

EL BAÚL DE LA CIENCIA

La transformación de los residuos una clave para la producción de energía

Elia Judith Martínez Torres

Dpto. de Química y Física Aplicada, Área de Ingeniería Química, Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071, León. ejmartr@unileon.es

Resumen

La transformación de los residuos orgánicos en biogás a partir de digestión anaerobia supone un impulso al desarrollo de la economía circular de los países, sobre todo en los sectores de tratamiento de aguas, residuos municipales, industria agropecuaria, del procesado de alimentos, entre muchas otras. El aprovechamiento de residuos orgánicos permite una valorización de algo que ya no tiene utilidad y presenta numerosas ventajas, principalmente la obtención de energía de origen renovable en forma de un gas combustible evitando emisiones de metano y dióxido de carbono asociadas a los combustibles fósiles, pero además el producto sólido resultante puede usarse como biofertilizante, lo que lleva a una gestión más sostenible de este tipo de residuos.

Palabras clave

Biogás, descarbonización, digestión anaerobia, energía, gas renovable, generación sostenible, gestión de residuos

Introducción

Para dar un contexto sobre la importancia de la transformación de los residuos en energía, empezaré brevemente con la situación del sistema eléctrico nacional, uno de los principales actores en este tema. Para el año 2022 se observó en España un crecimiento en la generación eléctrica del 6,3 % respecto a 2021 y muy por encima de los valores registrados en años anteriores, a pesar de los valores máximos de producción eólica y solar fotovoltaica, la generación renovable en el sistema eléctrico nacional en este año 2022 se vio reducida un 4,0 % y su intervención en el mix nacional fue tan solo del 42,2 % respecto al 46 % del año 2021, esto debido principalmente a un descenso importante de la producción hidráulica (Red Eléctrica Española, n.d.-a).

En los primeros nueve meses de 2023, la producción renovable creció un 12,2 % respecto al mismo periodo del año anterior y se prevé que el país puede generar más de la mitad de su electricidad a partir de fuentes renovables, alcan-

zando un importante hito de descarbonización este año, superando a otros países europeos como Francia, Alemania, Italia y Reino Unido (Roca, 2023).

España es un líder europeo en cuanto a las energías renovables se refiere, registrando una importante capacidad instalada de energía eólica y solar en los últimos 10 años. Sin embargo, hablando de residuos y generación de energía, aún hay un importante potencial por explotar ya que, como podemos observar en la **Tabla 1**, la generación eléctrica a partir de residuos sólo correspondió entre un 0,3 a un 0,7 % del mix energético en cuanto a energía renovable se refiere.

Tabla 1. Estructura de la generación de energía eléctrica renovable (enero a octubre de 2023) (Red Eléctrica Española, n.d.-b)

Tipo de Generación	ene/23	feb/23	mar/23	abr/23	may/23	jun/23	jul/23	ago/23	sep/23	oct/23
Hidráulica	20,72	16,99	11,52	9,743	9,06	13,87	8,04	6,07	7,06	8,82
Nuclear	27,31	31,69	28,79	29,07	24,41	29,06	32,13	31,66	34,52	34,66
Hidroeléctrica	0,009	0,006	0,009	0,01	0,013	0,006	0,017	0,017	0,01	0,003
Eólica	40,03	32,23	37,77	31,18	35,59	22,33	24,05	26,94	27,25	19,76
Solar fotovoltaica	9,35	14,88	17,44	23,90	25,14	27,86	28,41	28,11	25,39	29,51
Solar térmica	0,64	1,23	2,31	3,98	3,26	3,92	4,82	4,55	3,036	4,08
Otras renovables	1,56	2,461	1,736	1,738	2,206	2,331	2	2,148	2,166	2,47
Residuos renovables	0,36	0,49	0,40	0,36	0,29	0,58	0,52	0,48	0,55	0,67

Mientras la demanda de energía asciende cada año y prima la necesidad de descarbonizar nuestro sistema eléctrico produciendo cada vez más energía a partir de renovables, generamos alrededor de 105 millones de toneladas de residuos anuales (Instituto Nacional de Estadística, n.d.).

El acelerado aumento de población, nuestra mejor calidad de vida y el ascendente volumen de consumo en los últimos años nos han llevado a enfrentarnos a una cantidad preocupante de residuos (ver **Fig. 1**), estos representan un problema grave, de naturaleza ambiental y social, lo que nos conduce a la necesidad de aplicar sistemas adecuados de gestión.

Por ello, las políticas de gestión de residuos que aplica la Unión Europea (EU) y la legislación española en la actualidad, tienen como objetivo reducir los impactos ambientales y de salud que puede ocasionar la acumulación de residuos, pero también buscan mejorar la eficiencia de nuestros recursos extrayendo de los residuos tanto beneficio como sea posible.

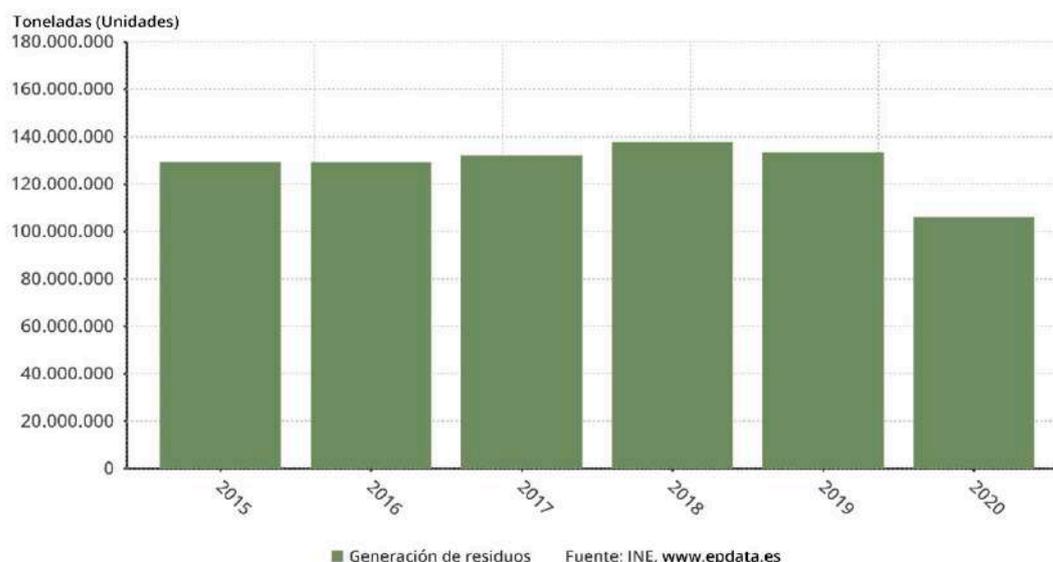


Figura 1. Evolución del número de residuos generados en España.

La Directiva Europea 98/2008/CE de residuos introdujo una jerarquía de cinco pasos en la que la prevención es la mejor opción, seguida de la reutilización, el reciclaje y otras formas de valorización como la transformación en energía, prevaleciendo sobre la eliminación en el vertedero (Council Directive 2008/98/CE, 2008). Por otro lado, en España la Ley 22/2011, de 28 de julio de residuos y suelos contaminados para una economía circular, pretende avanzar en los principios de la economía circular, lo que permitirá abordar diferentes problemáticas actuales, tales como, la mejora ambiental, el autoabastecimiento energético y la descarbonización de la economía.

En este marco, el aprovechamiento de residuos para la producción de energía a partir de gas renovable es ahora una alternativa de gran relevancia,

debido a que responde de forma simultánea a los problemas antes planteados, desde el punto de vista energético y de economía circular para alcanzar un modelo de cero residuos.

Cualquier gas que proceda o sea producido a partir de fuentes renovables se considera gas renovable. Estos gases son el biogás-biometano, el hidrógeno y el gas sintético o Syngas. Todos ellos tendrán un papel clave para cumplir con los objetivos del Marco Europeo sobre Clima y Energía para 2030 y alcanzar la descarbonización energética ya que, entre otras ventajas, contribuyen a la reducción de emisiones de CO₂ y fomentan la economía circular. Además, dotarán al sistema energético del futuro, de flexibilidad y firmeza para garantizar la seguridad de suministro, favoreciendo el acoplamiento del sector gasista y el eléctrico, y posibilitando una completa descarbonización (*Gases Renovables | SEDIGAS - Asociación Española Del Gas*, n.d.).

De entre todos ellos, el biogás es el gas renovable que tiene la primacía en el corto y medio plazo, por aspectos de desarrollo tecnológico, potencial disponible y costes de producción. Tras su enriquecimiento hasta biometano, puede tener los mismos usos y usuarios y utilizar la misma infraestructura que el gas natural (*Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030*, n.d.).

El biogás se genera a partir de la descomposición de los residuos de naturaleza orgánica en ausencia de oxígeno en un proceso conocido como digestión anaerobia. Durante mi experiencia a lo largo de 12 años en este campo, he podido observar la evolución de esta tecnología; la digestión anaerobia para la producción de biogás se ha convertido hoy en día en una herramienta imprescindible para alcanzar una sociedad sostenible. La reciente aprobación en Hoja de Ruta de Biogás en el año 2022 da fe de ello; este documento tiene como objetivo identificar las oportunidades y los problemas para el pleno desarrollo del biogás en España, y aporta diversas líneas de acción para fomentar inversión y aumentar la producción de biogás de 10,41 TWh anuales en 2030 (*Gases Renovables | Enagás*, n.d.).

La digestión anaerobia para la producción de biogás

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico donde las sustancias orgánicas complejas se transforman biológicamente, mediante la interacción de un grupo de microorganismos específicos y en ausencia de oxígeno, produciendo un material digerido sólido (mezcla de minerales N, P, K, Ca) y un producto gaseoso conocido como biogás. Es un proceso complejo en el que intervienen diferentes grupos microbianos de manera coordinada y secuencial; la interacción cooperativa de varios grupos fisiológicos de procariotas permite la formación de metano a partir de sustancias de elevado peso molecular, tales como polisacáridos, proteínas y grasas. Los precursores inmediatos del metano son el hidrógeno y el dióxido de carbono, que se generan por las actividades de los fermentadores anaerobios.

A pesar de su complejidad, su aplicación para la gestión-estabilización de residuos orgánicos genera un gran interés, motivado principalmente por la creciente sensibilización hacia los problemas del medio ambiente, el elevado precio de los combustibles fósiles, el empobrecimiento de los suelos agrícolas en materia orgánica, el encarecimiento de los fertilizantes minerales, etc. (Martínez Torres, 2015).

Esta tecnología se ha aplicado a nivel mundial gracias a su capacidad de degradar altas cargas de materiales orgánicos y producir biogás. Los residuos deben considerarse ahora “recursos renovables” que pueden utilizarse para generar nuevos productos, en lugar de productos sin valor alguno.

El biogás es el principal componente energético derivado de la digestión, pero el proceso también proporciona un subproducto secundario conocido como digerido o digestato, el cual puede usarse como una valiosa enmienda orgánica (Ver Fig. 2).

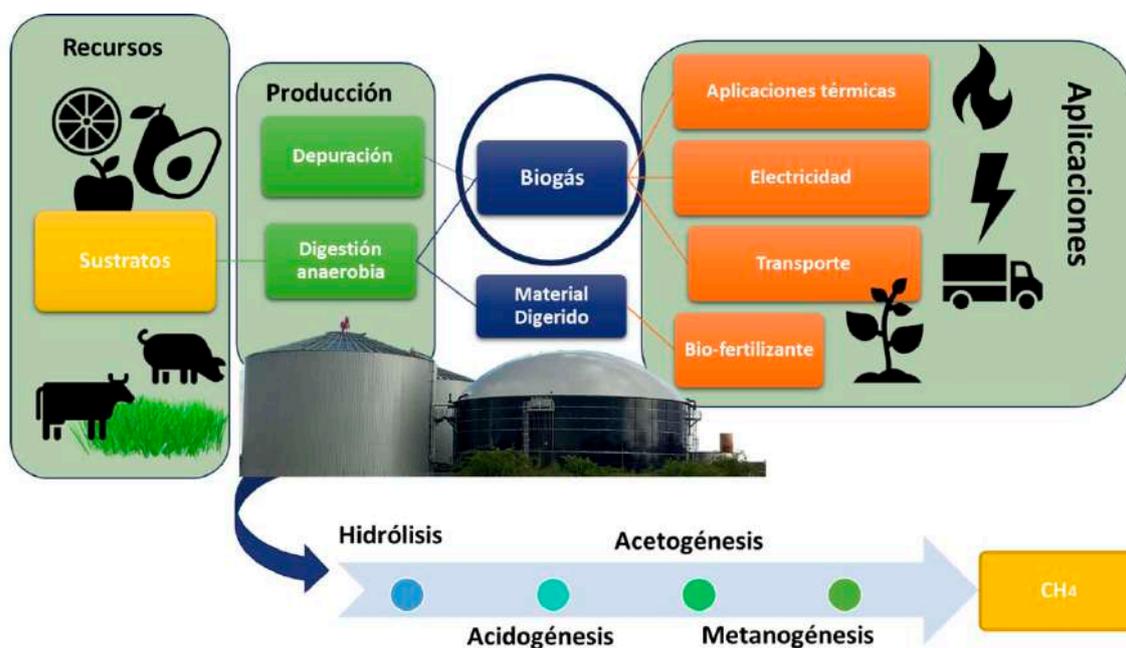


Figura 2. Esquema de la producción de biogás mediante residuos orgánicos.

El biogás

El biogás es un gas combustible que contiene principalmente tres componentes, que son metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2). Sin embargo, también existen otras especies traza, que son sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2), amoníaco (NH_3), oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO). Además, el biogás típico está saturado con agua, partículas de polvo, siloxanos, y compuestos aromáticos y halogenados, pero las cantidades de estos compuestos traza son muy bajas en comparación con el CH_4 y el CO_2 (Khan *et al.*, 2017).

En términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el biogás consigue, no solo el uso de un combustible 100 % renovable, sino también una reducción adicional de emisiones no energéticas (principalmente CH_4), asociadas a una mejor gestión de los residuos municipales, los lodos de depuradora y los residuos tanto agrícolas y ganaderos como de la industria agroalimentaria.

Aplicaciones del biogás

Actualmente, el biogás se utiliza en calderas, para producir calor, como combustible en motores o turbinas para generar electricidad, o para vehículos en el transporte, purificado para introducirlo en redes de gas natural, o como material base para la síntesis de metanol.

La generación de la energía eléctrica es hoy en día un punto crítico en la descarbonización del sistema energético ya que se produce principalmente por combustibles fósiles. La Generación Distribuida (GD) representa un cambio importante en la generación centralizada o convencional. El uso de este escenario, donde la generación se encuentre lo más cerca al punto de consumo, permitirá una introducción más eficiente de las tecnologías renovables para la generación de energía eléctrica.

El objetivo de la transición de energías fósiles a energías renovables es la descarbonización del sector energético, que tiene como objetivo abordar la cuestión del impacto ambiental. La producción de energía renovable suele estar mucho más descentralizada que la producción de energía fósil y suele aplicarse ampliamente en las zonas rurales (**Fig. 3**).

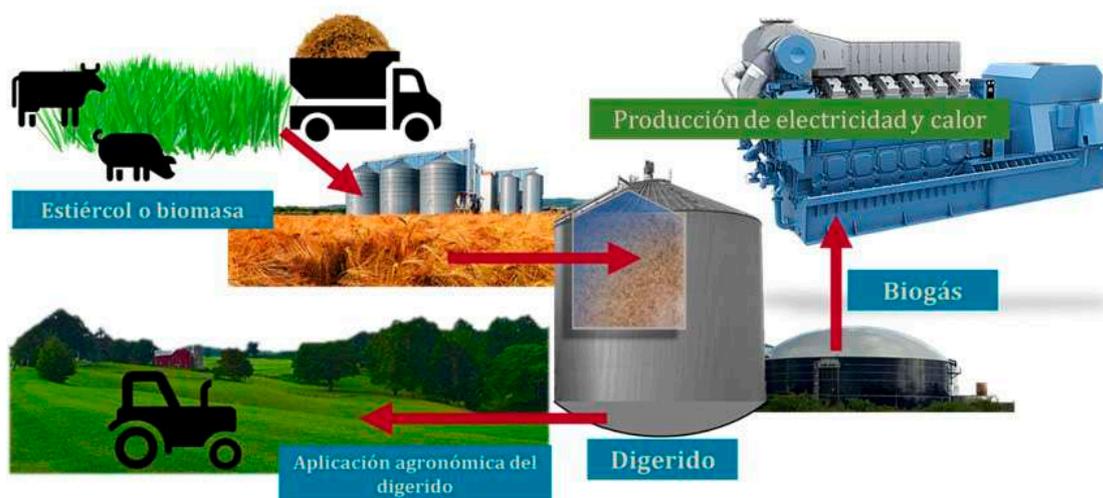


Figura 3. Esquema de producción de biogás para el suministro flexible de electricidad y calor.

Biogás inyectado a la Red Gas Natural

La red de gas actual juega un papel único para la entrega distribuida de calor para uso doméstico e industrial. Su sustitución puede no ser tan fácil como parece. Hasta la fecha, se han identificado algunas opciones clave para la descarbonización del sector de la calefacción y la reducción de la utilización de gas natural. Una primera opción consiste en la electrificación de la demanda final de calefacción mediante la utilización de bombas de calor impulsadas por electricidad renovable o sistemas CHP de celdas de combustible distribuidas. En este último caso, el calor se coproduce con electricidad en generadores electroquímicos de alta eficiencia y se aprovecha más eficientemente el gas de la red (tanto de origen fósil como de mezclado). Una segunda opción de descarbonización considera la implementación de redes de calefacción (Troup, 2016). La energía térmica se produce en plantas de energía centralizadas y luego se distribuye como mercancía a los usuarios alcanzados por la red de calefacción. Además, se espera que las redes de calefacción urbana de cuarta generación (Lund *et al.*, 2014) desempeñen un papel importante en la descarbonización de los sistemas energéticos urbanos, que podrán recoger y distribuir el calor procedente de diferentes fuentes distribuidas (generadores de cogeneración, calor residual de procesos industriales, grandes bombas de calor a gran escala y calor de fuentes renovables). En este escenario, la red de gas (nivel de distribución) puede quedar obsoleta y ser sustituida por otro tipo de red. Una última opción para la descarbonización del sector de la calefacción la ofrece la descarbonización “directa” de la red de gas, que es el escenario investigado en este trabajo. Consiste en el uso continuado de la red de gas natural que permite la explotación de combustibles más ecológicos (por ejemplo, biogás y H_2). Aprovechando la distribución geográfica generalizada de los sistemas de red de gas natural y un gran *stock* de aparatos de calefacción alimentados con gas, la descarbonización se logra a través de un cambio en el vector de energía transportada. La red de gas ya no suministrará gas natural fósil, sino una mezcla de gas natural fósil y gases bajos en carbono (es decir, biometano, gas natural sintético o hidrógeno) (Cavana y Leone, 2019; Hengeveld *et al.*, 2016).

La inyección de biometano en la red de gas es una práctica ya asentada en países como Alemania, Suecia, Holanda, Suiza y Austria. En la actualidad, en España únicamente se inyecta biometano a la red de transporte de gas desde la planta de biometanización del Parque Tecnológico de Valdemingómez (Madrid), resultado de una iniciativa pública. Enagás ha puesto en marcha la iniciativa *Green Link* para facilitar este tipo de conexiones a la red de gasoductos de alta presión de producciones de biometano y otros gases renovables. Este proyecto es una solución tecnológica eficiente y modular que contribuye a la descarbonización, con el impulso de los gases renovables como el biometano, y potencia el desarrollo de la economía circular, gracias a la valorización de residuos orgánicos. Asimismo, es una iniciativa tractora de empleo y desarrollo local (*Primera Conexión de Biometano a La Red Gasista Impulsada Por Una Iniciativa Privada* | Enagás, n.d.).

Procesos de limpieza y enriquecimiento de biogás

Como se ha mencionado anteriormente, el biogás se puede utilizar para la combustión directamente, o purificarse-mejorarse para separar la fracción de metano. El biometano puede usarse como biocombustible gaseoso para la producción de calor y / o electricidad mediante su valorización en sistemas de cogeneración, o simplemente su uso como combustible en calderas para la producción de calor.

Las tecnologías actualmente desarrolladas y disponibles a escala industrial para la mejora del biogás incluyen adsorción, absorción (física y química), separación por membrana y criogénica. Estas tecnologías se utilizan principalmente para la separación de CO₂, mientras que una etapa previa al enriquecimiento se requiere para reducir las altas concentraciones de contaminantes como H₂O, H₂S y siloxanos (Khan *et al.*, 2017). Una clasificación más detallada de estas tecnologías de mejora se muestra en **Figura 4**.

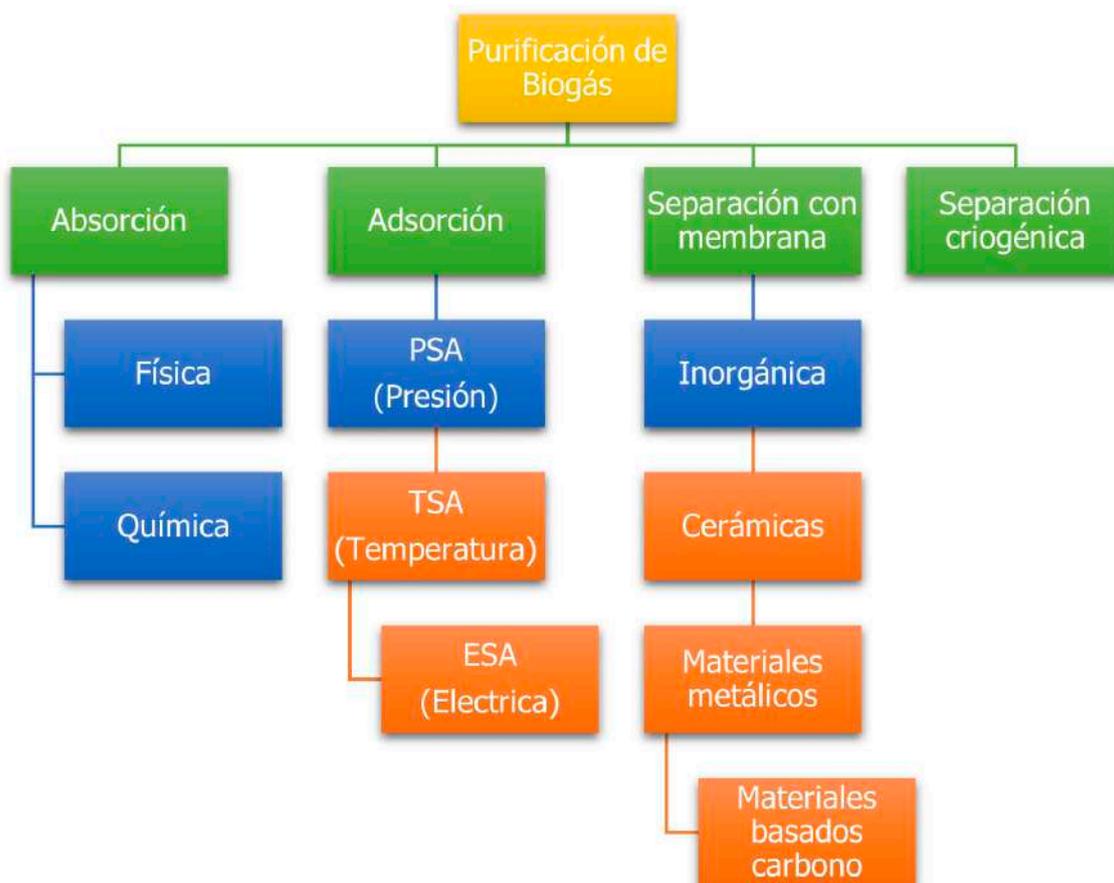


Figura 4. Tecnologías disponibles a escala industrial para la mejora del biogás (Adaptado de Abatzoglou y Boivin, 2009).

El biogás puede tratarse mediante diversas tecnologías, destinadas a incrementar su calidad energética y de este modo inyectarse en las redes de gas natural, usarse como portador de energía o como intermediario para producir bio-

hidrógeno. Los procesos de limpieza de biogás son intensivos energéticamente y requieren normalmente de alta presión, resultando en sistemas que incrementan significativamente los costes de operación y mantenimiento de las instalaciones. La **Tabla 2** indica las principales aplicaciones del biogás y el grado de purificación necesario.

Tabla 2. Grado de purificación necesario según aplicación final del biogás.

Aplicación	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O	Siloxanos
Motor estacionario	<1000 ppm	No	No	Sí
Microturbina	<70 000 ppm	No	Sí	Sí
Co-generación	<1000 ppm	No	Evitar condensación	Sí
Motor vehículos	Sí	Sí	Sí	Sí
Pilas combustibles	<0,1 ppm	No es diluyente	No	Sí
Inyección a la red	Sí	Sí	Sí	Sí

Los costos para la aplicación de la purificación o limpieza no son el único criterio para seleccionar la tecnología de mejora de biogás. También es esencial que la tecnología específica pueda satisfacer el requisito específico para su aplicación. Por lo tanto, se intenta proporcionar consideraciones críticas sobre las tecnologías de purificación de biogás disponibles, las diversas utilidades de biogás, la conversión a bio-GNC (gas natural comprimido) y su almacenamiento para usos posteriores.

El biogás se puede utilizar como sustituto del gas natural en todas las aplicaciones, pero es difícil alcanzar los requisitos de calidad para algunas aplicaciones específicas (Khan *et al.*, 2017).

El papel de las plantas de biogás para la transformación de los residuos y la producción de la energía

Las plantas de biogás recibirán una atención importante en los próximos años, porque presentan algunas ventajas en comparación con otras plantas de energía renovable, como el suministro flexible de electricidad y calor mediante el almacenamiento de gas, o la posible contribución de energía al sector del transporte y al sistema gasista.

Este tipo de plantas permitirán la producción de energía a partir de los residuos orgánicos generados de diversos sectores industriales tales como el agrícola-ganadero, alimentario, aceitero, el de bebidas alcohólicas, el sector del papel, etc., utilizándose en su propio autoconsumo energético, en la obtención de biocombustibles y, en el caso de los excedentes, en su comercialización para generar ingresos extras para la instalación (*Tipos de Plantas de Biogás Adaptadas a La Industria - Genia Bioenergy, n.d.*).

De acuerdo con la asociación europea del biogás (EBA), el número de plantas de este tipo en Europa creció a un ritmo constante a lo largo de 2018, hasta alcanzar las 18.202 unidades. Esto representó un aumento del 2 % con respecto a 2017, con 419 instalaciones de biogás adicionales. Los líderes en número de plantas son Alemania (11.084 plantas) e Italia (1.655 plantas). Les siguen Francia (837 plantas), Reino Unido (715 plantas) y Suiza (634 plantas). A finales de 2021 existían en la Unión Europea casi 19.000 plantas de biogás. La evolución de este dato es notable en la última década (**Figura 5**) (*European Biogas Association, n.d.*).

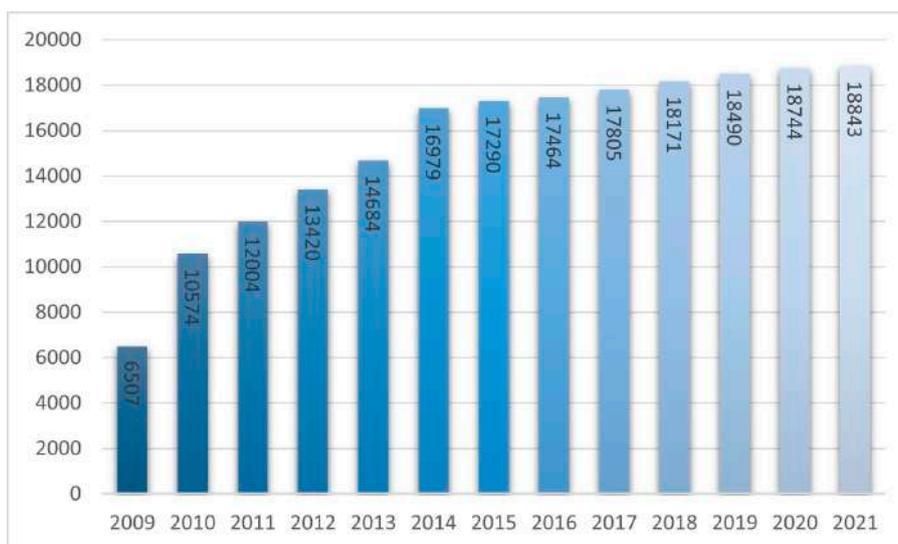


Figura 5. Evolución del número de plantas de biogás en Europa.

En España hay diversas instalaciones de biogás, con una producción energética de 2,74 TWh. De las plantas operativas, 46 están asociadas a vertederos, 34 a estaciones de depuración de aguas residuales, 13 al sector agropecuario, siete al sector del papel y el resto al sector químico, el alimentario y otros. En el año 2021 sólo una instalación, en Madrid, purificó el biogás en biometano y lo inyectó en la red de gasoductos, poco comparado con el resto de Europa, donde hay cerca de 725 plantas que inyectan biometano a la red gasista. El biogás ha tenido un desarrollo modesto en el país; sin embargo este ofrece un gran potencial, ya que en los sectores responsables de la generación de residuos orgánicos (como en el sector agropecuario y el agroalimentario) existen muchas industrias de gran tamaño que pueden activar el mercado rápidamente (Elorriaga, 2021).

Contribución al ámbito de la transformación de los residuos para la producción de Energía con la investigación

Como he mencionado anteriormente, mi experiencia en la investigación comenzó hace 12 años con el grupo de ingeniería química ambiental y bioprocesos (IQUIMAB). Este grupo de la Universidad de León sigue diferentes líneas de investigación entre las que destaca la valorización energética de los residuos orgánicos, línea donde tuve la oportunidad de realizar mi trabajo y obtener el título de doctor en el año 2015. A continuación, haré un breve resumen de algunos de los principales resultados obtenidos a lo largo de los últimos años relacionados con esta temática y acorde con el contenido de este artículo.

La digestión anaerobia se viene aplicando en las estaciones depuradoras de aguas residuales desde hace décadas para el tratamiento de los lodos que se generan como subproducto del tratamiento de las aguas residuales. Esta tecnología juega un papel importante en la transformación de la materia orgánica en biogás y en la reducción de la cantidad de sólidos del lodo final y de patógenos presentes en el lodo.

En la mayoría de los casos, los lodos de depuradora se digieren solos, aunque la codigestión con otros sustratos podría ser beneficiosa con respecto al aumento de la producción de biogás (Luostarinen *et al.*, 2009). La codigestión o digestión conjunta de residuos es una estrategia muy utilizada para mejorar el rendimiento de biogás obtenido de los residuos; permite entre otras ventajas la dilución de compuestos tóxicos dentro del procesos, el incremento de la carga orgánica en el digestor, el aumento de la estabilización del digerido y el ahorro por el aprovechamiento de equipo y costes.

En el año 2011 se investigó la codigestión de lodos de depuradora con dos residuos diferentes de alto contenido de lípidos. La primera parte del trabajo experimental se centró en una evaluación de la codigestión de lodos de depuradora y residuos de aceites y grasas (FOG) separados de la trampa de grasas colocada en la etapa de pretratamiento en la depuración de aguas residuales (**Fig. 6a**). La segunda parte del trabajo experimental estudió la digestión individual de la grasa recuperada en la trampa de grasas de una planta procesadora de leche (**Fig. 6b**). El proceso de digestión se realizó en operación discontinua y semicontinua y a temperaturas mesófilas.

Se logró una digestión exitosa de los desechos, sin consecuencias inhibitoras, debido a la acumulación de ácidos grasos de cadena larga; además se observó un aumento en la producción de biogás durante la digestión por lotes de lodos de depuradora cuando se añadió el FOG como cosustrato. Respecto a la digestión de la grasa del procesado de leche, se observó también una operación exitosa en la codigestión; sin embargo, la adición de nutrientes puede ser necesaria para mantener este proceso a largo plazo (Martínez *et al.*, 2011).



Figura 6. Digestión de residuos con alto contenido en lípidos (a) FOG, (b) grasa del procesado de leche (Martínez Torres, 2015).

A partir de los resultados del proyecto anterior se investigó la digestión de residuos con alto contenido de lípidos y se evaluó la codigestión de lodos de depuradora y residuos de aceites y grasas (FOG) separados de la trampa de grasas de una planta de tratamiento de aguas residuales (**Fig. 7a**). Se utilizó una relación volumétrica del 0,2 % establecido en función de la producción volumétrica de estas corrientes en la planta. La digestión se llevó a cabo bajo operación semi-continua a temperaturas mesófilas.

El tiempo de retención hidráulica de 30 días no produjo modificaciones observables en la producción específica de metano, cuando se añadió el cosustrato y en comparación con los resultados obtenidos de los sistemas de digestión de lodos. Sin embargo, una disminución en el tiempo de retención resultó en detrimento del reactor de codigestión, lo que se atribuyó a un proceso inhibitor asociado con la adsorción de FOG en lodos activos (ver evolución del proceso en la **Figura 7b**) (Martínez *et al.*, 2012).

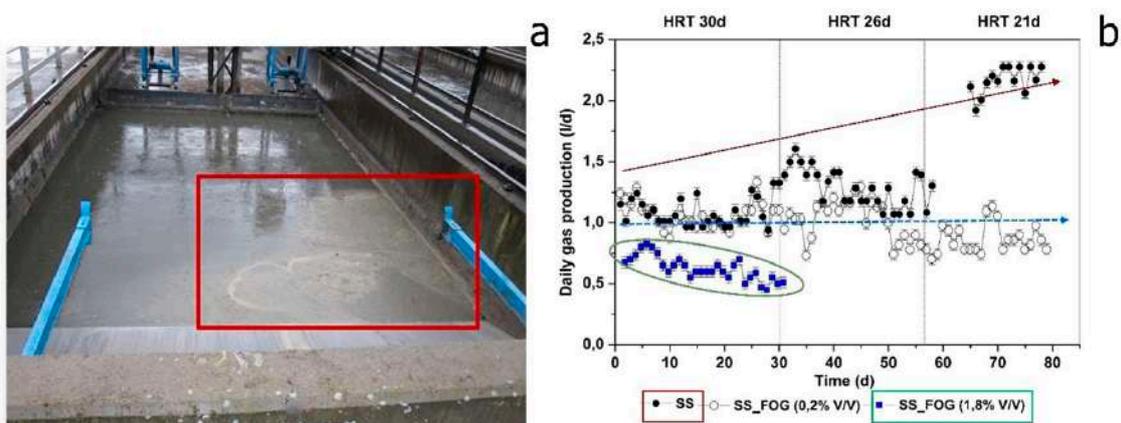


Figura 7. Digestión de residuos con alto contenido en lípidos. (a) Trampa de grasas en la estación depuradora para obtención de FOG, (b) Evolución de la digestión de los residuos (Martínez Torres, 2015).

En la misma línea de codigestión de residuos, los residuos grasos desechados de las carnicerías se utilizaron como cosustrato en la codigestión anaerobia

de lodos de depuradora. El proceso fue evaluado bajo condiciones mesófilas y termófilas. La codigestión se logró con éxito, a pesar de algunas etapas de inhibición iniciales que tuvieron su origen en la acumulación de ácidos grasos volátiles y a la adsorción de ácidos grasos de cadena larga. La adición de una grasa residual del procesado de alimentos mejoró la digestión y se obtuvo un mayor rendimiento de biogás gracias a la mayor tasa de carga orgánica aplicada a los reactores (**Figura 8a-b**). Sin embargo, la digestión termófila se caracterizó por un efluente de pobre calidad y alto contenido en ácidos grasos volátiles. Los resultados del análisis espectroscópico sugirieron la adsorción de componentes lipídicos sobre el digerido, perturbando así la degradación completa del sustrato durante el tratamiento. La formación de agregados grasos en el sistema termófilo evitó el fallo del proceso al impedir la exposición de la biomasa al efecto tóxico de altas concentraciones de ácidos grasos de cadena larga (**Figura 8c**) (Martínez *et al.*, 2016).

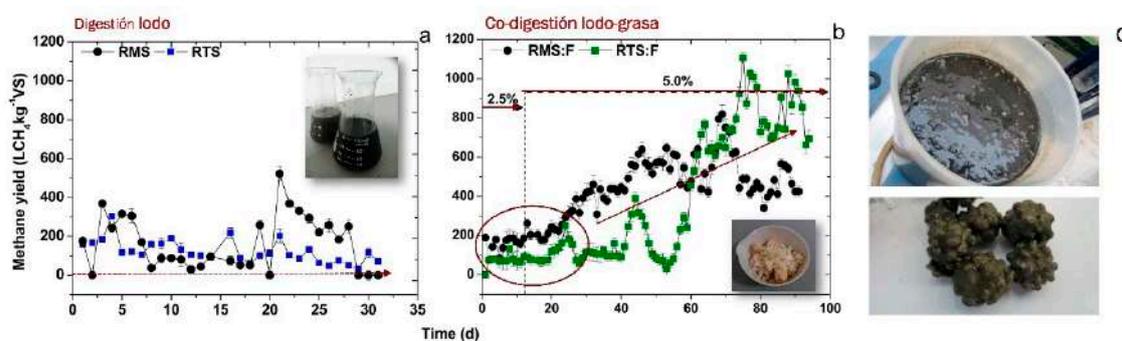


Figura 8. Evolución de la digestión de lodos de depuradora. (a) Digestión de lodo mezcla, en mesófilo y termófilo, (b) codigestión de lodo y grasa, (c) efluente de la digestión y agregados grasos (Martínez Torres, 2015).

Además de los residuos orgánicos provenientes del tratamiento de aguas o el procesado de alimentos, la digestión anaerobia es una tecnología eficiente también para valorizar otro tipo de residuos obtenidos de la agricultura y ganadería. En este tipo de biomasa, su dilución para ser tratada en un digestor anaeróbico convencional puede no ser una alternativa adecuada; para ello se propone el sistema de percolación en fase sólida. Este tipo de sistemas de digestión requiere un volumen bajo de agua, por lo que se necesita un reactor más pequeño. En esta línea, se estudió la digestión anaerobia del estiércol de aves y los lodos primarios en un reactor de percolación con alto contenido de sólidos.

Se observó una producción de biogás dos veces mayor con la adición de cosustrato junto con un aumento de 46 a 64 % en la eliminación de material orgánico. La acidificación inicial del percolado podría estar perfectamente equilibrado por la alta alcalinidad del sistema. El rendimiento de metano obtenido de la codigestión fue de 56,5 l CH₄/kg sólido volátil mientras que la digestión de estiércol de ave resultó en un valor de 24,6 (Fierro *et al.*, 2013).

En ocasiones, la codigestión usada como estrategia para mejorar el rendimiento de biogás no es suficiente o aplicable para el tratamiento de algunos

residuos orgánicos, por lo que, la aplicación de ciertos tratamientos previos o pretratamientos a los residuos puede aportar otro tipo de beneficios al proceso de digestión anaerobia. Este fue el caso del pretratamiento de ultrasonidos aplicado a los lodos de depuradora, con el fin de mejorar la digestión, cambiar la distribución del tamaño de partículas y aumentar la velocidad de deshidratación de los digeridos (medida por el tiempo de succión capilar (CST) y resistencia específica a la filtración (SRF)). Como resultados de esta investigación se observó un aumento en la producción de gas cuando se usó el lodo pretratado con ultrasonidos (24 kHz) a una dosis de energía de 4300 kJ/kg sólido total (**Fig. 9**). Además, el digerido de lodos activados residuales pretratados presentó un mejor comportamiento para la deshidratación (Martínez *et al.*, 2015).

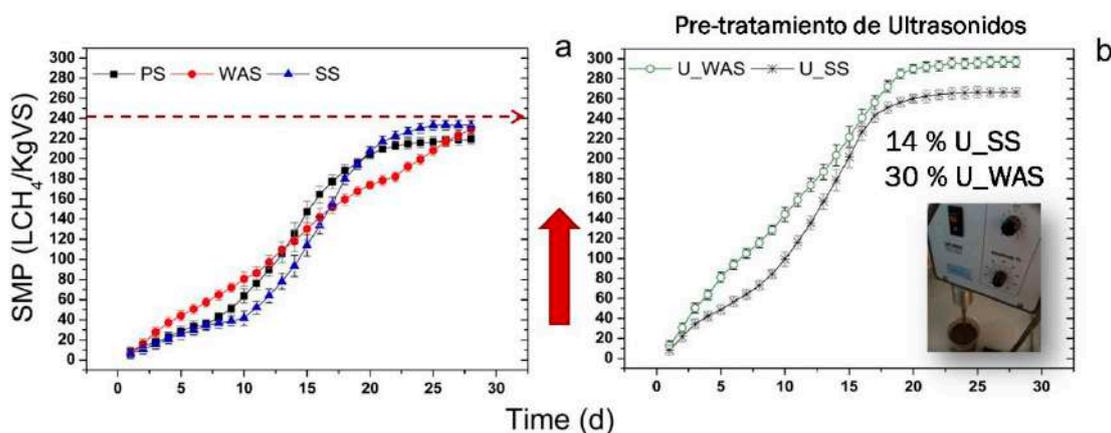


Figura 9. Evolución de la digestión de lodos de depuradora. (a) PS-Lodo primario, WAS-Lodo Secundario, SS-Lodo mezcla, sin tratamiento y (b) tratados con ultrasonidos (Martínez Torres, 2015).

Además de los ultrasonidos, se estudió el efecto del pretratamiento con microondas (MwP) sobre la digestión anaerobia de lodos de depuradora (**Fig. 10a**). El efecto del pretratamiento con bajo aporte de energía (<1000 kJ L⁻¹) sobre la solubilización de lodos se estudió con la ayuda de la metodología de superficie de respuesta. Posteriormente se estudió el proceso de pretratamiento a energías de 488-2700 kJ L⁻¹ para evaluar la mejora en la producción de biogás en condiciones mesófilas. Los resultados mostraron un aumento en la solubilización de la materia orgánica con el aumento de la energía aplicada. Las modificaciones en la superficie específica de la materia orgánica debido al pretratamiento dieron como resultado incrementos en la producción de metano (**Fig. 10b**). Sin embargo, se observó una acumulación de compuestos complejos en los perfiles térmicos al máximo aporte de energía (2700 kJ L⁻¹). Los experimentos de digestión semicontinua se evaluaron utilizando como sustrato lodos pretratados al valor energético óptimo (975 kJ L⁻¹), los resultados mostraron un aumento significativo en el rendimiento de metano (43 %) al evaluar el proceso en tiempos de retención hidráulica de 25 a 10 días (**Fig. 10c**) (Martínez *et al.*, 2017).

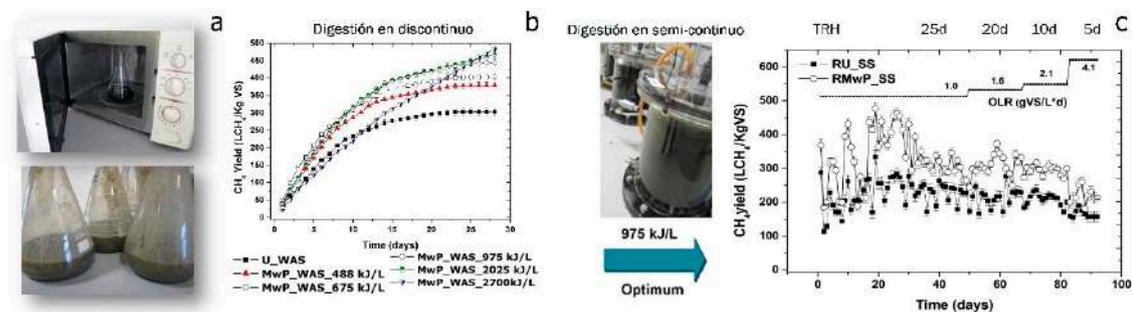


Figura 10. Evolución de la digestión de lodos de depuradora. (a) Pretratamiento con microondas, (b) digestión en discontinuo con diferente energía aplicada, (c) digestión en semicontinuo con el óptimo de energía de microondas (Martínez Torres, 2015).

Asimismo, durante estos últimos años se han evaluado otras estrategias para mejorar la producción de biogás y por ende la producción de energía obtenida de diferentes residuos. Se evaluó el efecto de la adición de pulsos de hidrógeno sobre el rendimiento de la digestión de lodos de depuradora como medio para incrementar la eficiencia de la producción de metano. La adición de hidrógeno a la digestión de lodos de depuradora dio como resultado un aumento del 12 % en la producción de biogás con respecto al control (1353 ml de CH₄ d⁻¹ a un caudal de inyección de 1938 ml de H₂ d⁻¹) (Martínez *et al.*, 2019).

Como estrategia de pretratamiento avanzado se utilizó la electrooxidación u oxidación electroquímica aplicada a residuos orgánicos difíciles de tratar, ya que, entre otros beneficios, la electrooxidación puede eliminar sustancias tóxicas en los sistemas biológicos y disminuye la cantidad de material orgánico a digerir, el cual probablemente puede dar lugar a inestabilidades que conduzcan al fracaso del proceso biológico. Se aplicó la electrooxidación como pretratamiento utilizando electrodos a base de diamante dopados con boro. El voltaje fue de 25 V y se probaron diferentes tiempos de tratamiento (que oscilaron entre 0,08 y 1,5 h) a 25 °C. Se evaluó la digestión anaeróbica de lías de vino (residuo con muy alta carga orgánica y sustancias complejas) en pruebas en discontinuo para investigar el efecto de la electrooxidación sobre el rendimiento de biogás. La electrooxidación mostró un efecto positivo significativo en la producción de biogás, aumentando su valor hasta 330 L kg⁻¹ de sólidos volátiles después de 1,5 h de tratamiento, en comparación con 180 L kg⁻¹ de sólidos volátiles medidos a partir de lías de vino crudas (Sevillano *et al.*, 2020).

Se revisó también la electrooxidación como medio para mejorar la estabilización de lodos. Se utilizaron electrodos de diamante dopados con boro para tratar lodos activados residuales y digestato bajo diferentes parámetros operativos (densidad de corriente, conductividad, pH y tiempo). Los procesos de electrooxidación afectaron la solubilización de la materia orgánica, lo que pareció mejorar las características de digestión anaeróbica y deshidratación (Figura 11) (Arenas *et al.*, 2021).

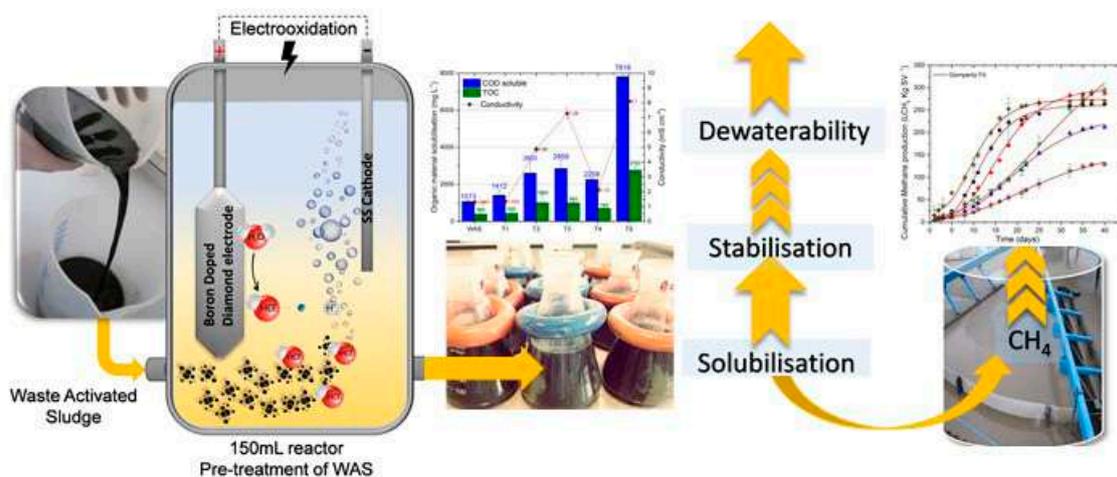


Figura 11. Aplicación de electrooxidación como pretratamiento avanzado para la digestión y estabilización de los lodos de depuradora (Arenas *et al.*, 2021).

Igualmente, se ha propuesto la oxidación electroquímica como una nueva vía para tratar el agua de proceso obtenida de la carbonización hidrotermal de la poda de olivo, esto con el objetivo de mejorar el rendimiento global de los tratamientos térmicos para la biomasa y en un futuro acoplarlo a un sistema biológico (González-Arias *et al.*, 2023).

En conclusión, la digestión anaerobia es una tecnología ahora conocida con amplia aplicación en el tratamiento de residuos orgánicos y producción de gases renovables traduciéndose en generación de energía limpia. La viabilidad económica de este tipo de instalaciones suele conseguirse gracias a la disponibilidad de incentivos fiscales, y hoy en día la digestión puede jugar un papel importante en cualquier proceso de transformación donde los subproductos necesiten una mayor estabilización, o puede ser el núcleo central de cualquier proceso de tratamiento de residuos, modificando el esquema actual mediante una sucesión de varias actividades con el objetivo de aumentar la eficiencia de la conversión. Así, las plantas actuales dedicadas al tratamiento de aguas residuales, estiércol animal o desechos de alimentos, pueden convertirse en centros especializados en la producción de bioenergía y productos químicos ecológicos.

Referencias

- Abatzoglou, N. y Boivin, S. 2009. A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3:42–71.
- Arenas, C.B., González, R., González, J., Cara, J., Papaharalabos, G., Gómez, X. y Martínez, E.J. 2021. Assessment of electrooxidation as pre- and post-treatments for improving anaerobic digestion and stabilisation of waste activated sludge. *Journal of Environmental Management*, 288: 112365.
- Cavana, M. y Leone, P. 2019. Biogas blending into the gas grid of a small municipality for the decarbonization of the heating sector. *Biomass and Bioenergy*, 127: 105295.

- Council Directive 2008/98/CE. 2008. Directive 2008/98/EC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>
- Elorriaga, J.C.G. 2021. Hoja de ruta del biogás para cuadruplicar la producción en 2030. *Gas Actual*, 160: 28–33.
- European Biogas Association. (n.d.). Retrieved October 14, 2023, from <https://www.europeanbiogas.eu/>
- Fierro, J., Martínez, J.E., Rosas, J.G., Blanco, D. y Gómez, X. 2013. Anaerobic codigestion of poultry manure and sewage sludge under solid-phase configuration. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(3): 866–872.
- Gases renovables | Enagás. (n.d.). Retrieved March 3, 2022, from https://www.enagas.es/enagas/es/Sostenibilidad/Compromiso con la transicion energetica/Gases_renovables
- Gases renovables | SEDIGAS - Asociación Española del Gas. (n.d.). Retrieved March 3, 2022, from <https://www.sedigas.es/new/gases-renovables/>
- González-Arias, J., de la Rubia, M.A., Sánchez, M.E., Gómez, X., Cara-Jiménez, J. y Martínez, E.J. 2023. Treatment of hydrothermal carbonization process water by electrochemical oxidation: Assessment of process performance. *Environmental Research*, 216, 4: 114773.
- Hengeveld, E.J., Bekkering, J., van Gemert, W.J.T. y Broekhuis, A.A. 2016. Biogas infrastructures from farm to regional scale, prospects of biogas transport grids. *Biomass and Bioenergy*, 86: 43–52.
- Instituto Nacional de Estadística. (n.d.). INEbase / Agricultura y medio ambiente / Residuos y Protección ambiental / Estadísticas sobre generación de residuos / Últimos datos. Retrieved October 10, 2023, from https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=estadistica_C&cid=1254736176841&menu=ulti-Datos&idp=1254735976612
- Khan, I.U., Othman, M.H.D., Hashim, H., Matsuura, T. *et al.* 2017. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management*, 150:277–294.
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S. *et al.* 2014. 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68: 1–11.
- Luostarinen, S., Luste, S. y Sillanpää, M. 2009. Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant. *Bioresource Technology*, 100: 79–85.
- Martínez, E.J., Fierro, J., Sánchez, M.E. y Gómez, X. 2012. Anaerobic co-digestion of FOG and sewage sludge: Study of the process by Fourier transform infrared spectroscopy. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 75: 1-6.
- Martínez, E.J., Gil, M. V., Rosas, J. G., Moreno, R., Mateos, R., Morán, A. y Gómez, X. 2017. Application of thermal analysis for evaluating the digestion of microwave

- pre-treated sewage sludge. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(2): 1209–1219.
- Martínez, E.J., Gil, M.V, Fernández, C., Rosas, J.G. y Gómez, X. 2016. Anaerobic codigestion of sludge: addition of butcher's fat waste as a cosubstrate for increasing biogas production. *PloS One*, 11(3): 1–13.
- Martínez, E.J., Redondas, V., Fierro, J., Gómez, X., y Morán, A. 2011. Anaerobic digestion of high lipid content wastes: FOG co-digestion and milk processing fat digestion. *Journal of Residuals Science & Technology*, 8: 53–60.
- Martínez, E., Rosas, J., Morán, A. y Gómez, X. 2015. Effect of ultrasound pretreatment on sludge digestion and dewatering characteristics: application of particle size analysis. *Water*, 7(11): 6483–6495.
- Martínez, E., Sotres, A., Arenas, C., Blanco, D., Martínez, O. y Gómez, X. 2019. Improving anaerobic digestion of sewage sludge by hydrogen addition: Analysis of microbial populations and process performance. *Energies*, 12(7): 1228.
- Martínez Torres, E.J. 2015. Digestión anaerobia de lodos y residuos agroindustriales. Tesis Doctoral Universidad de León. <https://doi.org/10.18002/10612/7766>
- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. (n.d.).
- Primera conexión de biometano a la red gasista impulsada por una iniciativa privada | Enagás. (n.d.). Retrieved March 9, 2022, from https://www.enagas.es/enagas/es/Comunicacion/NotasPrensa/04_03_2021_NP_Conexi%C3%B3n_a_red_planta_La_Galera
- Red Eléctrica Española. (n.d.-a). Informe del sistema eléctrico | Informes del sistema. Retrieved October 10, 2023, from <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-del-sistema-electrico>
- Red Eléctrica Española. (n.d.-b). REData - Generación | Red Eléctrica. Retrieved October 10, 2023, from <https://www.ree.es/es/datos/generacion>
- Roca, J.A. 2023. España conseguirá generar más del 50 % de la electricidad con energía renovable en 2023 - El Periódico de la Energía 23.06.23. <https://elperiodicodelaenergia.com/espana-conseguira-generar-mas-del-50-de-la-electricidad-con-energia-renovable-en-2023/>
- Sevillano, C.B.A., Chiappero, M., Gomez, X., Fiore, S. y Martínez, E.J. 2020. Improving the anaerobic digestion of wine-industry liquid wastes: treatment by electro-oxidation and use of ibochar as an additive. *Energies*, 13: 5971.
- Tipos de plantas de biogás adaptadas a la industria - Genia Bioenergy. (n.d.). Retrieved October 14, 2023, from <https://geniabioenergy.com/tipos-de-plantas-de-biogas/>
- Troup, H. 2016. Electricity is on track for decarbonisation, but what about decarbonising heat? *Renewable Energy Focus*, 17: 178–179.