controlada a partir de materias primas orgánicas, como residuos agrícolas, mediante el proceso de gasificación térmica. Este gas contiene principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), con pequeñas cantidades de otros gases como nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3) (Weiland, 2010). El metano es el componente clave del biogás, ya que determina su potencial energético y su aplicación en la generación de electricidad, calor y como combustible vehicular.

Tabla 1. Composición media del biogás (Weiland, 2010).

PARÁMETRO	%	FRACCIÓN MOLAR
CH_4	50-75	0,50-0,75
CO_2	25-50	0,25-0,50
N_2	0-1	0,00-0,01
O_2	0-1	0,00-0,01
H_2S	0-3	0,00-0,03
NH_3	Trazas	-

PCI (Poder calorífico inferior)	4.500 - 6.000 Kcal/Nm ³
--	------------------------------------

El rendimiento y la composición del biogás dependen de varios factores clave:

- **Tipo de sustrato:** La naturaleza de la materia orgánica utilizada influye significativamente en la cantidad de metano generado. Subproductos ricos en lípidos, como algunos desechos oleícolas, tienden a producir biogás con un mayor contenido de metano.
- **Condiciones operativas del digestor:** Variables como la temperatura, el pH, el tiempo de retención y la relación carbono/nitrógeno afectan tanto la eficiencia del proceso como la composición del biogás.
- **Presencia de inhibidores:** Elementos como el sulfuro de hidrógeno o amoníaco pueden afectar negativamente la producción de metano, reduciendo la calidad del biogás.

El biogás resultante de este proceso puede ser utilizado de diferentes maneras, incluyendo:

- **Generación de electricidad y calor:** A través de su combustión en motores de cogeneración (CHP), el biogás se utiliza para producir electricidad y calor, lo que es útil tanto para aplicaciones industriales como residenciales.
- **Purificación a biometano:** El biogás puede ser sometido a procesos de purificación para eliminar CO₂ y otros compuestos no deseados, obteniendo biometano con una alta concentración de metano (>95%). Este biometano puede inyectarse a la red de gas natural o utilizarse como combustible para vehículos.
- **Producción de bioproductos:** El biogás también puede ser una fuente de hidrógeno y otros compuestos valiosos mediante procesos adicionales de separación y purificación.

La calidad del biogás, su contenido energético y su aplicación dependerán en gran medida de estos factores operativos, así como del tipo de sustrato y las tecnologías de purificación y acondicionamiento del gas.

3.2. Digestato

El digestato es el subproducto sólido o líquido que se obtiene tras el proceso de digestión anaerobia de residuos orgánicos. Se trata de una mezcla de material parcialmente descompuesto, rica en nutrientes, que ha perdido su contenido en materia volátil, pero mantiene un alto valor fertilizante. La composición del digestato puede variar en función del tipo de sustrato tratado y las condiciones del proceso, pero generalmente contiene altos niveles de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), además de otros micronutrientes como calcio (Ca) y magnesio (Mg) (Möller y Müller, 2012).

Tabla 2. Composición media del digestato.

PARÁMETRO	%
Materia seca (MS)	5-15
Nitrógeno total (N)	0,2-0,4

Fósforo (P)	0,1-0,2
Potasio (K)	0,4-0,8
Calcio (Ca)	0,1-0,4
Magnesio (Mg)	0,05-0,2
pH	7-8

La calidad y las propiedades del digestato están influenciadas por varios factores clave:

- **Tipo de sustrato:** Los residuos orgánicos procesados influyen directamente en la composición del digestato. Los subproductos oleícolas, por ejemplo, tienden a producir un digestato con una mayor concentración de ciertos nutrientes debido a la naturaleza de las aceitunas y el proceso de producción del aceite.
- **Condiciones de operación del digestor:** Variables como la temperatura, el tiempo de retención y la eficiencia de la digestión anaerobia afectan a la estabilidad y composición final del digestato. Una digestión bien controlada resulta en un digestato más estable y con mejores propiedades como fertilizante.
- **Contenido de materia seca:** El porcentaje de materia seca en el digestato es crucial para determinar su manejo y aplicación. Un digestato con bajo contenido en materia seca es más adecuado para su aplicación en tierras agrícolas mediante sistemas de riego o como biofertilizante líquido. En cambio, un digestato con mayor concentración de sólidos es adecuado para su uso directo como compost o como sustrato para otros procesos de tratamiento.

El digestato tiene diversas aplicaciones potenciales, entre las que destacan:

- **Uso como fertilizante orgánico:** Debido a su alto contenido de nutrientes, el digestato puede ser utilizado directamente en suelos agrícolas para mejorar su fertilidad y estructura. Su aplicación reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos, contribuyendo a una agricultura más sostenible.
- **Mejora del suelo:** El digestato ayuda a incrementar la materia orgánica en el suelo, lo que mejora su capacidad de retención de agua y su estructura, promoviendo un mejor crecimiento de las plantas.
- **Compostaje:** En algunos casos, el digestato sólido se somete a procesos de compostaje para estabilizar aún más su contenido orgánico y facilitar su uso como enmienda orgánica de alta calidad.

4. Industria andaluza dedicada a la gasificación de biomasa

En la siguiente tabla se incluyen algunas de las principales empresas que operan en Andalucía en el ámbito del biogás y biometano, gestionando tanto residuos agrícolas como ganaderos para la producción de energía renovable.

Tabla 3. Listado de empresas dedicadas a la producción de biogás en Andalucía.

CIF	Razón Social	Domicilio	Teléfono	CP	Municipio	Provincia
A90381401	AGR Biogás (Sede)	Parque Empresarial Nuevo Torneo, Torre 8, Planta 4, C/ Arquitectura, 5	955252833	41015	Sevilla	Sevilla
	AGR Biogás (planta)	357 km, Calle A, 6,		29320	Campillos	Málaga
	AGR Biogás (planta)	(en construcción desde 1 ^{er} trimestre 2024)		18512	La Calahorra	Granada
	AGR Biogás (planta)	(en construcción desde 3 ^{er} trimestre 2024)		41909	Salteras	Sevilla
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		41805	Benacazón	Sevilla
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		41760	El Coronil	Sevilla
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		41530	Morón	Sevilla
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		41540	La Puebla de Cazalla	Sevilla
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		41400	Écija	Sevilla
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		21330	Valdelamusa	Huelva
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		11500	Puerto de Santa María	Cádiz
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		14830	Espejo	Córdoba
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		14930	Monturque	Córdoba
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		23680	Alcalá la Real	Jaén
	AGR Biogás (planta)	(proyecto)		23620	Mengíbar	Jaén
AGR Biogás (planta)	(proyecto)	23410	Sabiote	Jaén		
AGR Biogás (planta)	(proyecto)	04815	Almanzora	Almería		
A08431090	Naturgy	(en construcción)	911231112	41710	Utrera	Sevilla

		desde 2025)				
A88511183	Enagás Renovable	(proyecto)	916492543	23712	Jabalquinto	Jaén

5. Patentes sobre técnicas dedicadas a la digestión anaerobia

Tabla 4. Listado de patentes sobre técnicas de digestión anaerobia.

N.º de publicación	Título	Solicitantes	Inventores	Descripción	Fecha de publicación
MX2023012370	Proceso de producción de biogás mediante codigestión anaerobia.	Econward Tech, S.L.U	Julio César Aparicio Gaya; Alberto Salguero Carvajal; Julián Alberto Soler; Javier Mena Sanz; Rubén García Cano.	La invención se refiere a un proceso de producción de biogás mediante codigestión anaerobia que comprende: (a) preparar biomasa hidrolizada a partir de residuos sólidos orgánicos mediante un tratamiento de termohidrólisis de los residuos a entre 1,5 y 4,5 bares y entre 120 y 160 °C, generando biomasa bruta de la cual se separan improprios, dando lugar a biomasa hidrolizada limpia con al menos un 90% de materia orgánica, una relación de sólidos volátiles por sólidos totales de al menos 0,6 y al menos un 5% de sólidos totales; (b) mezclar la biomasa	01/11/2023

				hidrolizada limpia con lodos de una EDAR, generando una mezcla con una concentración de sólidos inferior al 30%, que se acondiciona hasta una concentración inferior al 20%; y (c) una etapa de digestión anaerobia vía húmeda en un digestor a entre 25 °C y 40 °C o entre 50 °C y 60 °C, y durante un TRH de entre 12 y 30 días, generando biogás y un digestato.	
WO/2022/223852	Proceso de producción de biogás mediante codigestión anaerobia.	Econward Tech, S.L.U.	Julio César Aparicio Gaya; Alberto Salguero Carvajal; Julián Alberto Soler; Javier Mena Sanz; Rubén García Cano.	La invención se refiere a un proceso de producción de biogás mediante codigestión anaerobia que comprende: (a) preparar biomasa hidrolizada a partir de residuos sólidos orgánicos mediante un tratamiento de termohidrólisis de los residuos a entre 1,5 y 4,5 bares y entre 120 y 160 °C,	27/10/2022

				<p>generando biomasa bruta de la cual se separan impropios, dando lugar a biomasa hidrolizada limpia con al menos un 90% de materia orgánica, una relación de sólidos volátiles por sólidos totales de al menos 0,6 y al menos un 5% de sólidos totales; (b) mezclar la biomasa hidrolizada limpia con lodos de una EDAR, generando una mezcla con una concentración de sólidos inferior al 30%, que se acondiciona hasta una concentración inferior al 20%; y (c) una etapa de digestión anaerobia vía húmeda en un digester a entre 25 °C y 40 °C o entre 50 °C y 60 °C, y durante un TRH de entre 12 y 30 días, generando biogás y un digestato.</p>	
--	--	--	--	---	--

MX2021013499	Reactor para digestión anaerobia	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.	Laura Alicia Paniagua Solar; Nallely Téllez Méndez; Enrique de la Fuente Morales.	La presente invención describe un reactor para digestión anaerobia caracterizado porque comprende un cilindro fabricado de acero estaño, un medidor de presión, un medidor de temperatura, un mecanismo de agitación, un sistema de limpieza, una malla de acero, un sistema de separación de sólidos y líquidos, una válvula de globo para el sistema de limpieza y una válvula de globo con reducción para la descarga del biogás.	04/11/2021
WO2021130396	Procedimiento de producción de metano mediante co-digestión anaerobia alperujo-microalga.	Consejo Superior De Investigaciones Científicas (CSIC); Universidad pablo de olavide	Bárbara María Rincón Llorente; María José Fernández Rodríguez; David de la Lama Calvente; Rafael Borja	La presente invención se enmarca en el sector del aprovechamiento de los subproductos de la industria alimentaria. Particularmente, el objeto de la presente invención es un procedimiento mejorado para la producción de metano a partir de la co-	09/12/2020

			Padilla; Antonia Jiménez- Rodríguez.	digestión anaerobia del alperujo, principal subproducto generado en la elaboración del aceite de oliva, con la microalga <i>Dunaiielia salina</i> .	
ES2792776	Instalación y procedimiento de digestión anaerobia	Urbaser S.A.	Marc Vinot; Carlos Abilio Perez Alonso; Pilar Tur Salamanca; Alberto Reneo Tardón; Eduardo Fernández Giménez.	Instalación y procedimiento de digestión anaerobia de residuos orgánicos biodegradables, comprendiendo la instalación un digestor en forma de un tanque cilíndrico cerrado; unos medios de abastecimiento de materias a tratar, con orificios de carga distribuidos en una primera porción de la pared del tanque; unos medios de homogeneización con boquillas de inyección distribuidas en el fondo del tanque; unos medios de descarga en una segunda porción de la pared del tanque diametralmente	11/11/2020

				opuesta a la primera porción, destinados a la extracción de materias digeridas; unos medios de eliminación en una tercera porción diametralmente opuesta a la primera porción y en la parte baja del tanque, destinados exclusivamente a la extracción de materias sedimentables; y un circuito de recirculación entre los medios de descarga y los medios de abastecimiento.	
ES2577309	Sistema de tratamiento de residuos que contienen materiales orgánicos complejos, uso del mismo y proceso de tratamiento de residuos que emplea dicho sistema.	Universidad de León.	Xiomar Arleth Gómez Barrios; Elia Judith Martínez Torres; Camino Fernández Rodríguez.	Sistema de tratamiento de residuos de materiales orgánicos complejos que comprende un reactor electroquímico 1 configurado para realizar una electrooxidación y/o electrooxidación-hidrólisis del material orgánico complejo; un reactor de digestión anaerobia 10 configurado para realizar	25/04/2017

				una degradación anaeróbica del material orgánico; un puerto de salida 7 configurado para la salida de gases, y un proceso que emplea dicho sistema que se puede realizar en dos etapas o en una única etapa. Uso de dicho sistema en procesos de co-digestión de residuos y proceso de tratamiento de residuos que emplea dicho sistema.	
ES2430739	Procedimiento y planta para la digestión anaerobia termofílica-mesofílica secuencial de lodos mixtos de depuradora.	Universidad de Cádiz	Montserrat Pérez García; Víctor Riau Arenas	La invención consiste en una planta diseñada para llevar a cabo tratamientos de digestión anaerobia termofílica (55°C) y mesofílica (35°C) secuenciales de lodos mixtos (lodos primarios más secundarios) generados durante la depuración de aguas residuales urbanas, para la estabilización de dichos lodos. Asimismo, se incluye el correspondiente	21/11/2013

				<p>procedimiento de operación.</p> <p>La planta consta de dos reactores, que operan en régimen termofílico y mesofílico, respectivamente. El reactor termofílico se alimenta con una mezcla de lodos primarios y secundarios de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) en una proporción aproximada de 1:1. El efluente obtenido tras la digestión termofílica se emplea como sustrato para el reactor mesofílico. El efluente final del proceso se extrae del reactor mesofílico.</p>	
ES2464240	Procedimiento de agitado mediante la presión generada por la digestión anaerobia de fluidos orgánicos y biodigestor concebido para ello.	Juan Manuel López Diaz.	Juan Manuel López Diaz.	Este procedimiento de agitado utiliza la presión generada durante la digestión anaerobia de fluidos orgánicos en un biodigestor diseñado con	30/11/2012

				<p>dos cámaras idénticas, tuberías perforadas que las conectan en varios niveles, y láminas inclinadas con relieve. El sistema también incluye un drenaje con un hidrociclón. La agitación del fluido se logra alterando los niveles de biogás en las cámaras, utilizando dos técnicas: a) la entrada de fluido orgánico fresco en una cámara mientras se cierra la válvula de gas entre cámaras, o b) la expulsión de gas fermentado de una cámara con la válvula de gas cerrada. La agitación ocurre al abrir la válvula cuando hay una diferencia de presión suficiente entre las cámaras.</p>	
MX354107	Reactor tubular para la producción de metano a partir de la digestión anaerobia de materia.	Instituto Tecnológico Y De Estudios Superiores De Monterrey	Alejandro Montesinos Castellanos; Eder Trejo Treviño	La presente invención se refiere a un reactor tubular para la producción de metano a partir de la digestión anaerobia de	16/12/2011

				<p>materia orgánica caracterizado porque está conformado por un tubo principal hueco, o cámara digestiva, en cuyo interior, longitudinalmente, se encuentra un agitador concéntrico el cual contiene 5 impulsores verticales y 4 impulsores horizontales de material sólido preferentemente plástico o metal; un motor eléctrico que acciona el agitador concéntrico; uno de los extremos del tubo principal, presenta una entrada de menor diámetro que el tubo principal, lo cual permite generar un sello hidráulico; el otro extremo del tubo principal, funciona como área de descarga del material digerido, mediante una compuerta de abertura variable que permite el paso del material digerido al</p>	
--	--	--	--	---	--

				<p>mismo tiempo funciona como sello hidráulico; recubriendo el tubo principal, se encuentra una chaqueta de calentamiento para mantener una temperatura apropiada en el proceso de digestión.; en la parte superior del tubo principal, se encuentra una tubería que funciona para extraer el gas producido.</p>	
	<p>Procedimiento de digestión anaerobia en fases de temperatura de los residuos sólidos urbanos.</p>	<p>Universidad De Cádiz.</p>	<p>Juana Fernández Rodríguez; Luis Isidoro Romero García; Montserrat Pérez García; Carlos Álvaro Gallegos; Diego Sales Márquez.</p>	<p>Procedimiento de digestión anaerobia en fases de temperatura de los residuos sólidos urbanos. La invención consiste en un procedimiento para la degradación anaeróbica en fases de temperatura (secuencial termofílico-mesofílico) de la FORSU a través del cual se consigue incrementar la estabilidad del proceso y la capacidad de tratamiento del residuo orgánico por día,</p>	<p>20/06/2011</p>

				<p>presentando una mayor eficiencia en la producción de biogás referida a cantidad de materia orgánica alimentada al sistema o consumida por el mismo. Consiste en someter el residuo a un pretratamiento termo filico durante un tiempo determinado para conseguir una alta hidrólisis y solubilización del residuo orgánico de manera eficaz. La segunda etapa del proceso consiste en someter el residuo prehidrolizado durante la fase termofílica a degradación mesofílica, de forma que la materia solubilizada se consuma durante esta segunda fase.</p>	
ES2341064	Reactor y sistema de integración energética para la hidrólisis térmica o termoquímica en continuo de materia orgánica.	Sociedad General de Aguas de Barcelona, S.A.; Universidad de	Pilar Rodríguez Gutiérrez; Sara I. Pérez Elvira; Philippe Rouge	El reactor y sistema de integración energética propuesto para la hidrólisis térmica o termoquímica de materia orgánica mejora su	14/06/2010

		Valladolid; Sorea, Sociedad Regional de Abastecimiento de Aguas S.A.	Rouge; Roberto Velázquez Yuste; Fernando Fernández- Polanco Fernández de Moreda; Francisco Cantero Gutiérrez; Luz Panizo Castaño; Rafael González Calvo; María Fernández- Polanco Íñiguez de la Torre.	biodegradabilidad para la digestión anaerobia, aumentando en más del 50% la producción de biogás y reduciendo a la mitad los residuos finales. Este proceso se realiza en cinco etapas: concentración, recuperación energética, hidrólisis, digestión anaerobia y generación de energía eléctrica. El sistema optimiza el uso de energía al recuperar el calor y los vapores generados, lo que permite que todo el biogás se use para la generación de energía, haciendo que el proceso sea autosuficiente.	
--	--	--	--	---	--

6. Proyectos de investigación sobre la tecnología de digestión anaerobia de subproductos de la industria oleícola en Andalucía

Tabla 5. Listado de proyectos de investigación en Andalucía sobre la tecnología de digestión anaerobia de subproductos de la industria oleícola.

Nombre del proyecto	Entidades	Investigadores	Descripción	Fecha de ejecución
Olive4Future	Universidad de Córdoba; Asociación Empresarial de Almazaras Industriales de Córdoba (ACORA); Cooperativa Covidesa.	M ^a Carmen Gutiérrez Martín; M ^a Ángeles Martín Santos; José Ángel Siles López	El Proyecto Olive4Future buscar transformar el alperujo en compost aplicable a suelos empobrecidos, generar energía en forma de biogás o convertirlo en biochar o en carbones activados para baterías de litio-azufre	Octubre 2024 – Junio 2025
SAPAL. Investigación y desarrollo de una novedosa solución tecnológica para biorremediar los subproductos generados en la producción del aceite de oliva en almazara.	Genia Bioenergy; Oleoestepa	--	El objetivo principal del proyecto SAPAL es el estudio y desarrollo de una nueva solución biorremediadora para el tratamiento in situ de los subproductos generados en las almazaras, convirtiéndolos en productos de alto valor añadido como son: productos agronómicos con capacidades bioestimulantes de suelos agrícolas, biopesticidas y energía renovable en forma de biogás.	Septiembre 2021 – Septiembre 2025
OLIVE2ENERGY. Valorización energética dual del alpeorujo: biometanización avanzada y	Universidad de Córdoba	José Ángel Siles López	El proyecto OLIVE2ENERGY se centra en el aprovechamiento del alpeorujo, un residuo generado en la producción de aceite de oliva, para abordar la producción de biogás renovable mediante co-digestión anaerobia, la transformación del alpeorujo en carbones	Enero 2022 – Diciembre 2022

producción de carbones para baterías recargables sostenibles			activos a través de procesos pirolíticos, y el desarrollo de baterías recargables Li/S utilizando estos carbones para el almacenamiento de energía eléctrica.	
---	--	--	---	--

7. Análisis económico de la instalación de la tecnología de gasificación

7.1. Costos de inversión inicial

Los costos de inversión para la instalación de una planta de biogás a partir de residuos del olivar se dividen en varias categorías principales:

Construcción e infraestructura

La construcción e infraestructura de la planta implica una inversión significativa. Esta etapa incluye la adquisición del terreno, preparación del sitio y construcción de las instalaciones que albergarán los reactores, tanques de almacenamiento, sistemas de control, etc. Los costos de construcción suelen situarse entre los 600.000 y 1,5 millones de euros, dependiendo del tamaño de la planta y las condiciones del terreno (Deublein & Steinhauser, 2011).

Digestores anaeróbicos

El digestor es el equipo clave en el proceso de biogás, ya que es donde se lleva a cabo la digestión anaerobia. Para una planta que procese residuos del olivar, el costo de un digestor puede variar entre 400.000 y 1 millón de euros, dependiendo de la capacidad y el volumen de residuos que maneje la planta (Mao et al., 2015).

Equipos auxiliares

Además de los digestores, se requiere de una serie de equipos auxiliares para el almacenamiento y purificación del biogás, así como para garantizar la seguridad del sistema. Estos equipos, que incluyen generadores, sistemas de limpieza de biogás y bombas, pueden costar entre 250.000 y 500.000 euros (Deublein & Steinhauser, 2011).

Licencias y permisos

El proceso de obtener las licencias y permisos necesarios, incluyendo permisos ambientales y de construcción, puede costar entre 50.000 y 100.000 euros, dependiendo de la normativa local (Scarlat et al., 2018).

Consultoría e ingeniería

El diseño, planificación y supervisión de la construcción, junto con los estudios de viabilidad, pueden tener un costo de 100.000 a 300.000 euros. Estos costos cubren los honorarios de los ingenieros y consultores especializados en proyectos de biogás (Korres et al., 2013).

Elementos adicionales

En otros estudios se han considerado varios elementos adicionales que incrementan el costo de inversión. Entre estos se incluyen:

- La obra civil, con un costo aproximado de 600.000 euros.
- Los sistemas de alimentación, que tienen un coste cercano a los 140.000 euros.
- Los sistemas de bombeo y agitación, cuyo costo ronda los 230.000 euros.
- Los sistemas de cogeneración y la línea de gas, con un coste aproximado de 780.000 euros.
- Además, los costos de transporte de residuos agrícolas, como los restos de olivar, pueden superar los 2 millones de euros (Jerez Cañadas, 2022).

Total estimado de inversión inicial: En plantas de biogás más simples, el costo total de inversión puede oscilar entre 1,5 millones de euros, pero considerando estos elementos adicionales, el costo puede superar los 5 millones de euros.

7.2. Costos operativos anuales

Para calcular los costos operativos anuales de una planta de biogás a partir de residuos del olivar, podemos basarnos en los distintos costos involucrados, según estudios y referencias específicas:

Costos de personal

Para una planta de biogás, se necesita personal especializado para el manejo, mantenimiento y control. El personal puede incluir técnicos y operadores. Los costos pueden variar entre 100.000 y 200.000 euros anuales, dependiendo del tamaño y la automatización de la planta (Deublein & Steinhauser, 2011; Korres et al., 2013).

Costos de energía

Aunque la planta genera biogás, el proceso implica consumo eléctrico para la operación de equipos auxiliares, control y monitorización. Los costos pueden ser del orden de 50.000 a 100.000 euros anuales (Deublein & Steinhauser, 2011).

Costos de materiales y productos consumibles

Los suministros como productos químicos para la limpieza de los sistemas de purificación, mantenimiento de generadores, digestores y otros equipos pueden representar entre 30.000 y 60.000 euros anuales (Deublein & Steinhauser, 2011).

Costos de gestión de residuos

Si no se puede valorizar todo el digestato (el residuo sólido tras la digestión anaerobia), habrá costos asociados a su manejo y disposición, que pueden variar entre 20.000 y 50.000 euros anuales (Mao et al., 2015).

Costos de transporte de biomasa y residuos

Este puede ser un costo significativo, dependiendo de la distancia a la planta. En estudios anteriores se han estimado costos de transporte que pueden superar los 2 millones de euros, especialmente si se consideran distancias largas y grandes volúmenes de residuos (Jerez Cañadas, 2022).

Mantenimiento preventivo y correctivo

Equipos clave como generadores, bombas y sistemas de purificación requieren mantenimiento periódico. Los costos pueden ser entre 40.000 y 100.000 euros anuales, dependiendo de la antigüedad y complejidad de los equipos (Deublein & Steinhauser, 2011).

Costos administrativos y de gestión

Los costos de gestión operativa, licencias, seguros y otros gastos de administración pueden representar entre 20.000 y 40.000 euros anuales (Korres et al., 2013).

Seguros y licencias

La renovación de licencias ambientales y operativas, así como seguros puede suponer un costo entre 10.000 y 20.000 euros anuales (Scarlat et al., 2018).

Total estimado de costos operativos anuales: Entre 270.000 y 2.500.000 euros anuales, dependiendo del tamaño de la planta, la localización, el grado de automatización y el volumen de residuos procesados.

7.3. Ingresos estimados

Venta de energía generada a partir de biogás

Una de las fuentes más importantes de ingresos para una planta de biogás es la venta de la energía generada a partir del biogás. En muchos países de la Unión Europea, las plantas de biogás pueden beneficiarse de tarifas especiales para energías renovables. Estas tarifas, conocidas como tarifas de alimentación, oscilan entre 0,11 y 0,15 euros por kilovatio hora (kWh) de electricidad vendido a la red (Scarlat et al., 2018). Esto implica que por cada kilovatio hora producido, la planta puede recibir entre 11 y 15 céntimos de euro. Para una planta de tamaño medio que genere entre 4.000 y 8.000 megavatios hora (MWh) de electricidad al año, esto se traduce en ingresos anuales estimados de entre 440.000 y 1.200.000 euros. La capacidad de generación de la planta y las políticas locales sobre energías renovables influyen significativamente en estos ingresos.

Además de la venta de electricidad, es importante señalar que el proceso de producción de biogás también genera calor residual. Este calor puede aprovecharse internamente para procesos propios de la planta o venderse a industrias cercanas que lo puedan utilizar en sus procesos productivos (Deublein & Steinhauser, 2011).

Venta de digestato como fertilizante

El digestato es otro recurso valioso que puede generar ingresos. Este residuo se utiliza como fertilizante orgánico, especialmente demandado en la agricultura. El precio de

venta del digestato puede variar entre 2 y 10 euros por tonelada, dependiendo de su calidad y del mercado local (Mao et al., 2015). Si una planta produce grandes cantidades de digestato, los ingresos anuales pueden oscilar entre 10.000 y 50.000 euros. Esto dependerá del volumen total de digestato generado y de la capacidad para comercializarlo como fertilizante en mercados agrícolas locales.

Subvenciones y ayudas públicas

Las plantas de biogás también pueden beneficiarse de subvenciones y ayudas públicas, tanto a nivel nacional como de la Unión Europea, ya que la producción de energía renovable y la valorización de residuos cuentan con apoyo gubernamental. Dependiendo de los programas de ayudas disponibles, una planta de biogás puede recibir subvenciones anuales que varían entre 100.000 y 500.000 euros (Scarlat et al., 2018; Korres et al., 2013). Estas ayudas pueden jugar un papel importante en la viabilidad económica de la planta, cubriendo parte de los costos operativos y ayudando a compensar fluctuaciones en los ingresos derivados de la venta de energía y subproductos.

Créditos de carbono y certificaciones ambientales

Otra fuente de ingresos menos conocida pero cada vez más relevante es la venta de **créditos de carbono**. Las plantas de biogás que ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero pueden vender estos créditos en el mercado internacional de carbono. Dependiendo del precio del carbono, que puede oscilar entre 5 y 25 euros por tonelada de CO₂ evitado (Deublein & Steinhauser, 2011), los ingresos anuales por créditos de carbono pueden variar entre 10.000 y 50.000 euros, dependiendo de la cantidad de CO₂ que la planta logre evitar.

7.4. Retorno de la inversión (ROI)

El retorno de la inversión (ROI) es una métrica fundamental para evaluar la viabilidad económica de una planta de biogás. Se calcula dividiendo los ingresos netos anuales entre la inversión inicial total y multiplicando por 100 para obtener un porcentaje.

Ejemplo de cálculo del ROI

Considerando una inversión inicial de 3 millones de euros, ingresos anuales de 1.000.000 euros y costos operativos de 500.000 euros, el ingreso neto sería de 500.000 euros. El ROI se calcula así:

$$\text{ROI} = \left(\frac{500.000}{3.000.000} \right) \times 100 = 16,67\% \quad \text{ROI} = \left(\frac{500.000}{3.000.000} \right) \times 100 = 16,67\%$$

En este ejemplo, el retorno de la inversión sería del **16,67% anual**, lo que implica una recuperación de la inversión en aproximadamente **6 años**.

Este ROI puede variar en función de la capacidad de la planta, el mercado de energía, la optimización de los costos operativos y la obtención de subvenciones o ayudas públicas, lo que puede acelerar la recuperación de la inversión.

8. Bibliografía

- Abbassi-Guendouz, A., Brockmann, D., Trably, E., Dumas, C., Delgenès, J. P., Steyer, J. P., & Escudié, R. (2012). Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. *Bioresource Technology*, 111, 55-61.
- Al Afif, R., & Amon, T. (2019). Mesophilic anaerobic co-digestion of cow manure with three-phase olive mill solid waste. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(15), 1800-1808.
- Alvarado Turcios, C. E. (2017). *Potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos biodegradables de la Terminal zona 4* (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1993). Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 38(4), 560-564.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L., & Ahring, B. K. (2006). Applications of the anaerobic digestion process. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 102, 1-33.
- Awe, O. W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D. P., & Lyczko, N. (2017). A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies. *Waste and Biomass Valorization*, 8(2), 267-283.
- Bond, T., & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 347-354.
- Carlini, M., Castellucci, S., & Moneti, M. (2015). Anaerobic co-digestion of olive-mill solid waste with cattle manure and cattle slurry: Analysis of bio-methane potential. *Energy Procedia*, 81, 354-367.
- Castro Rivera, R., Solís Oba, M. M., Chicatto Gasperín, V., & Solís Oba, A. (2020). Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(3), 529-539.
- Castro, L., Escalante, H., Jaimes-Estévez, J., Díaz, L. J., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource technology*, 239, 311-317.
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044-4064.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources*. John Wiley & Sons.
- Espeso, J., Isaza, A., Lee, J. Y., Sörensen, P. M., Jurado, P., Avena-Bustillos, R. D. J., ... & Arboleya, J. C. (2021). Olive leaf waste management. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 660582.

- Fernández, L. M. G., Estévez, E. P., Navarrete, B., & Falcón, R. G. (2022). Estimation of methane production through the anaerobic digestion of greenhouse horticultural waste: A real case study for the Almeria region. *Science of The Total Environment*, 807, 151012.
- Flotats Ripoll, X., Bonmatí Blasi, A., Fernández García, B., Sales Márquez, D., Aymerich Soler, E., Irizar Picón, I., ... & Font Segura, X. (2016). Ingeniería y aspectos técnicos de la digestión anaeróbica.
- Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. John Wiley & Sons.
- Girardi, F., Mascitti, A., d'Alessandro, N., Tonucci, L., Marzo, G. A., & Remetti, R. (2023). Effects of oxidative treatments on biomethane potential of solid olive residues. *Waste and Biomass Valorization*, 14(5), 1525-1538.
- Jerez Cañadas, A. (2022). *Planta para la digestión anaerobia para la obtención de biogás para planta de ciclo combinado* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737-1744.
- Korres, N. E., et al. (2013). *Bioenergy Production by Anaerobic Digestion: Using Agricultural Biomass and Organic Wastes*. Routledge.
- Koster, I. W., & Lettinga, G. (1984). The influence of ammonium-nitrogen on the specific activity of pelletized methanogenic sludge. *Agricultural Wastes*, 9(3), 205-216.
- Koster, I. W., & Lettinga, G. (1988). Anaerobic digestion at extreme ammonia concentrations. *Biological Wastes*, 25(1), 51-59.
- Kothari, R., Tyagi, V. V., & Pathak, A. (2014). Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3164-3170.
- Lansing, S., Botero, R. B., & Martin, J. F. (2008). Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresource Technology*, 99(13), 5881-5890.
- Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821-826.
- Liu, Y., & Whitman, W. B. (2008). Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic Archaea. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1125(1), 171-189.
- Mao, C., et al. (2015). *Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555.
- Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 242-257.

- Palau Estevan, C. V. (2016). Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás. Fundamentos.
- Papachristopoulos, E., Tsiaras, E., Papadakis, V. G., & Coutelieris, F. A. (2023). Design of a Biogas Power Plant That Uses Olive Tree Pruning and Olive Kernels in Achaia, Western Greece. *Sustainability*, 16(1), 187.
- Rajendran, K., Aslanzadeh, S., & Taherzadeh, M. J. (2012). Household biogas digesters—A review. *Energies*, 5(8), 2911-2942.
- Sarabia Méndez, M. A., Laines Canepa, J. R., Sosa Olivier, J. A., & Escalante Espinosa, E. (2017). Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(1), 109-116.
- Scarlat, N., Dallemand, J. F., & Fahl, F. (2018). *Biogas: Developments and perspectives in Europe*. *Renewable Energy*, 129, 457-472.
- Schnürer, A., & Jarvis, A. (2010). Microbiological handbook for biogas plants. Swedish Gas Centre Report, 207(10), 48.
- Stams, A. J. M., & Plugge, C. M. (2009). Electron transfer in syntrophic communities of anaerobic bacteria and archaea. *Nature Reviews Microbiology*, 7(8), 568-577.
- Uddin, M. A., Siddiki, S. Y. A., Ahmed, S. F., Rony, Z. I., Chowdhury, M. A. K., & Mofijur, M. (2021). Estimation of sustainable bioenergy production from olive mill solid waste. *Energies*, 14(22), 7654.
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860.
- Wu, S., Ni, P., Li, J., Sun, H., Wang, Y., Luo, H., ... & Dong, R. (2016). Integrated approach to sustain biogas production in anaerobic digestion of chicken manure under recycled utilization of liquid digestate: Dynamics of ammonium accumulation and mitigation control. *Bioresource technology*, 205, 75-81.
- Yenigün, O., & Demirel, B. (2013). Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. *Process Biochemistry*, 48(5-6), 901-911.
- Zehnder, A. J. (1988). *Biology of anaerobic microorganisms* (pp. xii+-872).
- Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2016). Bioelectrochemical recovery of waste-derived resources: Principles and future perspectives. *Environmental Science & Technology*, 50(12), 6387-6397.

