



1. ESTADO DEL ARTE.

En la actualidad la gestión de residuos de diferente índole se ha convertido en uno de los problemas más crecientes de nuestra sociedad:

- Los vertederos se agotan y surgen los conflictos a la hora de buscar una nueva ubicación.
- Aparecen nuevos residuos más difíciles de eliminar y gestionar.
- Hay un mayor volumen de residuos.
- Técnicas que anteriormente eran aceptadas por la sociedad son desechadas.

Esto, junto a otros problemas, va haciendo que se busquen nuevas vías para su eliminación y ha llevado a que cada vez más se opte por alternativas más respetuosas con el medio y con el ser humano.

Frente a tratamientos más tradicionales, como pueden ser la eliminación directa a través de vertederos, el vertido al mar o la incineración, en Europa están cobrando cada vez más importancia iniciativas como la denominada “Residuo Cero”, que pretende un diseño y gestión de los productos y los procesos que reduzcan el volumen y la toxicidad de los materiales que conforman los residuos, conserven y recuperen los recursos naturales y no acaben enterrados o incinerados. Con este tipo de soluciones se consigue que lo que antes era un residuo (según la Real Academia Española “material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación”), ahora se considere un nuevo input a introducir en un proceso del que se obtiene una serie de productos aprovechables directamente por el ser humano o por el medio ambiente.

Cada vez son más numerosas estas tecnologías y comportamientos que están basadas en algunos de los principios de la Sostenibilidad:

- Reciclar: someter un material usado a un proceso para que se pueda volver a utilizar
- Reducir: disminuir o aminorar
- Reparar: arreglar algo que está roto o estropeado.
- Reutilizar: utilizar algo, bien con la función que desempeñaba anteriormente o con otros fines.



Como se ha dicho inicialmente, la correcta gestión de los residuos es algo preocupante, lo que ha hecho que los gobiernos desde un nivel nacional a uno municipal, vayan tomando conciencia y desarrollando nuevas herramientas para una gestión más eficiente y respetuosa.

En el caso de Andalucía está el Catálogo de Residuos de Andalucía[1], donde se identifican los tratamientos finales obligatorios de valorización y eliminación que tienen que recibir los residuos producidos o gestionados en esta comunidad, en función de la categoría a la que pertenezcan de acuerdo con la Lista Europea de Residuos de la Orden MAM/304/2002 de 8 de febrero [2], por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos, y la lista europea de residuos. Pero esta Orden también recoge la opción de introducción de nuevas tecnologías: “excepcionalmente y previa justificación, podrán recogerse tratamientos diferentes a los recogidos en el Catálogo, siempre y cuando, por las especiales características del residuo, éste no pueda tratarse conforme a los tratamientos recogidos en el mismo o, cuando por un enfoque de ciclo de vida sobre los impactos de la generación y gestión de estos residuos, los efectos del tratamiento alternativo redunden en un mayor beneficio para el medio ambiente y la salud humana”. Éstas suelen ser operaciones de valorización y algunos ejemplos serían: la utilización de los restos de la producción de aceites como biocombustible, residuos orgánicos procedentes de podas y/o lodos de depuradoras para la fabricación de compost, la utilización de residuos que han sufrido un proceso de combustión o gasificación para la fabricación de geopolímeros o aislamiento térmico y otra opción sería la recuperación de metales valiosos.

En estos últimos años van apareciendo de nuevo comportamientos en la gestión de residuos con un marcado cariz ambiental, y se van desarrollando cada vez tecnologías en este mismo sentido, como puede ser:

- La valorización de residuos generados en el procesado de de aceites vegetales usados [3].
- Producir biogás a partir de residuos agroalimentarios a pequeña escala [4].
- Utilización de residuos sólidos de la industria de celulosa como materia prima para la fabricación de ladrillos [5].

Pero a ello habría que añadir que una gestión eficiente de los residuos va unida a una obtención de energía respetuosa con el medio. En este sentido se desarrollan tecnologías como la digestión anaerobia, objeto de estudio de este proyecto, a través de la cual:



- Se gestiona el residuo para que pueda ser utilizado posteriormente como compost (le damos un nuevo valor a algo que ha sido desechado.)
- Se aprovecha la energía que está en estos residuos, mediante la generación de un biogás utilizable para la obtención de calor y/o electricidad, utilización en redes de gas o como combustible de vehículos.

Al igual que por una gestión eficiente de residuos, también hay una preocupación creciente por la utilización de energías renovables (solar fotovoltaica, solar termoeléctrica, eólica, energías del mar, energía hidráulica, geotermia, biomasa y biogás...), lo que igual que con los residuos, ha hecho que las administraciones públicas desarrollen planes y estrategias a seguir para su consecución. En el caso de Andalucía se ha llevado a cabo la Estrategia Energética de Andalucía 2014-2020 [6], basada en los planteamientos establecidos por la Comisión Europea en la Comunicación Europa 2020 [6], correspondiendo los objetivos marcados en este documento a diferentes temas importantes para la sociedad, como son el empleo, la pobreza, la educación, y la exclusión social. Entre ellos cabe destacar la lucha contra el cambio climático y la sostenibilidad energética, centrándose este último aspecto en:

- La reducción de un 20% los gases de efecto invernadero.
- El aumento en un 20% el aporte de energías renovables.
- El aumento en un 20% la eficiencia energética.

Estos tres aspectos se encuentran recogidos en la digestión anaerobia.

1.1. GENERACIÓN DE RESIDUOS.

Como se ha comentado con anterioridad, los residuos constituyen un grave problema de la sociedad actual. Cada vez son más numerosos y más difíciles de gestionar, por lo que van a generar un interés en la sociedad más creciente. A continuación, se mostrará una radiografía de las situaciones que nos encontramos a diferentes niveles, comenzando a nivel europeo y finalizando a nivel andaluz.



1.1.1. Unión Europea

Anualmente se producen alrededor de dos mil millones de toneladas de residuos en los estados de la Unión Europea. Almacenar estos residuos no es una solución sostenible y su destrucción es bastante complicada debido principalmente a los desechos que se producen como derivados y que suelen ser muy concentrados y contaminantes. Por tanto, la mejor solución sigue siendo prevenir la producción de residuos y reintroducirlos en el ciclo de producción mediante el reciclado de sus componentes cuando existan soluciones sostenibles desde los puntos de vista ecológico y económico.

Según datos del año 2010 la generación total de residuos por parte de las actividades económicas y los hogares en la Unión Europea (UE-27¹), ascendió a 2.660 millones de toneladas. En la **Ilustración 1** se observa la cantidad total de residuos generados por los países miembros de la Unión Europea. Esta cifra fue ligeramente superior a la de 2008, pero inferior a las de 2004 y 2006. Las cifras relativamente bajas correspondientes a 2008 y 2010 pueden reflejar, al menos en parte, la desaceleración de la actividad económica como consecuencia de la crisis económica y financiera.

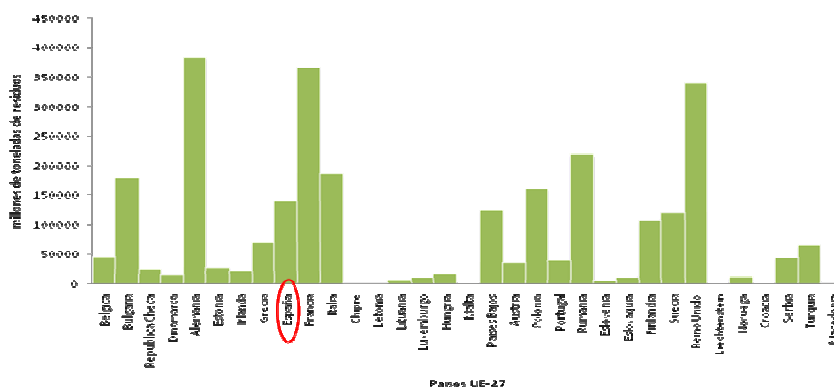


Ilustración 1. Residuos generados por los países miembros de la Unión Europea en el 2010. Fuente: Eurostat.

¹UE-27: 1 de enero de 2007 - 30 de junio de 2013.



En la Ilustración 2 se recoge un análisis del total de residuos generados en la UE-27, desglosado por principal actividad económica (según la NACE²). Hubo dos actividades que generaron niveles de residuos especialmente altos en toda la EU-27 en 2010: la construcción, responsable de 855 millones de toneladas (32,07 % del total), y las industrias extractivas, que generaron 727 millones de toneladas (27,3 % del total). Las industrias manufactureras generaron 280 millones de toneladas de residuos en 2010 (10,5 % del total), mientras que los hogares aportaron otros 221 millones de toneladas (8,3 %). El porcentaje relativamente bajo del total de residuos generados por la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca está relacionado, al menos en parte, con el hecho de que el estiércol y los purines hayan quedado excluidos de los datos presentados (siempre que se reutilicen en la agricultura como abono o para enriquecer el suelo).

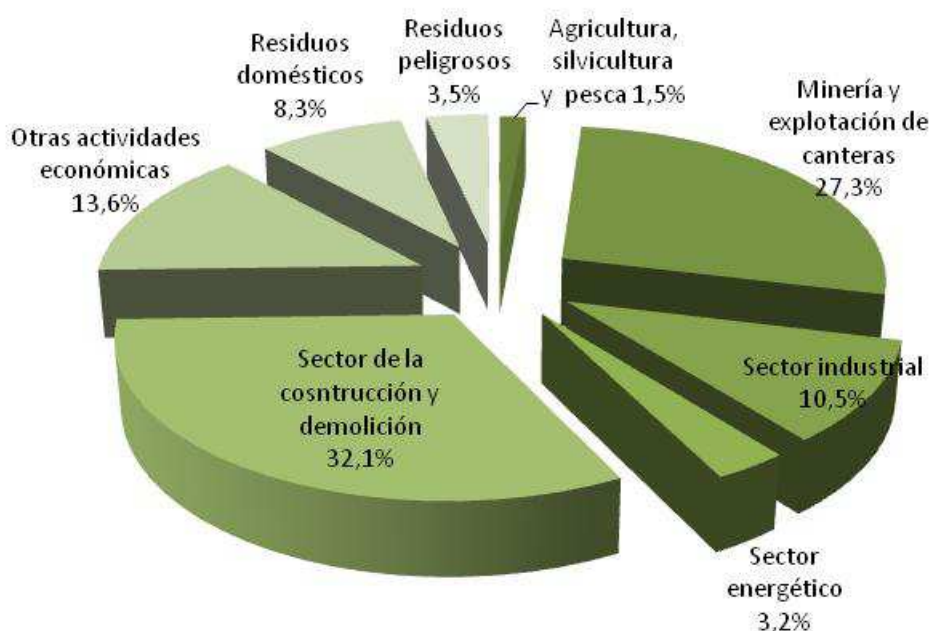


Ilustración 2 Residuos generados en la UE-27 en 2010. Fuente: Eurostat.

En 2010, se trataron en la Unión Europea aproximadamente 2.660 millones de toneladas de residuos. En la Ilustración 3 se recoge información en relación con los tipos de operación de tratamiento de residuos empleados. Casi la mitad (48,2 %) de los residuos tratados en la Unión Europea en 2010, se sometieron a operaciones de eliminación de residuos distintas de

²NACE: Nomenclatura estadística de las actividades económicas de la Comunidad Europea.



la incineración (fundamentalmente, depósito en vertederos, pero también una pequeña cantidad de residuos de minería se eliminaron en las minas y alrededor de ellas y también se realizaron vertidos de residuos en masas de agua). Mientras que otro 46,3 % de los residuos tratados se envió a operaciones de valorización (con excepción de la valorización energética). El 5,4 % restante de residuos tratados se envió a la incineración (con o sin valorización energética). En la actualidad la gestión sigue siendo ineficiente en algunos aspectos, lo que tiene que llevar a la Unión Europea a desarrollar políticas más exhaustivas con la gestión de residuos. Pero cabe destacar que algunos países como Francia, Reino Unido, Alemania, Los Países Bajos y Polonia optan principalmente por operaciones de valorización de residuos distintas al aprovechamiento energético, y Letonia, Estonia y Dinamarca no realizan el proceso de incineración sin aprovechamiento energético.

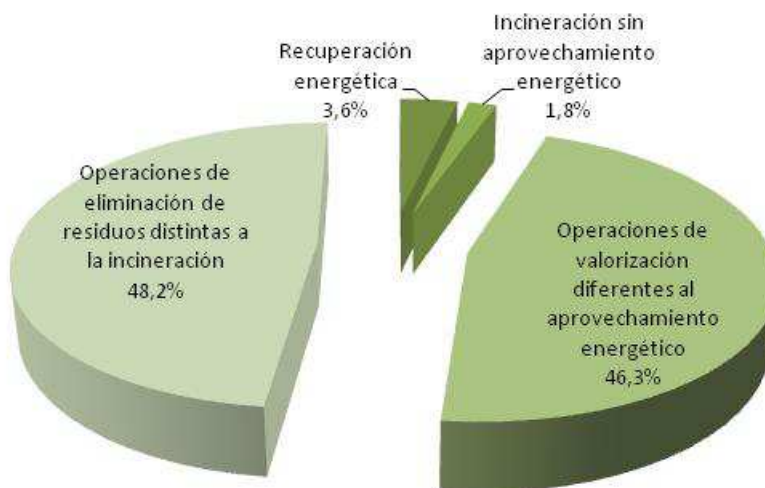


Ilustración 3 Gestión de residuos en la UE-27, año 2010. Fuente: Eurostat.

Como herramienta para la consecución de unos objetivos más adecuados al camino pendiente de recorrer por la Unión Europea en materia de residuos, se plantea la Directiva Marco de Residuos [7] que va a definir el marco común para la gestión de residuos en todos los estados miembros, partiendo de la idea de una nueva jerarquía de residuos (ver Ilustración 4), objetivos específicos de gestión e introduciendo nuevos conceptos. Algunos aspectos a destacar de esta directiva:

- 1- La nueva jerarquía de residuos. Como se observa en la Ilustración 4, determina el orden de las prioridades de la gestión de residuos que debe ser recogida en legislación



y política de residuos: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, otro tipo de valorización, incluida la energética, y eliminación. Todo esto parte de la idea básica: reducir la generación de residuos desde su origen y posteriormente para los residuos cuya generación no se haya podido evitar buscar una gestión sostenible.

- 2- La DMR establece los siguientes objetivos específicos de reutilización, reciclado y valorización de determinados residuos, a cumplir antes de 2020:
 - a. Incrementar hasta un 50% de su peso, como mínimo, la preparación para la reutilización y el reciclado de los residuos domésticos y similares. España, en 2011, se sitúa en un 27%.
 - b. Incrementar hasta el 70% de su peso, como mínimo, la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y de las demoliciones. España, en 2011, alcanza el 44%.
- 3- Además de la definición precisa de residuo³ y al objeto de definir el alcance de tal definición, la DMR también define los conceptos de subproducto⁴ y de fin de condición de residuo⁵, que permiten que determinados materiales, cuando cumplen una serie de requisitos legales, puedan utilizarse sin los trámites administrativos propios de los residuos.



Ilustración 4 Jerarquía europea en la gestión de residuos.

Fuente: Ministerio de agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2014.

³ Definición de residuo de la Directiva Marco de Residuos: artículo 3.1.

⁴ Definición de subproducto de la Directiva Marco de Residuos: artículo 5.

⁵ Definición de fin de condición de residuo de la Directiva Marco de Residuos: artículo 6.



1.1.2. España

Según datos de Eurostat en el año 2010 se generaron en España 140.510 millones de toneladas de residuos. Como se observa en la Ilustración 5, los principales puntos de generación de residuos son el sector de construcción y demolición y el sector de minería y explotación de canteras al igual que los datos de la Unión Europea.

Hay otros sectores que generan un mayor volumen en España en comparación con la Unión Europea. Un ejemplo claro es la agricultura. Mientras que en el resto de la Unión Europea corresponde a 1,5%, en España está alrededor del 4%. Lo mismo ocurre con los residuos domésticos, presentando España el doble de esta tipología de residuos que en el ámbito Europeo.

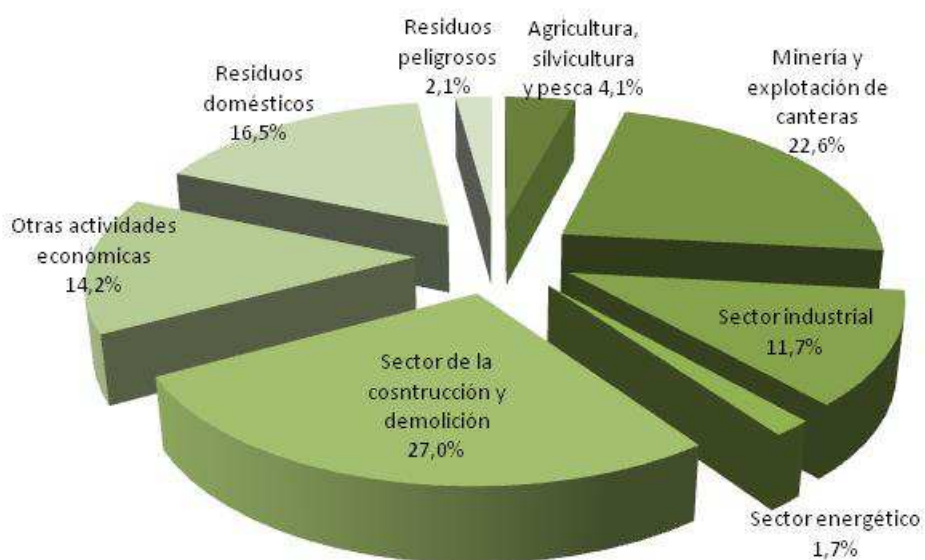


Ilustración 5 Residuos generados en España en 2010. Fuente: Eurostat.

En relación a la gestión en España el 60,5% del total de los residuos se destinan a la valorización material (incluido el reciclaje), mientras que un 37,3% se destina a operaciones de eliminación distintas a la incineración, entre ellas está el vertedero. En comparación con la Unión Europea, son datos positivos dado que España logra una tasa de valorización material superior (60,5% frente al 46,3% de la Unión Europea) y la eliminación en vertederos es inferior (37,3% frente a 48,2% de la Unión Europea). Todo ello queda recogido en la Ilustración 6.

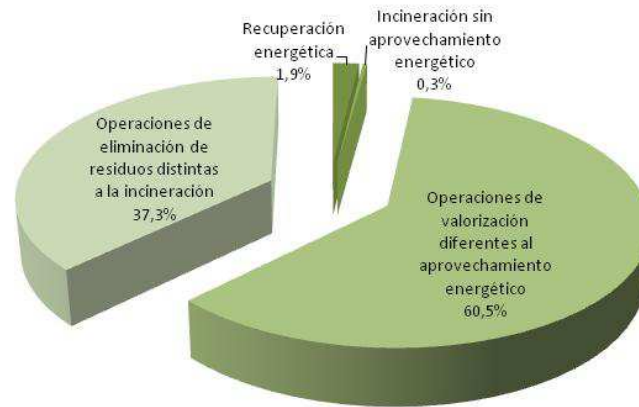


Ilustración 6 Gestión de residuos en España en 2010. Fuente: Eurostat.

En España también se están desarrollando diferentes herramientas para la consecución de niveles más acordes con los establecidos por la Unión Europea. A parte de la legislación, se están desarrollando programas como el Programa Estatal de Prevención de Residuos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente [8].

1.1.3. Andalucía

En la Ilustración 7 se identifican los sectores más relevantes en la generación de residuos en Andalucía. En comparación con los residuos generados en España, se observa un mayor porcentaje de residuos generados en el sector agrícola ya que es una de las actividades económicas más importantes de la comunidad autónoma.

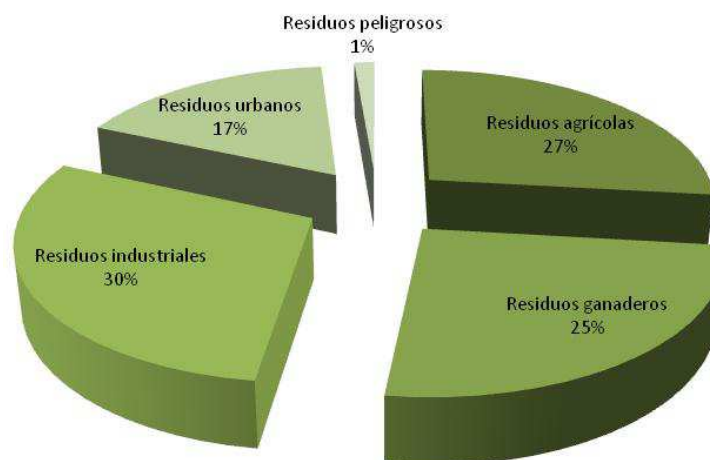


Ilustración 7 Residuos generados en Andalucía en el año 2012. Fuente: Elaboración propia (datos de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio y de la publicación Biomasa en Andalucía).



En referencia a la gestión de estos residuos, en la Ilustración 8 se muestra la tendencia en este aspecto en los últimos años.

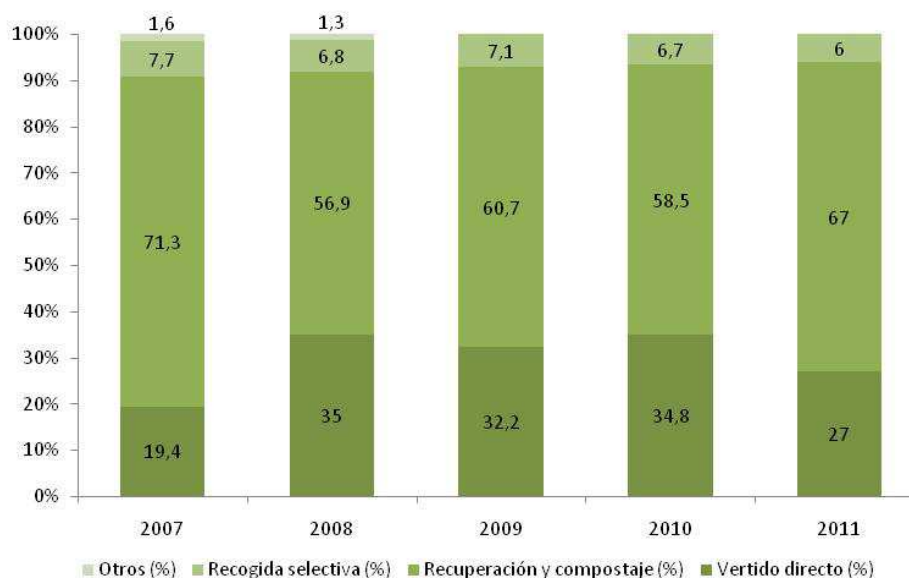


Ilustración 8 Destino de los residuos en Andalucía, 2007-2011. Fuente: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

En el año 2007 se presentan datos muy interesantes relacionados con la recuperación y compostaje que van disminuyendo hasta alcanzar una nueva recuperación en el 2011, pero no llegando a estar en los niveles del 2007.

A través de diferente legislación como la Ley 7/2007 de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental (GICA) [9], el Decreto 73/2012, de 20 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía y el Plan de Prevención y Gestión de Residuos de Andalucía 2012-2020, se establecen las ideas y pautas para regular la producción, posesión y gestión de los residuos que se generen y gestionen en Andalucía. Pero también se tiene como objeto la prevención en la generación de residuos y fomentar la preparación para la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización, preferentemente la material sobre la obtención de energía, considerándose la deposición en vertedero aceptable únicamente cuando no existan otras alternativas viables y esté justificada por un enfoque de ciclo de vida,



sobre los impactos globales de la generación y gestión de dichos residuos, adaptándose así a los principios que desde la Comunidad Europea se quiere implantar en el todo su territorio.

1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

Muchas son las tecnologías que a día de hoy, se han desarrollado para la valorización de los residuos. Una de estas tecnologías, es objeto de estudio de este proyecto: la digestión anaerobia.

A través de la Directiva 2009/28/CE [10], relativa al fomento del uso de la energía procedente de fuentes renovables, en Europa se está llevando a cabo en los últimos años un desarrollo del biogás. Esta Directiva establece los objetivos 20-20-20 para el año 2020, que han sido comentados con anterioridad. Además se exige que para el año 2020 al menos el 10% del gasto energético en transporte sea procedente de fuentes de energías renovables: “Teniendo en cuenta el importante potencial de ahorro en materia de emisiones de gases de efecto invernadero, la utilización de materias agrarias, como el estiércol y los purines, así como otros residuos de origen animal u orgánico para producir biogás ofrece ventajas medioambientales notables tanto en lo que se refiere a la producción de calor y de electricidad como a su utilización como biocarburantes. Como consecuencia de su carácter descentralizado y de la estructura de las inversiones regionales, las instalaciones de biogás pueden aportar una contribución decisiva al desarrollo sostenible en las zonas rurales y ofrecer a los agricultores nuevas posibilidades de ingresos.”

La valorización energética del biogás progresa en la Unión Europea, **primándose la generación de electricidad sobre la generación de calor**, lo que ha llevado a los diferentes países miembros al desarrollo de diferentes estrategias. Este biogás procede de tres fuentes principales:

- De vertederos procedente de residuos municipales.
- De procesos de digestión anaerobia de lodos de depuradoras urbanas e industriales.
- De la digestión anaerobia o codigestión de los residuos procedentes de la ganadería, agricultura, industria agroalimentaria, etc.

A continuación se mostrarán algunos de los aspectos más relevantes de aquellos países que han presentado un mayor grado de implantación en temas de biogás, siendo estos: Alemania,



Reino Unido, Dinamarca e Italia. En la siguiente Ilustración 9 se observa gráficamente este hecho.

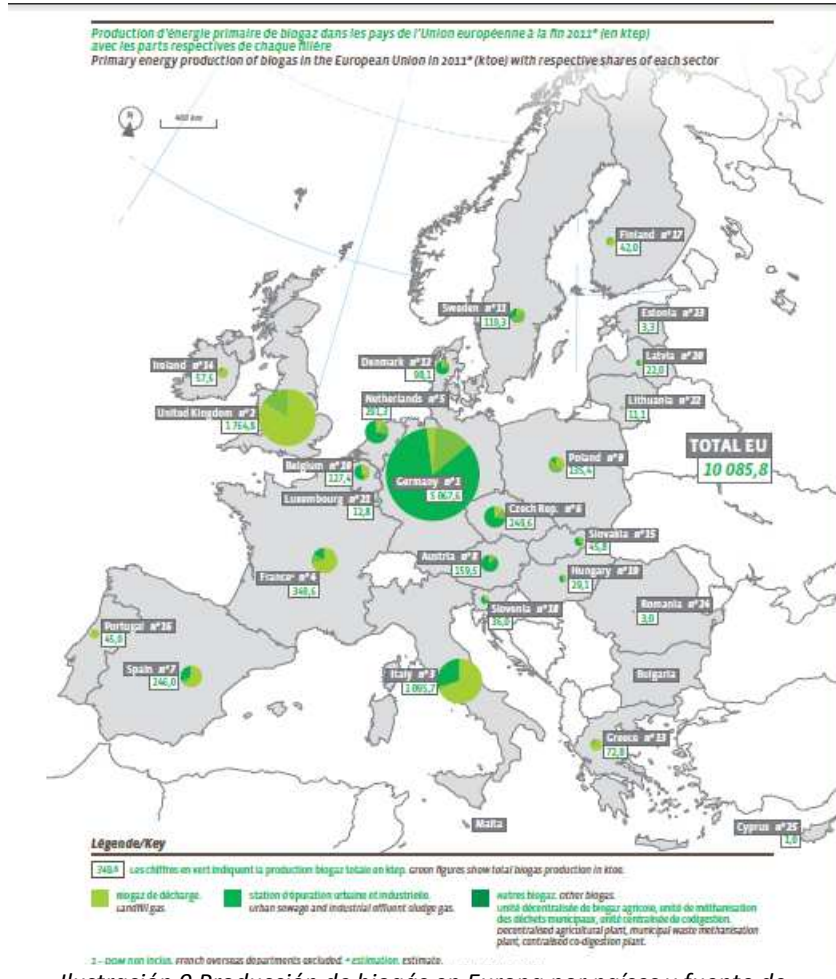


Ilustración 9 Producción de biogás en Europa por países y fuente de procedencia. Fuente: Le baromètre du biogaz [9]. 2012.

A continuación se exponen una serie de gráficos en los que se pueden observar datos de la Unión Europea relacionados con la energía y el biogás.

La **Ilustración 10** muestra una estimación de la energía primaria obtenida en la Unión Europea durante los años 2010 y 2011. Habría que advertir que se consiguió una mayor cantidad durante el año 2010, siendo esta variación mínima, y que algunos países sí aumentan su producción en el 2011, como es el caso de Italia, Reino Unido y España, mientras que Alemania sufrió un descenso significativo que se ve compensado por el aumento en otros países.

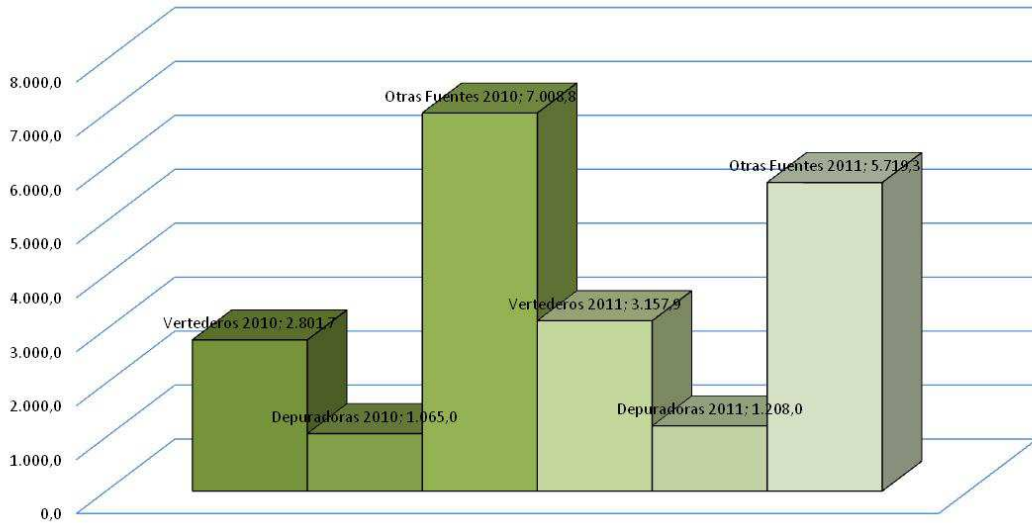


Ilustración 10 Estimación de la producción de Energía Primaria en biogás de la Unión Europea en 2010 y 2011 (ktep). Fuente: EurObserv'ER 2012.

Entre los años 2010 y 2011 la electricidad obtenida a partir de biogás ha aumentado un 18,2%, alcanzándose una producción de 35.856,5 GWh según se observa en la **Ilustración 11**.

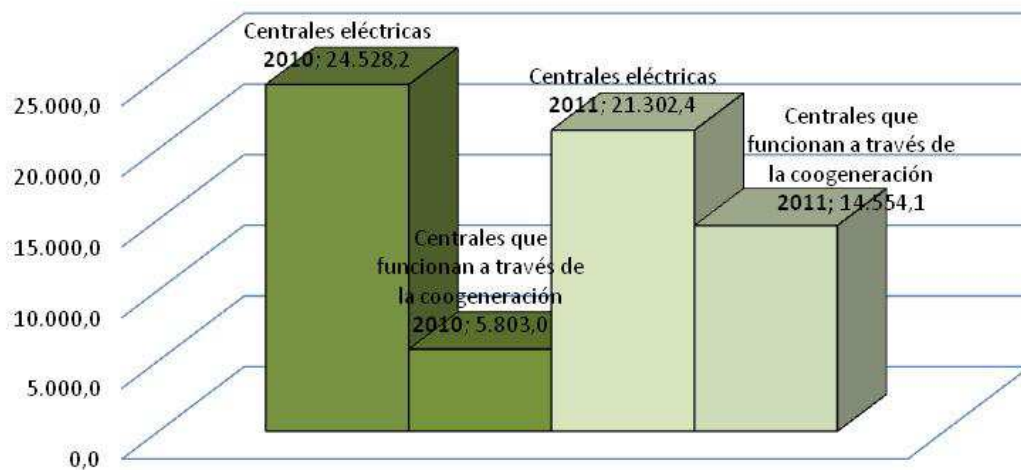


Ilustración 11 Estimación de la producción bruta de electricidad a partir de biogás en la Unión Europea en 2010 y 2011. Fuente: EurObserv'ER 2012.



Durante el mismo período de tiempo, la venta de calor procedente de biogás a fábricas o redes de calor ha aumentado un 16% como se observa en la Ilustración 12. Aunque la mayor parte del calor producido fue utilizado en el lugar de producción para el secado de lodos, la calefacción de edificios y el mantenimiento del digestor a una temperatura óptima (especialmente en los países y meses más fríos).

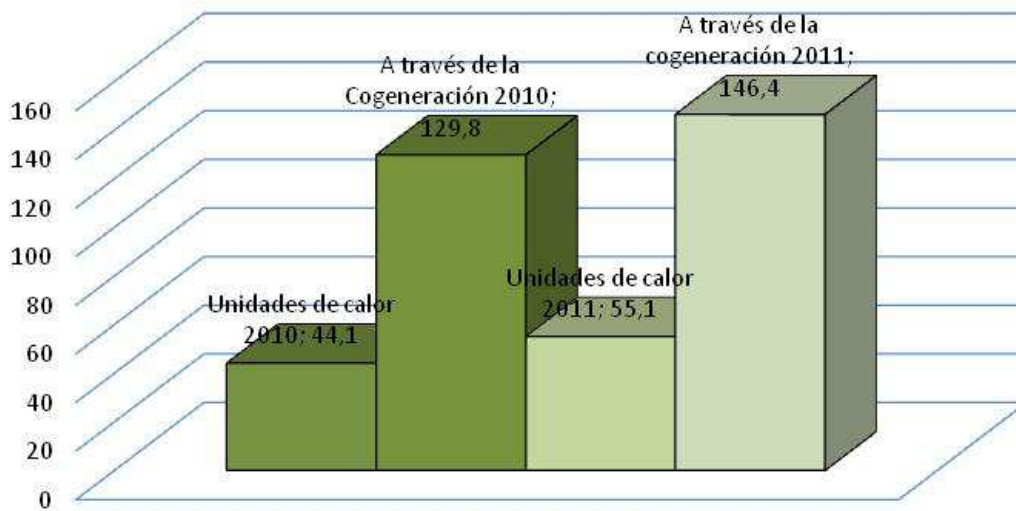


Ilustración 12 Estimación de la producción de calor a partir de biogás en la Unión Europea en 2010 y 2011 en el sector de la transformación. Fuente: Euroserv'ER 2012.

Una tercera vía de valorización se ha puesto en marcha en la Unión Europea, consistente en la introducción del biometano (biogás depurado) en la red de gas natural. Según el estudio llevado a cabo por el proyecto europeo GreenGasGrids [11], que se centra en la identificación de redes y establecimiento de requisitos a tener en cuenta para la inyección del biogás en las redes de gas natural europeas, ya habría en Europa al menos 177 unidades productoras de biometano de las cuales 128 estarían conectadas a las redes nacionales de distribución de gas natural, mientras que el resto utilizarían el biometano producido principalmente como carburante en el lugar de producción. Las instalaciones existentes presentan una capacidad de producción de 70.000Nm³/h (equivalentes a una producción eléctrica de 154 GWh), siendo Alemania la primera productora de biometano en Europa, seguida de otros países como Suecia (que prima la utilización como combustible), Suiza (que lo introduce principalmente en la red de gas natural) y los Países Bajos (donde todas las unidades de producción están conectadas a la red de gas natural).



Ilustración 13 Estación de depuración de biogás en Detmold (Alemania) en el momento de inyección del biometano en la red de gas natural

Como ya se ha comentado con anterioridad, Alemania es el mayor productor europeo de biogás, siendo la fuente principal de producción a partir de residuos ganaderos y agrícolas, como de lodos de depuradora. En relación a la producción de biogás en vertederos se sitúa tras Reino Unido. En relación al modelo de negocio predominante en este sector es la instalación de pequeños digestores anaerobios en granjas (más del 70% del total).

Mientras Reino Unido es el segundo productor de biogás en Europa, basándose su producción mayoritariamente en la generación de biogás de vertedero, siendo muy bajo el número de plantas que no están asociadas a depuradoras o vertederos. Es interesante destacar que se establece la obligatoriedad de generar un porcentaje mínimo, variable según el período, por los operadores eléctricos en su suministro energético, de forma que los operadores obtienen unos Certificados de Energías Renovables (ROCs) con los que justifican esta producción. En caso del que el operador no alcance este nivel tiene dos opciones comprar estos certificados (ya que son transferibles) de otro operador, que haya cubierto el cupo sobradamente, o el pago de la multa correspondiente. Todo esto queda recogido en la norma “Renewables Obligation Order”⁶[12].

En relación a Dinamarca hay que destacar que es un referente a nivel internacional en el campo de las renovables, en general, y de la digestión anaerobia, en particular. El modelo de negocio en este sector es bastante característico, ya que está forjado en base a cooperativas agrícolas y ganaderas, es decir, varios productores de residuos agrícolas y ganaderos se

⁶ 013.BERR. 2009. Renewables obligation order 2009.



agrupan con el objetivo de explotar conjuntamente una instalación de producción de biogás, obteniéndose así un beneficio en relación a la eliminación de residuos y un rendimiento económico del proceso. El marco político de Dinamarca ha favorecido la digestión anaerobia por diferentes motivos:

- Las leyes estatales prohíben el depósito en vertedero de la materia orgánica, debe de ser reciclada o incinerada.
- Los impuestos sobre las actividades de incineración de materia orgánica son muy elevados.
- Entre un 20-50% del capital necesario para las instalaciones han sido sufragadas por subvenciones.
- El marco legal determina un precio mínimo para la electricidad obtenida a través de la digestión anaerobia.

Por último se comenta la situación de Italia, donde la gran mayoría del biogás producido en el país procede de la gestión de vertederos, aunque en los últimos años se ha producido un aumento de la producción en digestores debido a la aplicación de un modelo muy semejante al del Reino Unido. Los productores eléctricos están obligados a suministrar un determinado porcentaje de energía procedente de energías renovables, acreditándose mediante la adquisición de “Certificados Verdes” (muy similares a los ROCs). El modelo de mercado está constituido generalmente por plantas pequeñas-medianas, aunque se pueden encontrar plantas centralizadas, cooperativas, que presentan un mayor tamaño.



2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

En este proyecto nos centraremos en el proceso de digestión anaerobia de los residuos de origen agrícola procedentes de la agricultura intensiva desarrollada durante los últimos años en la provincia de Almería, concretamente en el Poniente Almeriense.

En la actualidad, estos residuos son utilizados para la generación de compost, pero no existe una demanda lo suficientemente elevada como para eliminar estos residuos, por lo que se están acumulando generando un importante impacto ambiental en la zona.

A través de este proyecto se quiere poner en valor el potencial que en ellos se encuentran como fuente de energía renovable y como abono agrícola, lo que los convierte, como ya se ha comentado con antelación, en subproductos. A través de la digestión anaerobia se puede alcanzar un beneficio económico y de respeto con el medio ambiente. Lo primero hace referencia al aprovechamiento de la energía generada ya sea en la misma instalación o por su venta y al abono resultante en forma de compost, y lo segundo a que a través de este proceso se consigue la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero y la aportación de nutrientes al suelo de una forma más ecológica.

Para el desarrollo de este proyecto se define la siguiente metodología de trabajo:



Ilustración 14 Metodología de trabajo definida.

En el estudio del estado del arte se dará una visión general de la problemática ambiental que conllevan los residuos, de las políticas que se están siguiendo para una gestión más eficiente, entre ellas el desarrollo de procesos como la digestión anaerobia, y qué está ocurriendo en otros países en relación a este proceso.

En el análisis del proceso de digestión anaerobia desde un punto de vista teórico. Se explicarán sus características, etapas y parámetros más relevantes a la hora de llevar a cabo el proceso.



En el estudio técnico e económico se mostrarán las características técnicas de una instalación de digestión anaerobia, identificando las principales etapas del proceso desde un punto de vista práctico, es decir, los pasos que va a seguir el residuo para terminar generando biogás y compost.

En el caso práctico, nos centraremos en la valorización de los residuos agrícolas del poniente almeriense. Se realizará una caracterización de los mismos y en función de este estudio se planteará desde un punto de vista técnico y económico la instalación más recomendable para su gestión eficiente, poniendo en valor los diferentes usos del biogás producido (para la generación de electricidad y calor, por ejemplo).

Estos cuatro puntos nos llevarán a unas conclusiones y futuras líneas de investigación que intentarán mejorar la gestión actual de los residuos de este estudio.

Para el desarrollo de todo ello se llevará a cabo un extenso trabajo bibliográfico, utilizando recursos de diferentes organismos públicos, tanto a nivel Europeo como Nacional y Autonómico, empresas especializadas en el sector y estudios realizados en distintos ámbitos sobre la digestión anaerobia.



3. LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

A través de la digestión anaerobia se alcanzan dos objetivos principales:

- La gestión del residuos para una posterior utilización como compost, por lo que éste se convierte en un subproducto.
- El aprovechamiento energético de estos residuos obteniéndose una rentabilidad con la producción de biogás.

3.1. ASPECTOS GENERALES.

La digestión anaerobia o biometanización es un proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno y a través de diferentes etapas en las que van interviniendo un grupo heterogéneo de microorganismos, que van a transformar la fracción más degradable de la materia orgánica en biogás y los compuestos de más difícil digestión van a conformar el digestato. Este biogás va a estar compuesto en su gran mayoría por metano y dióxido de carbono, pero también se van a encontrar otros gases en menor proporción como vapor de agua, sulfuro de hidrógeno, etc.

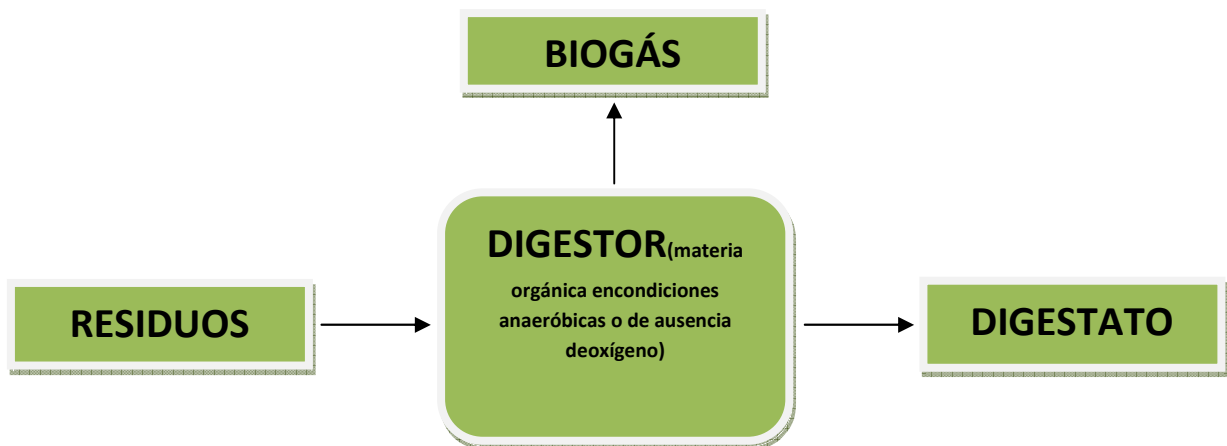


Ilustración 15 Esquema general de la digestión anaerobia



La digestión anaerobia se caracteriza por la existencia de varias etapas consecutivas que se diferencian por el proceso que se lleva a cabo para degradar el sustrato. En general se puede hablar de tres etapas y en ellas van a actuar cinco grupos de microorganismos heterogéneos.

Cada una de estas etapas se va a caracterizar por las poblaciones de microorganismos que presente y por parámetros físico-químicos que van a actuar sobre la degradación del sustrato. Es decir, estas poblaciones están compuestas por seres con diferentes velocidades de crecimiento y sensibilidad a los compuestos intermedios que se generen y actúen como inhibidores, y a las condiciones físicas que se estén dando en ese momento en el digestor. Esto implica velocidades de reacción según la composición del sustrato para cada etapa y que, para un buen desarrollo global del proceso, sea necesario un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores así como el mantenimiento de unas condiciones físicas que faciliten su crecimiento y avance.

De forma general, se identifican cinco grandes poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando tres procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. Estos tres procesos constituyen cuatro etapas: hidrolítica, acidogénica, acetogénica y metanogénica.

En la Ilustración 16 se identifican cada uno de los procesos y las comunidades de bacterias que intervienen en él.

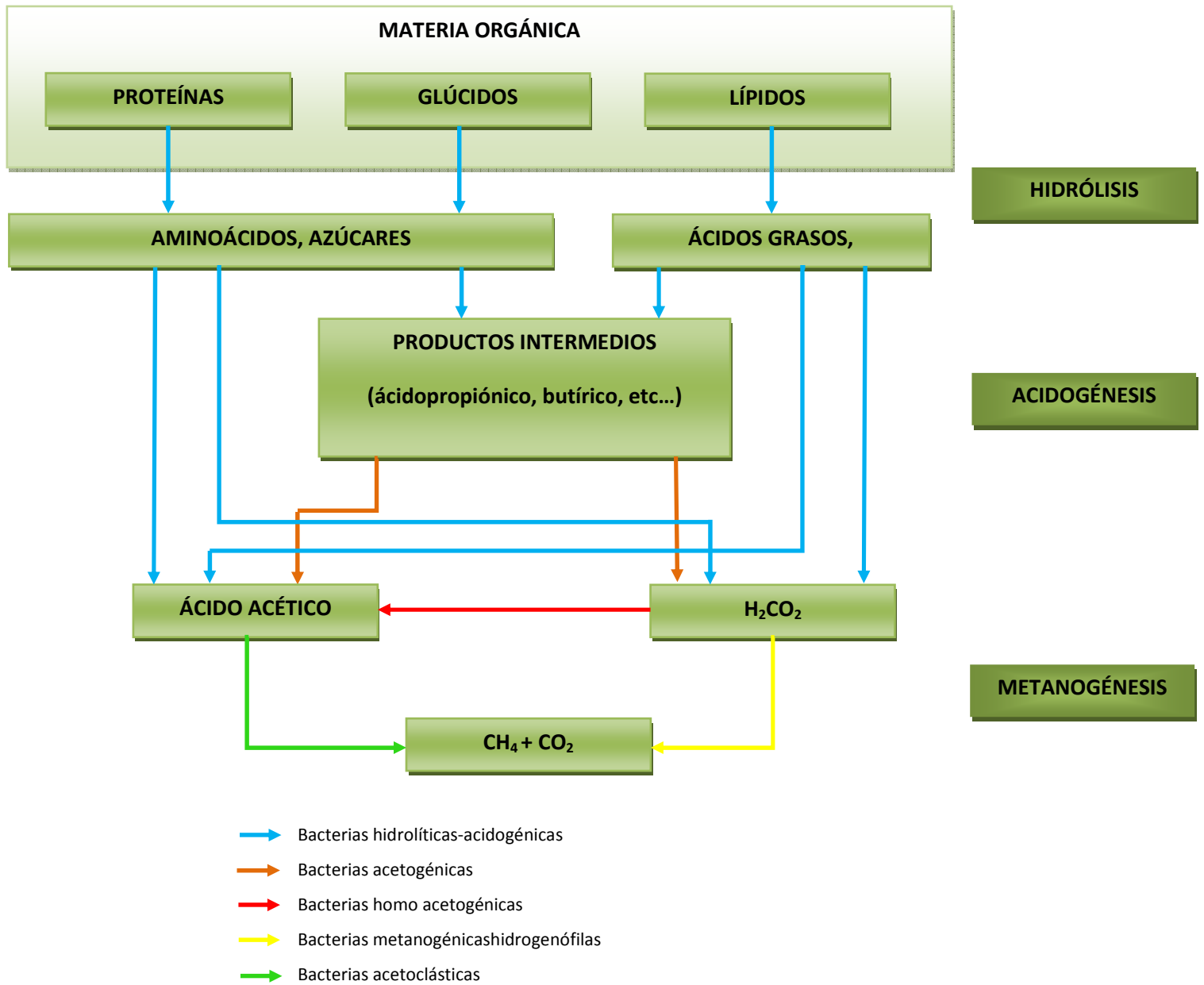


Ilustración 16 Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos.



3.2. ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

3.2.1. Etapa hidrolítica.

En esta primera etapa se da una degradación de los compuestos orgánicos complejos como lípidos, proteínas hidratos de carbono y compuestos inorgánicos. Estos son despolimerizados por la acción de enzimas hidrolíticas en moléculas solubles y fácilmente degradables como ácidos grasos, aminoácidos, monosacáridos y compuestos inorgánicos. Estas nuevas moléculas al ser más simples se solubilizan más fácilmente en el medio. Los microorganismos encargados de esto son las bacterias hidrolíticas-acidogénicas.

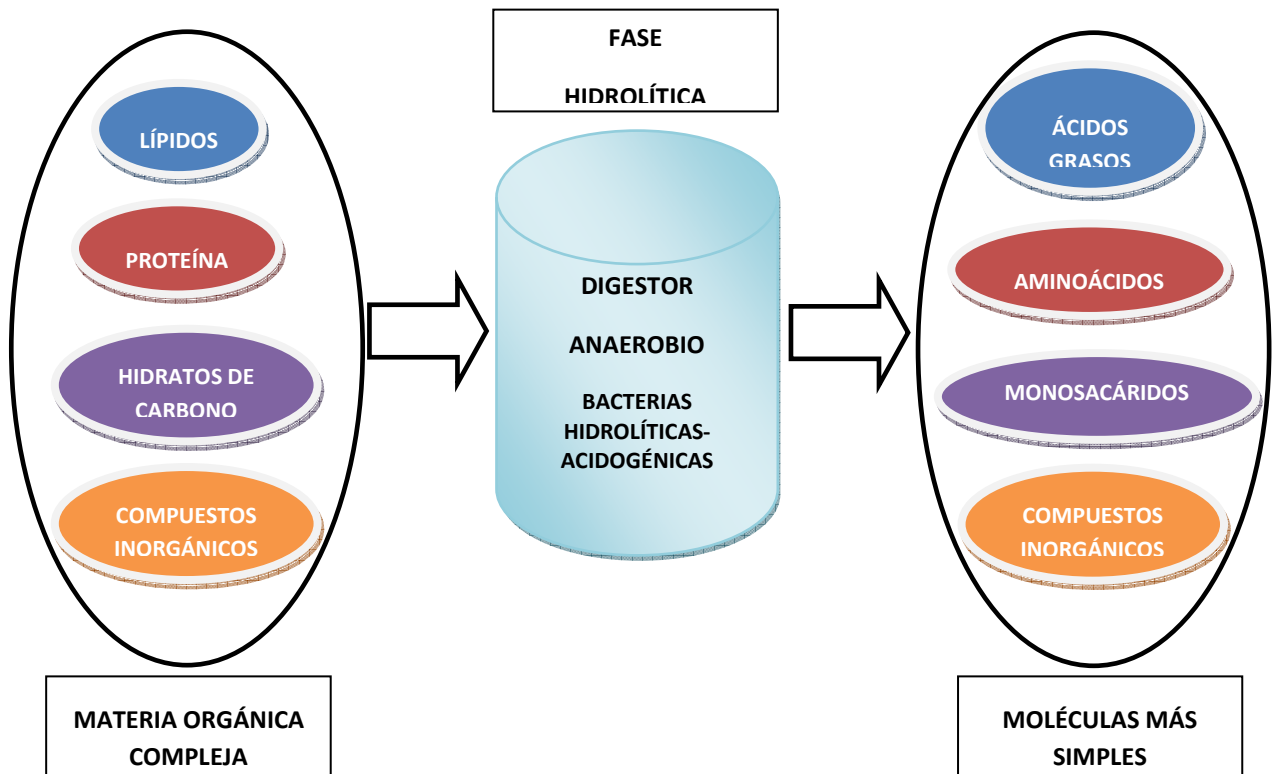


Ilustración 17 Fase Hidrolítica de la Digestión Anaerobia



3.2.2. Etapa acidogénica.

Los compuestos solubles resultantes de la etapa hidrolítica van a ser transformados por la acción de microorganismos y bacterias fermentativas a través de un proceso de fermentación, dando como resultado ácido acético ($\text{CH}_3\text{-COOH}$), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2) principalmente, y en menor cantidad productos intermedios: alcoholes, ácidos grasos volátiles (otros ácidos grasos de cadena corta además del ácido acético) y ácidos orgánicos. Como se ha indicado anteriormente, intervienen bacterias acidogénicas, siendo las más comúnmente identificadas el *Butyvirio*, *Propionbacterium*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococos*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococos* y *Enterobacterias*.

3.2.3. Etapa acetogénica.

Los compuestos intermedios resultantes de la etapa acidogénica van a ser transformados por las bacterias acetogénicas, obteniéndose como principales productos hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. Este último compuesto aparece directamente por la acción de estas bacterias por la transformación de alcoholes, ácidos grasos, ácidos volátiles, etcétera junto con hidrógeno y dióxido de carbono que por acción de las bacterias homoacetogénicas lo transforman en ácido acético. El metabolismo acetogénico va a ser muy dependiente de las concentraciones de estos productos.

Como ejemplos de bacterias acetogénicas se identifican *Syntrophobacterwolunii*, que descompone el ácido propiónico, o *Syntrophomonaswolfei* que descompone el ácido butírico. Los ácidos valérico y butírico son descompuestos por las mismas especies. Mientras que como bacterias pertenecientes al grupo de las homoacetogénicas se encuentran los géneros *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium*, *Clostridium* o *Eubacterium*.

3.2.4. Etapa metanogénica.

Con la presencia del ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono aparecen en el medio los microorganismos responsables de la metanogénesis o formación del metano. Se distinguen



dos tipos principales de microorganismos: los que van a degradar el ácido acético produciendo metano y dióxido de carbono, (los metanógenos acetoclásticos), y los que a partir del hidrógeno y dióxido de carbono resultantes de etapas anteriores van a generar metano y agua, (los metanógenos hidrogenotrofos).

La principal vía de formación del metano va a ser la vía acetoclástica, con alrededor del 70% del metano producido de forma general. A pesar de ser esta vía la más importante, sólo microorganismos de los géneros Methanosarcina y Methanothrix son capaces de producir metano a partir de acético. Los géneros principales dentro de la vía de los hidrogenotrofos son Methanobacterium, Methanococos, Methanobrevibacter o Methanogenium, entre otros.

3.3. ESTABILIDAD DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

La **naturaleza y composición química del residuo** que entra en el digestor va a condicionar la composición cualitativa de la población bacteriana que va a estar presente en cada etapa, por lo que este equilibrio ecológico en el que coexisten los diferentes grupos de bacterias se puede ver fácilmente alterado cuando algún tóxico no permite el desarrollo de alguna de las poblaciones.

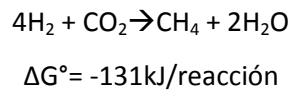
Mientras que en las fases de hidrólisis y acidogénesis los microorganismos presentes suelen ser facultativos, para la fase metanogénica, los microorganismos presentes son estrictos y con tasas de crecimiento 5 veces menores a los de la etapa acidogénica, lo que lleva a que si estas bacterias metanogénicas presentan algún problema para su reproducción y consumir los ácidos, estos se acumularán causando un empeoramiento de las condiciones para los microorganismos encargados de la producción del metano.

En relación a la **tasa de conversión del sustrato en biomasa bacteriana es del orden de cuatro veces inferiores a las tasas correspondientes a sistemas aerobios** de eliminación de materia orgánica. Esto implica que el proceso anaerobio va a ser más lento, generalmente, necesitándose varias semanas de puesta en marcha para conseguir un equilibrio en las poblaciones del digestor.

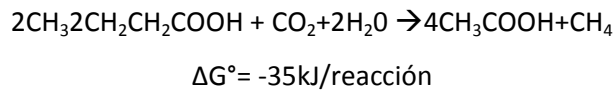


Una de estas situaciones se da en la etapa acetogénica, cuando la descomposición anaerobia de los ácidos propiónico y butírico no es termodinámicamente posible para presiones parciales de hidrógeno relativamente elevadas y, por tanto, es necesaria la presencia de poblaciones bacterianas capaces de eliminar del medio los productos de la etapa acetogénica.

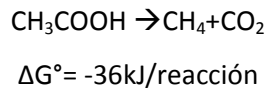
Por ejemplo, para el ácido butírico (Ilustración 18), la reacción es posible si la presión parcial del hidrógeno baja, por debajo del orden de 10^{-4} atmósferas, de forma que el hidrógeno será consumido por bacterias metanogénicas hidrogenófilas:



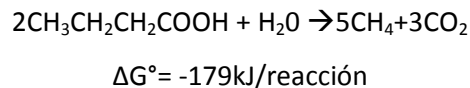
Por lo que si en el reactor coexisten bacterias acetogénicas y metanogénicas hidrogenófilas, se obtiene la siguiente reacción, asegurándose que la descomposición del butírico es posible:



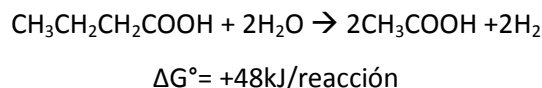
Y a ello habría que añadir la descomposición del ácido acético a metano por acción de las bacterias metanogénicas acetoclásticas:



La reacción resultante global sería:



Esto asegura la descomposición del butírico y que la variación de la energía libre es suficientemente elevada para permitir la síntesis de ATP y el crecimiento bacteriano.



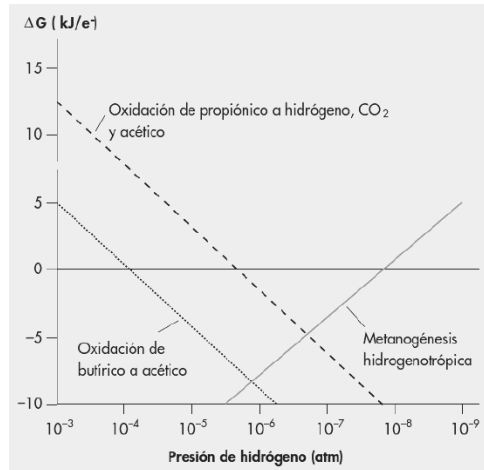


Ilustración 18 Relación entre la energía libre y la presión parcial de hidrógeno

3.4. PARÁMETROS CONDICIONANTES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

La digestión anaerobia va a venir condicionada en gran medida por las condiciones en las que se desarrolla el proceso, lo que lleva a tener muy en cuenta las mismas.

Los **parámetros de control más relevantes** que van a tener una influencia más importante en el proceso se observan en la **Tabla 1**. De forma general se puede diferenciar entre parámetros **ambientales** y parámetros **operacionales**.

Parámetros ambientales	Parámetros operacionales
pH	Temperatura
Potencial redox	Agitación/mezclado
Nutrientes	Tiempo de retención
Tóxicos e inhibidores	Velocidad de carga orgánica

Tabla 1 Parámetros más relevantes que van a determinar la digestión anaerobia. Fuente: Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje.



3.4.1. Parámetros ambientales

▪ pH

El pH va a ser un parámetro fundamental para el desarrollo de la máxima actividad por los microorganismos que se identifican en cada una de las fases:

- microorganismos hidrolíticos pH entre 7,2 y 7,4
- microorganismos acetogénicos pH entre 7 y 7,2
- microorganismos metanogénicos pH entre 6,5 y 7,5

Para el mantenimiento del pH va a ser de gran importancia el mantenimiento del equilibrio del sistema formado por las diferentes formas de carbono inorgánico (dióxido de carbono, bicarbonato, carbónico). Los residuos orgánicos complejos, al presentar unos de valores de pH más elevados, van a ser capaces de autorregular permanentemente el pH en aquellas etapas en las que se genera una mayor concentración de ácidos, en caso de que esto no ocurriera sería necesaria la regulación externa del parámetro.

Las mezclas de diferentes tipos de residuos pueden controlar más fácilmente la alcalinidad necesaria para alcanzar el nivel de pH idóneo. Se admite que una alcalinidad entre 2 y 3 g CaCO_3/L , es suficiente para la su regulación.

▪ Potencial redox

El potencial redox debe de presentar un valor suficientemente bajo para que así los microorganismos metanogénicos estrictos se puedan desarrollar, ya que estos microorganismos requieren potenciales de oxidación-reducción inferiores a -300 mV.

▪ Nutrientes

Los **residuos a digerir** deben de presentar una **relación adecuada** que permita el desarrollo de los microorganismos que van a intervenir en el proceso. Los elementos más importantes a tener en cuenta son: **nitrógenos, carbono y fósforo**.



La **relación C/N** debe de estar comprendida entre 15/1 y 45/1, siendo el valor **recomendable 30/1**, ya que valores inferiores disminuyen la velocidad de reacción. Mientras que la **relación C/P** debe de ser **igual 150/1**, valores inferiores no van a crear problemas de inhibición.

- **Tóxicos en inhibidores.**

Un aumento de determinados compuestos en el biodigestor puede elevar la inactividad de los microorganismos encargados de llevar a cabo la digestión anaerobia produciéndose una alteración de la cinética de degradación de la materia orgánica y un aumento de las concentraciones de DBO en el efluente, pudiendo llegar a su duplicación y, por tanto, a la reducción a la mitad del porcentaje de metano en el biogás producido.

La magnitud del efecto va a depender de la **naturaleza y concentración en la que se encuentre la sustancia inhibitoria**. Sólo la **fracción soluble de las sustancias** provoca efectos tóxicos [13]. Las formas no ionizadas de los ácidos grasos volátiles, así como el amoníaco libre o el ácido sulfhídrico son inhibidores importantes para las bacterias metanogénicas, presentando una inhibición de tipo reversible. Entre estos inhibidores también se identifican metales pesados, siendo el proceso de digestión anaerobia especialmente vulnerable a la presencia de altas concentraciones de estos, llegándose a identificar que altas concentraciones de metales pesados solubles han llegado a detener completamente la producción de biogás en un sistema anaerobio. La toxicidad de los metales pesados va a depender de la forma química en la que se encuentren en el digestor y de los niveles de pH. En la **Tabla 2** se indican límites para ciertos metales pesados.

Metal	Concentración de inhibición (mg/l)	Límite de toxicidad (mg/l)	Concentración para 50% inhibición (mg/l)
Ref.	Hayes y Theis (1978)		Laerence y McCarty
Cr (III)	130	260	
Cr (VI)	110	420	
Cu	40	70	211
Ni	10	30	134
Cd	-	20*	
Pb	340	340*	
Zn	400	600	136

*Tabla 2 Concentraciones de inhibición y de toxicidad de los metales pesados en digestión anaerobia.
Fuente: Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. 2005.*



Otros elementos que actúan como elementos tóxicos para la digestión anaerobia son los fenoles, tiosulfatos, tiocianatos, cianuros, agentes oxidantes fuertes como cromatos y cloro, tensoactivosaniónicos, antibióticos, pesticidas y sales.

Si el aumento de los compuestos tóxicos se realiza de forma lenta y controlada se puede adaptar el proceso a concentraciones sorprendentemente elevadas de sustancias tóxicas. En caso de que haya que combatir la toxicidad, se pueden precipitar como sales de sulfato o sales de carbonato, excepto el hierro y el cromo [14]. En 1964, McCarty [15] sugirió cuatro posibles métodos de control de compuestos tóxicos en el desecho: remoción de los compuestos tóxicos en el desecho, diluyéndolos por debajo del umbral de toxicidad, precipitándolos en su forma insoluble y capturándolo con un material antagonista del compuesto tóxico. A partir de estos cuatro métodos se desarrollaron diferentes caminos para conseguir disminuir la presencia de tóxicos en el digestor:

- Adaptación de la comunidad de microorganismos presentes: las bacterias metanogénicas son muy sensibles a la presencia de compuestos tóxicos en la parte soluble resultante del residuo, pero si se les da un tiempo suficientemente largo presentan la capacidad de adaptarse a ciertas concentraciones de algunas sustancias tóxicas. Esto conllevaría el aumento de los tiempos de retención de sólidos (TRS) en el reactor, que puede llegar a ser meses, lo que conllevaría la necesidad de poseer un gran digestor para no ralentizar el proceso de eliminación demasiado y una gran paciencia para que los microorganismos se adapten a las concentraciones de las sustancias tóxicas.
- Dilución de los residuos: los compuestos que inhiben la digestión anaerobia depende de gran medida de la concentración que se encuentre en el desecho. La dilución del residuo va a generar una dilución del compuesto tóxico en los sustratos para la metanogénesis, pero esto va a generar un mayor volumen del residuo a tratar, por lo que el método de dilución va a ser interesante en tres casos: cuando se necesite una dilución mínima, cuando las sustancias tóxicas se encuentren en concentraciones muy elevadas y cuando el residuo se puede diluir con otro residuo, por ejemplo un agua residual que favorezca la digestión anaerobia.



- Disminución de los compuestos tóxicos: cuando los compuestos tóxicos son conocidos es más fácil encontrar una solución para su eliminación y no afección al proceso de digestión anaerobia. Este método consiste en utilizar un antagonista del compuesto tóxico para formar precipitados en su forma insoluble. Algunos ejemplos son la disminución de la toxicidad de iones de sodio por adición de iones potasio, la adición de iones ferrosos para el control de sulfuros, la utilización de carbón activado también es una opción a utilizar en digestores anaerobios.

3.4.2. Parámetros operacionales.

- **Temperatura de operación.**

La temperatura de operación va a **influir decisivamente en el proceso anaerobio**, ya que de este parámetro van a depender mucho las velocidades de reacción con las que se lleve a cabo la digestión anaerobia, la composición del biogás, debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura, y el daño que se puede causar a algunos de los microorganismos del medio por ciertos valores que se alcancen.

La temperatura podrá estar comprendida en los rangos psicrófilicos (15-18°C), mesofílico (temperaturas en torno a los 28-33°C) o termofílico (temperaturas entorno a los 50-60°C).

En la

Tabla 3 se ve resumidamente, datos importantes asociados a estos rangos de temperatura. Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, y en el rango termofílico se consigue una mayor destrucción de patógenos.

Bacterias	Rango de Temperaturas			Tiempo de retención (días)	Sesibilidad
	Mínimo	Óptimo	Máximo		
Psicrófilicas	4-10	15-18	25-30	>100	±2°C/hora
Mesofílicas	15-20	28-33	35-45	30-60	±1°C/hora
Termofílicas	25-45	50-60	75-80	10-16	±0,5°C/hora



Tabla 3 Intervalo de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaerobias.

Fuente: Santianes, Martín et al.; Comando 2006.

La temperatura a la que se vaya a trabajar es un factor importante a tener en cuenta desde el punto de vista técnico y económico, ya que al trabajar con temperaturas de un rango termofílico los equipos, tuberías, válvulas y accesorios en general serán más costosos, y también se necesitará un gasto mayor de energía en el propio proceso. Otro factor a tener en cuenta al trabajar en este rango termofílico es que los microorganismos que predominan en éste rango son mucho más sensibles que los microorganismos característicos del rango mesófilo, a ligeros aumentos en la concentración de materia orgánica, cambios de temperatura, cantidades de tóxicos presentes en el residuo que alimenta al digestor

Por último añadir que en residuos con cantidades significativas de nitrógeno puede formarse una mayor cantidad de amonio pudiéndose alcanzar valores tóxicos cuando se emplea el rango alto de temperatura, ya que la concentración de amonio libre se incrementa rápidamente con la temperatura, siendo ésta la forma tóxica del nitrógeno para los microorganismos anaerobios.

▪ **Agitación/mezclado**

Por diferentes razones es necesario mantener un grado de agitación en el medio en el que se está dando la digestión anaerobia:

- Con el mezclado se consigue un homogenizado del substrato de alimentación con el substrato en digestión.
- Se alcanza una distribución uniforme del calor para mantener una isoterma correcta.
- Se evita la formación de espumas y la sedimentación.
- Se favorece la transferencia de gases que pueden formar burbujas en el substrato.

En función del volumen, de las características del digestor y del residuo, la potencia necesaria para cubrir la demanda energética de la agitación va a variar. Normalmente son valores comprendidos entre 10 y 100 W·h/m³·día. **Se suele recomendar valores superiores a 30 W·h/m³·día.**



La agitación puede ser mecánica o neumática (a través del burbujeo del gas recirculado a la presión adecuada), y nunca será violenta, ya que puede destruir los agregados de bacterias necesarios para mantener un proceso estable.

▪ **Tamaño de partícula.**

Durante la digestión anaerobia de un residuo sólido, la velocidad de solubilización de la materia orgánica va a estar íntimamente relacionada con la granulometría del residuo.

Algunos investigadores muestran que la etapa limitante de la velocidad del proceso puede ser también la transferencia del material de las partículas sólidas del residuo al medio líquido en fermentación. Un tamaño de partícula menor consigue un aumento de la superficie disponible y, por tanto, se consigue una mejora del proceso biológico y del rendimiento de la producción de biogás en sustratos con un alto contenido en fibras y baja biodegradabilidad.

▪ **Tiempo de retención.**

El tiempo de retención va a ser el cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, es decir, es el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor sometido a la acción de los microorganismos.

En la imagen siguiente se observa la tendencia general de los índices de eliminación de materia orgánica (sólidos volátiles, SV) y de producción específica de gas, por unidad de volumen de reactor, en función del tiempo de retención.

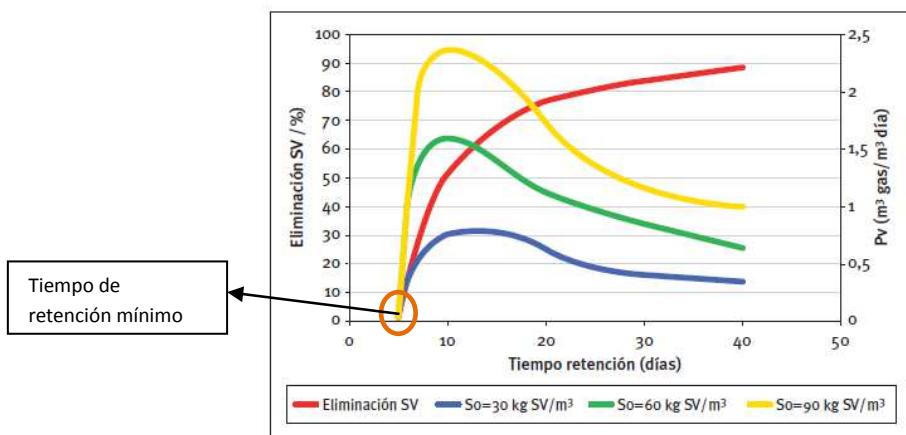


Ilustración 19. Eliminación de sólidos volátiles, SV (%) y producción volumétrica de gas Pv (m³ biogás/m³ día) para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa, en función del tiempo de retención hidráulico. Fuente: GIRO



Como se observa en la Ilustración 19, que:

- existe un tiempo de retención mínimo por debajo del cual el reactor no presenta actividad.
- la eliminación de la materia orgánica sigue una tendencia asintótica, con una eliminación completa a tiempo infinito.
- una producción de gas por unidad de volumen de reactor con un máximo para un tiempo de retención correspondiente a una eliminación de sustrato entre el 40 y el 60%.

▪ **Velocidad de carga orgánica (OLR).**

Se define como la **cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo**. Un valor bajo de velocidad de carga orgánica implica una baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención, mientras que su incremento conlleva una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida. Por este motivo se tendrá que buscar un valor óptimo desde el punto de vista técnico y económico para cada instalación y residuo a tratar.

En la Ilustración 20, se observan algunos ejemplos del comportamiento de la carga orgánica en función de la materia orgánica presente en el residuo a tratar.

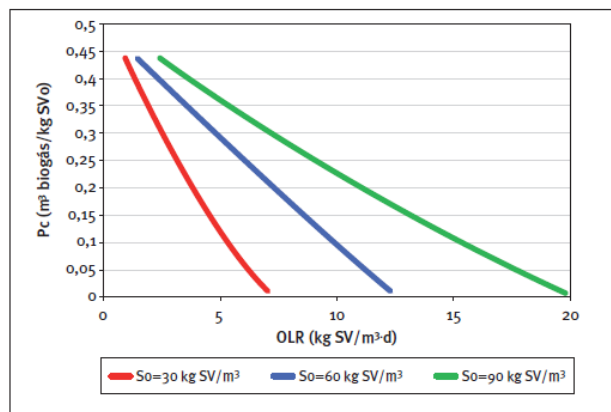


Ilustración 20 Producción de gas por unidad de carga orgánica (OLR). Fuente: GIRO



4. ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO DE UNA INSTALACIÓN DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.

En la Ilustración 21 se presenta un esquema de una planta de digestión anaerobia. En ella se pueden observar las principales zonas de trabajo.



Ilustración 21 Modelo de planta de digestión anaerobia.

Una instalación de digestión anaerobia consta básicamente de las zonas que se describen a continuación:

- **Edificio de servicios y oficinas (número 1 de la Ilustración 21).**

En él están instalados los equipos informáticos necesarios para la gestión de la planta y se recibirán los residuos que llegan a la planta.



Se pesará los residuos que llegan a la planta en un puente-báscula, realizándose así su registro (fecha de recepción, tipo de residuo, identificación de su procedencia, cantidad recepcionada) y codificando el lote para su posterior seguimiento (esto ayudará a conocer el comportamiento de los diferentes tipos de residuos que vayan entrando a la planta, lo que hará que en partidas futuras haya un aprovechamiento más eficiente del mismo).

En esta zona se realizará un control visual por parte de un operario de planta, con el fin de verificar que lo declarado con anterioridad es conforme a los residuos que la planta admite.

Dependiendo de la naturaleza de los residuos, se toma una muestra que será almacenada y, si se considera oportuno, se enviará para su análisis en un laboratorio.

▪ **Zona de almacenamiento (números 2 y 3 de la Ilustración 21).**

Se identifica una zona de almacenamiento de residuos sólidos, correctamente limitada y contará con un sistema de recuperación de posibles lixiviados que se generen para su posterior aprovechamiento en el digestor. Esta zona actuará a modo de tampón, ya que permitirá ir introduciendo el residuo poco a poco en los digestores. Algunos ejemplos se muestran en la Ilustración 22.

Podría ser interesante la ubicación en la planta de una zona de almacenamiento de residuos líquidos, ejemplos en la Ilustración 23, ya que permitiría el almacenamiento de posibles residuos líquidos que en un futuro se quisieran introducir en la planta, o como zona de almacenamiento en caso de contar con un gran volumen de lixiviados generados en la planta.



Ilustración 22 Ejemplos de almacenamiento de residuos vegetales.



Ilustración 23 Ejemplos de almacenamiento de residuos líquidos.

- **Pretratamiento y mezcla de residuos (número 4 de la Ilustración 21)**

En esta zona de la instalación se someterá el residuo a un pretratamiento que será el más adecuado a sus características, de forma que en el proceso de digestión se obtenga el máximo rendimiento posible en la generación de biogás. En el punto 4.2 se describirá de forma detallada, el pretratamiento más adecuado para los residuos objeto de análisis en este proyecto (residuos agrícolas).

También será importante para su degradación por los microorganismos, que los residuos presenten una composición lo más homogénea posible. Esto facilitará su trabajo y no actuará como un factor limitante.

- **Alimentación del digestor (número 5 de la Ilustración 21)**

Sistema de tuberías, válvulas y bombas utilizadas para alimentar el digestor. El **sistema ideal** de alimentación para una digestión adecuada ha de ser **continuo**. En la actualidad, gracias a los sistemas de control de las plantas, esto se realiza de manera automática y muy exacta, para que la mezcla sea la más adecuada para la producción de biogás.



- **Zona de digestión anaerobia (número 6 de la Ilustración 21).**

En esta zona se agruparán los digestores y equipos fundamentales para el desarrollo del proceso de digestión anaerobia como tal. Se van a diferenciar varias zonas principales: los digestores, el sistema de canalización para el transporte del residuo a tratar, recogida del digestato y posibles lixiviados resultantes de la digestión, y sistema de calefacción de los digestores. En punto 4.3 de este proyecto, se describirán las diferentes opciones existentes para los digestores anaerobios.

- **Zona de post-tratamiento y almacenamiento del digestato (números 7, 8 y 9 de la Ilustración 21)**

Como resultado de la digestión anaerobia se genera un digestato que presenta una riqueza importante en materia orgánica y elementos nutritivos para el suelo. Lo más fácil sería la aplicación directa sobre el suelo agrícola, pero tiene que haber una evaluación previa del valor fertilizante de estos materiales y sus efectos sobre plantas y el suelo.

El digestato se caracteriza por [16]:

- Presentar una composición homogénea. Facilita la separación de fases.
- Mantener la concentración de nutrientes (NPK) de la alimentación.
- Presentar un alto grado de mineralización, que se traduce en mayor disponibilidad para el cultivo.
- Reducir los olores.
- Reducir los patógenos, larvas, semillas malas hierbas....

En función del grado de humedad que presente el digestato se introducirá en una centrifuga o no, de forma que éste tenga el grado de humedad adecuado para su posterior uso. En caso de tener que utilizar una centrifuga, será necesaria la instalación de un sistema de canalizaciones que lleve la fase líquida hasta una balsa de almacenamiento. Mientras, la fase sólida será almacenada en un área pavimentada para este fin y con las canalizaciones necesarias hacia la balsa para eliminar los posibles lixiviados que se produzcan.

Algunos ejemplos de almacenamiento son (ver Ilustración 24):



- Depósitos abiertos de hormigón.
- Depósitos cerrados de hormigón, similares a los digestores.
- Lagunas de almacenamiento, que pueden ser abiertas o cerradas.



Ilustración 24 Ejemplos de almacenamiento del digestato generado.

- **Zona de almacenamiento del biogás producido (número 10 de la Ilustración 21).**

El biogás producido se almacenará en depósitos de almacenamiento denominados gasómetros. Estos pueden ser de diversos tipos, siendo los más comúnmente utilizados los:

- **Gasómetros de baja presión** (Ilustración 25). Entre los más utilizados están los de cúpula o campana flotante sobre depósito de agua, puede alcanzar volúmenes de



almacenamiento importantes, aunque **no suelen sobrepasar los 1500 m³**. La presión normalmente **no supera los 50 mbar**. Otra opción también muy utilizada son los gasómetros hinchables. Un ejemplo se puede ver en la Ilustración 26.

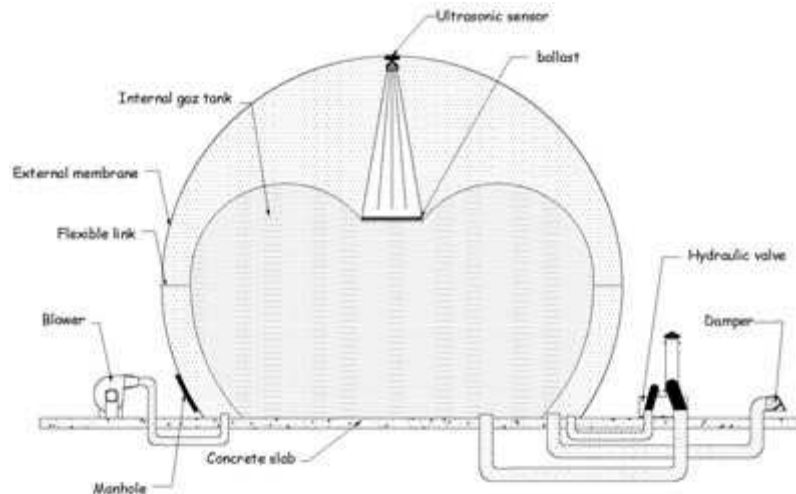


Ilustración 25 Esquema de gasómetro a baja presión. Fuente: MB Ingenierie.



Ilustración 26 Ejemplo de gasómetro a baja presión.

- **Tanques de gas de media y alta presión** (Ilustración 27). Son los mismos tanques que se utilizan para almacenar cualquier gas. Se consideran de media presión hasta **8-10 bar**, con compresores de una etapa. A presiones superiores se necesitan compresores de varias etapas.



Ilustración 27 Ejemplos de gasómetros de media y alta presión.

▪ **Zona de tratamiento y uso del biogás (número 6 de la Ilustración 21).**

En esta zona se someterá al biogás al tratamiento más adecuado para su posterior uso. Debido a su alto contenido de humedad y otros gases, el biogás ha de tratarse y acondicionarse antes de su aprovechamiento energético. Por ejemplo, si el biogás se destina a la producción de calor y electricidad (cogeneración), éste debe acondicionarse debidamente de cara a un aprovechamiento más eficiente. De forma general, el gas se somete a una:

- Reducción y/o eliminación del H_2S y trazas de otros gases, purificación.
- Reducción de humedad.
- Reducción de CO_2 .
- Corrección, calibración y control de presión.

El biogás tiene un alto **poder energético**, de aproximadamente **6 kWh/m³**. Este valor va a depender del contenido en metano que presente el biogás en cuestión.

Por sus características, el biogás producido y debidamente acondicionado, se va a poder utilizar principalmente en:

- Combustión directa para la producción de calor.
- Motores de combustión interna con aprovechamiento de la potencia mecánica.



- Motores para la generación de electricidad con y sin recuperación de calor (cogeneración).
- Turbinas de gas o vapor con aprovechamiento de la potencia eléctrica con o sin recuperación del calor.
- Vehículos motorizados.
- Enganche a la red de gas natural.
- Producción de sustancias químicas.

Estos aspectos se tratarán con mayor grado de detalle, en el punto 5.4 de este documento.



Ilustración 28 Ejemplos de motor de cogeneración para el aprovechamiento del biogás generado.

4.2. PRETRATAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA PREVIA A SU DIGESTIÓN.

El pretratamiento de la materia orgánica es muy importante en el proceso de digestión anaerobia, ya que llevando a cabo una adecuada preparación de la alimentación al digester, se puede alcanzar un aumento considerable en la producción de biogás, como se muestra en la Ilustración 29. Los beneficios del pretratamiento en potencial de metano, pueden ser muy considerables, como es el caso del alperujo y la remolacha, que aumentan en torno a 10 veces el potencial para generar metano con el pretratamiento del residuo previo a su digestión.

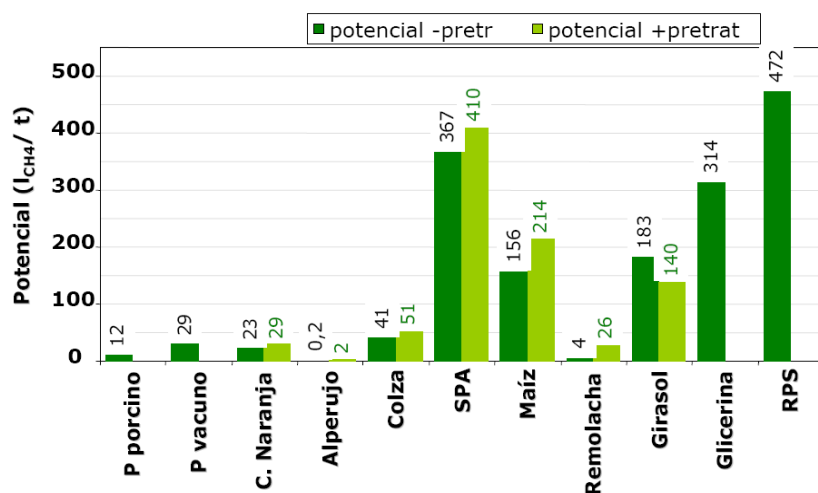


Ilustración 29 Potencial de metanización de diversos sustratos. SPA: Residuos animales. RPS: Residuos pesqueros. Fuente: Agencia Andaluza de la Energía. 2011.

La producción de biogás va a diferir de un tipo de residuo a otro, y también dependerá del pretratamiento al que ha sido sometido en función de su naturaleza.

La digestión anaerobia presenta una velocidad de proceso limitada por la etapa más lenta, la cual va a depender de la **composición del residuo**. Debido a esta limitación, los **tiempos de tratamiento** suelen ser del orden de dos a tres semanas generalmente. Al someter el residuo a un pretratamiento, la velocidad del proceso aumentará debido fundamentalmente a que los residuos disminuyen el tamaño de partícula, lo que hace que mejore su solubilización, disminuya la masa del residuo digerido y se obtenga un aumento de su biodegradabilidad.

Algunos ejemplos de pretratamientos son: maceración, trituración, ultrasonidos, tratamiento térmico (pasteurización), alta presión, combinación de altas presiones y temperatura, y tratamiento biológico.

Teniendo en cuenta las características del residuo que ocupa este proyecto, se aconseja los siguientes posibles sistemas de pretratamientos del residuo:

- **Pretratamiento mecánico:** consistente en una trituración de los residuos hasta conseguir una mezcla donde la fermentación se vería mejorada.



- **Pretratamiento biológico:** a través de este pretratamiento se mejora la velocidad de hidrólisis y la biodegradabilidad anaerobia de los residuos. Consiste en la mezcla de los residuos orgánicos con compost, que va a actuar como agente enzimático, durante 24 horas a presión y temperatura atmosférica. El porcentaje de inoculación varía entre el 2,5 al 5% en volumen, según lo indicado por el grupo de investigación Tecnologías del Medioambiente de la Universidad de Cádiz [17].
- **Pretratamiento enzimático:** donde se aprovecha la actividad metabólica de algunas enzimas hidrolíticas para degradar parcialmente los sustratos. Otra opción es el ensilado, proceso fermentativo que permite la conservación de sustratos vegetales mediante la producción de ácido láctico, que disminuye el pH, impidiendo otras fermentaciones.

Llevar a cabo un pretratamiento químico no es aconsejable, ya que en este tipo de residuos en particular, contiene restos de pesticidas y otros compuestos que al interactuar con los compuestos químicos del pretratamiento pueden llegar a formar compuestos tóxicos.

Al recepcionar muestras de diferentes puntos, lo más aconsejable es realizar una mezcla de las mismas tras el pretratamiento para conseguir una mayor homogeneidad en los productos a introducir en el digester.

En relación al tamaño de partícula que se debe de alcanzar con el pretratamiento, no queda muy definido un tamaño ideal para los residuos que ocupan este proyecto. A continuación, en la Tabla 4 se muestran valores para restos agrícolas que se puede asemejar.



Residuos	Tamaño (mm)	Rendimiento (m ³ CH ⁴ /kg SV)	Reducción de SV (%)
Piel de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)	0,088	0,408	51
	0,4	0,409	51,2
	1	0,396	49,6
	6	0,374	46,8
	30x10	0,271	34
Hojas de coliflor (<i>Brassica oleracea</i>)	0,088	0,423	57,8
	0,4	0,423	57,8
	1	0,423	57,3
	6	0,407	55,5
	150x100	0,358	48,9
Paja de arroz (<i>Oriza sativa</i>)	0,088	0,365	55,6
	0,4	0,367	56
	1	0,358	54,6
	6	0,347	52,9
	30x5	0,241	36,8

Tabla 4 Efecto del tamaño de partícula sobre la digestión anaerobia. Fuente: Effect of particle size on biogas generation from biomass residues. 1988. [18]

Según los datos mostrados en la Tabla 4, el **tamaño más óptimo de partícula es 0,4 mm (400 µm)**, consiguiéndose los niveles más elevados de metano y la mayor reducción de sólidos volátiles (SV). El residuo de hojas de coliflor es el que más se puede asemejar al residuo a tratar en este proyecto, y este tamaño de partícula también es el más adecuado para este residuo.

El tamaño de la particular del residuo va a tener una fuerte influencia sobre el proceso de digestión anaerobia, tanto a lo referente en rendimiento de producción de metano, como a la disminución en contenido en sólidos volátiles, sobre todo si el residuo se va a utilizar tal cual posteriormente, como por ejemplo en forma de compost.

Los residuos tienen que ser reducidos a un tamaño adecuado y homogeneizados para facilitar el proceso de digestión. Además **en la mayoría de los casos será necesaria su dilución para**



disminuir la concentración de materia orgánica y poder operar con una velocidad de carga óptima [19].

4.3. DIGESTORES ANAEROBIOS.

En la actualidad, existe una amplia gama de digestores anaerobios con diferenciaciones que van desde parámetros como el volumen, hasta modelos conceptualmente diferentes (modificación del número de tanques de proceso, su orientación o los sistemas de movilización de biomasa, por ejemplo).

De forma general, se puede hablar de dos grandes grupos, según dispongan o no de sistemas de retención de biomasa. En estos dos grandes grupos las posibilidades van a ir difiriendo en función de las siguientes características:

- Disposición de elementos de mezclado.
- Disposición de sistemas de recuperación del efluente.
- Orientación de los sistemas de circulación interna (dirección de funcionamiento).

Algunas de las **cuestiones que van a determinar qué tipo de digestor es el que resultaría más adecuado para tratar el tipo de residuo objeto de estudio**, serían:

- Capital dispuesto para la inversión.
- Calidad del biogás que se quiere generar.
- Materia prima que se va a introducir en el digestor
 - o Parámetros ambientales.
 - o Parámetros operacionales.
- Uso que se dará al digestato.
- Temperatura del lugar donde se ubica el digestor. Según datos del Instituto Nacional de Estadística, en Almería la temperatura media está en torno a los 19,15°C ,con una media de 138 días a una temperatura igual o superior a 25°C (tomando datos desde el



año 1997 al 2012), lo que puede servir de orientación para la zona donde se ubicaría el proyecto: Almería-Gádor.

- Número de digestores a instalar.
- Aislamiento o no del digestor.

El **objetivo del digestor** empleado será **maximizar la cantidad de biogás** producido y la **calidad** del mismo para su posterior utilización, **a partir del residuo tratado**.

Otro factor a añadir es la calidad del digestato, ya que también puede resultar una fuente de ingresos para la planta, ya sea por su venta a terceros o la utilización en los terrenos colindantes como abono.

La opción de aislar el digestor repercute de forma que disminuye las pérdidas producidas en las paredes del mismo mejorando así su eficiencia, disminuyendo sus necesidades de calor (el control de la temperatura va a ser algo importante en la gestión del proceso) y aumentando el volumen de gas producido. En relación al número de digestores empleados, hay que destacar varios aspectos:

- El número de digestores determina el volumen unitario de los digestores, y en consecuencia el diámetro de los mismos a una altura fija.
- El aumento del número de digestores hace que aumente la superficie total de contacto con el exterior. Es decir, que un aumento del número de digestores hace que aumenten las pérdidas por transferencia de superficies bajando la producción de biogás.
- El aumento de pérdidas supone un aumento en el número de digestores, siendo necesario un mayor número de calderas y de intercambiadores.

Una vez comentadas las diferentes cuestiones a tener en cuenta para el digestor, se describirá de forma general los dos grupos de digestores utilizados más habitualmente y, dentro de estos grupos, aquellos modelos que más se adaptan a los residuos de este proyecto.

Los digestores más comúnmente utilizados, son los digestores sin retención interior de biomasa y los digestores con retención de biomasa.



4.3.1. Digestores sin retención de biomasa

Añade una descripción muy breve y genérica de estos.

Dentro de este grupo, cabe destacar:

- **Reactores de mezcla completa.**

En ellos se va a mantener una distribución homogénea en la mezcla que contienen mediante su agitación. La disposición de unas hélices o palas en el interior del reactor, ya sea en su eje horizontal o vertical, va a generar una agitación de la mezcla que va a conseguir una homogenización de los residuos y microorganismos del proceso. Esto **evita la aparición de problemas de decantación y similares, que mermarían la capacidad de producción del biogás.**

Los reactores de mezcla completa más interesantes de cara al tratamiento de los residuos agrícolas, son:

- **Sin recirculación:** Se tendría el digestor con su correspondiente sistema de agitación y sistemas de extracción del biogás y los efluentes (Ilustración 30).
- **Con recirculación:** se añadiría a lo anterior un desgasificador y decantador para el efluente del reactor. Se recircularía la biomasa decantada de nuevo al reactor, por lo que no sería necesario reinocular el tanque, ya que no se produciría pérdida de biomasa en el efluente. También se optimizaría el aprovechamiento del biogás del efluente. Con la regulación de la recirculación es posible reducir el tiempo de retención del reactor con respecto al de uno sin recirculación. También hay que destacar que la producción de fangos (digestato) es menor, optimizándose el aprovechamiento de biogás (Ilustración 31).

Entre estos dos tipos de digestores, **el más aconsejable para los residuos de origen agrícola** sería un **reactor sin recirculación**, ya que uno con recirculación sólo sería aplicable a aguas residuales con alto contenido en carga orgánica (aguas residuales de azucareras, cerveceras, etc.), para que sea posible una separación de fases líquido-sólido [20].

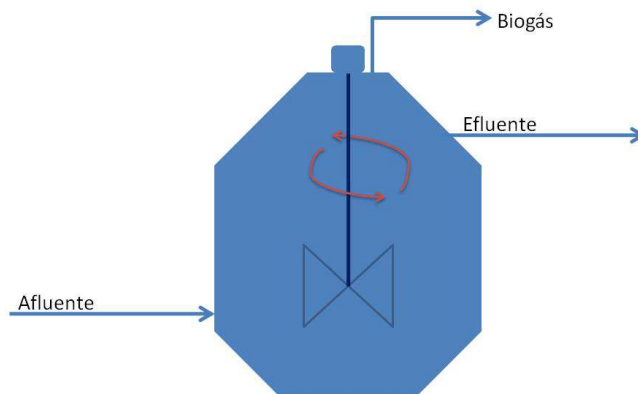


Ilustración 30 Reactor de mezcla completa sin recirculación.

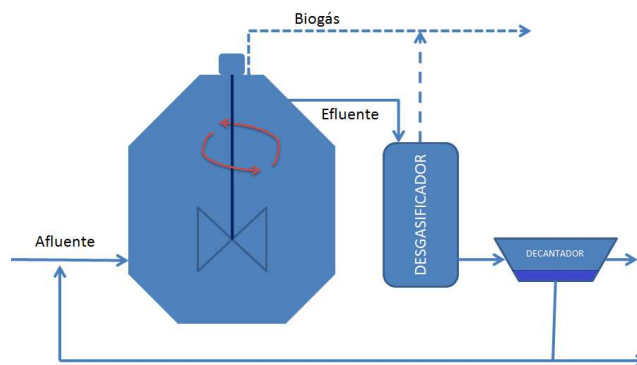


Ilustración 31 Reactor de mezcla completa con recirculación.

Existen otros tipos de reactores de mezcla completa, como son los de flujo pistón y digestor discontinuo. El primero presenta problemas de homogeneidad vertical, y el segundo presenta una eficiencia del proceso escasa ya que existen tiempos muertos entre una fase y otra, y al no existir sistemas de mezclado se ralentiza la completa digestión anaerobia de los sustratos introducidos [22].

4.3.2. Digestores con retención de biomasa

En este tipo de reactores se evita la movilización de la biomasa, aumentándose la estabilidad de los microorganismos y evitando por un lado el lavado de los mismos, y, por otro, optimizando la actividad bacteriana para la digestión. De este modo **se reduce el tiempo de retención de la biomasa, con respecto a los digestores de mezcla completa.**



Existe una gran variedad de este tipo de reactores. Éstos se agrupan en: reactores con inmovilización de la biomasa sobre un soporte (filtros anaerobios y lechos fluidificados), y reactores con retención mediante gravedad (reactores de lecho de lodos).

- En los reactores con filtros anaerobios: las bacterias anaerobias están fijadas a la superficie de un soporte inerte, constituyendo lo que se denomina biofilm, y se establece un flujo vertical.

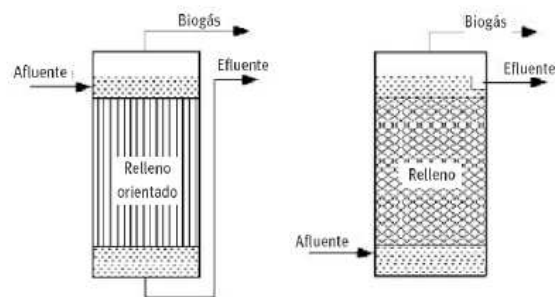


Ilustración 32 Esquemas de reactores con filtro anaerobio.

- En los Reactores de lecho fluidificado las bacterias estarán fijadas sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante el flujo ascendente del fluido.

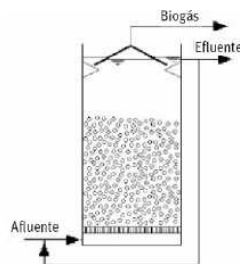


Ilustración 33 Esquema de un reactor de lecho fluidificado.

En los reactores de lecho de lodos se lleva a cabo la formación de un flóculo capaz de anclar a los microorganismos que intervienen en el proceso, por lo que se va a basar en las propiedades de floculación de las bacterias presentes en el digestor. Este flóculo va a estar constituido por diferentes capas, formadas cada una de ellas por microorganismos específicos para una parte del proceso de digestión anaerobia. La floculación va a depender en gran medida del crecimiento bacteriano, por lo que



optimizando las condiciones de crecimiento, se mejorará considerablemente. Se identifican principalmente dos tipos:

- EGSB: expanded granular sludge bed digestion (lecho de lodos granulares expandidos). Ilustración 35.
- UASB: Upflow anaerobic sludge blanket (manta de lodos anaerobios de flujo ascendente). Ilustración 34.

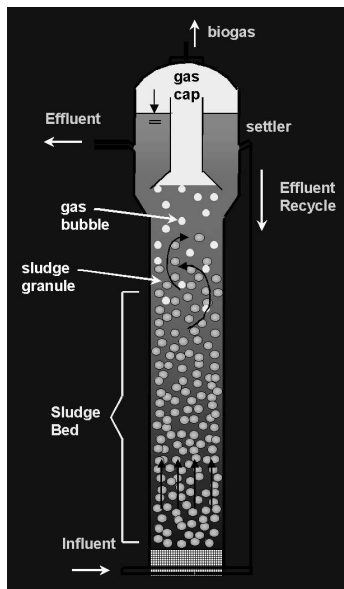


Ilustración 35. Esquema de funcionamiento de un reactor tipo EGSB. Cuenta con un dispositivo de recirculación del efluente. Fuente:

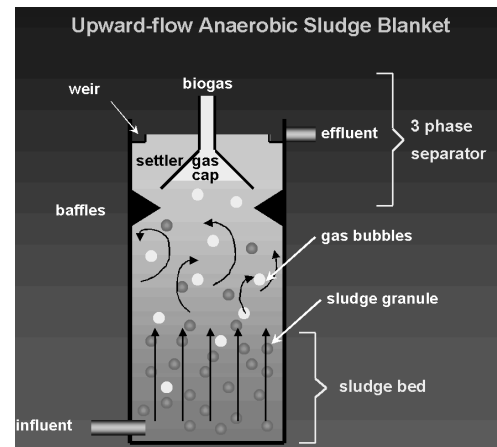


Ilustración 34 Esquema de un reactor tipo UASB. Dispone de un sistema para retener biomasa (baffles) y de un sistema de recogida de efluente líquido (weir). Fuente:

4.3.3. Principales componentes de un digestor anaerobio

Para que el digestor se construya de manera eficiente y no surjan problemas durante la operación (fugas de biogás, filtraciones de sustratos, etc.), hay que realizar un **diseño adecuado en función del residuo a tratar y del rendimiento a conseguir.**



A continuación, se describen las **partes más importantes de un digestor anaerobio** para el tratamiento de **residuos agroindustriales**, base para el posterior dimensionamiento del digestor para residuos agrícolas

- Los tanques para digestores se construyen sobre o bajo tierra.
- El suelo y paredes de los digestores agroindustriales suelen ser de hormigón.

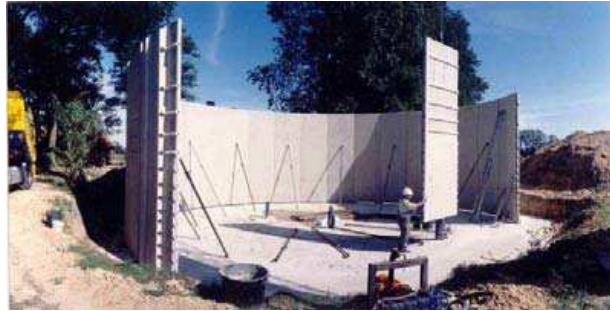


Ilustración 36 Ejemplo de construcción del tanque para el digestor.

- La cubierta podrá ser rígida, por lo que se necesitará un gasómetro para el almacenamiento del biogás, o de membrana, que al no ser rígida va a permitir que el mismo digestor actúe como gasómetro.



Ilustración 37 Ejemplos de cubiertas de un digestor anaerobio.

- La alimentación de los digestores puede realizarse de diferentes formas. En algunos casos se realiza por medio de una bomba sumergible y en otras ocasiones, como se indica en la Ilustración 38, mediante una cinta transportadora que introduce los residuos por la parte superior del digestor.



Ilustración 38 Ejemplo de alimentación de un digester anaerobio.

- La descarga de la mezcla ya digerida o la recirculación de la misma para estabilizar los niveles de humedad del proceso, se realiza mediante rebose. Para ello se instala una tubería en la parte superior del digester que conectará este con el tanque de almacenamiento de digestato y/o el de recirculación.



Ilustración 39 Ejemplo de descarga de un digester anaerobio.

- A través de la agitación se logra una mejor distribución de la temperatura, de los nutrientes, la eliminación de las burbujas de biogás y una mezcla del sustrato fresco con la población bacteriana existente en el digester. Además se evita la formación de costras sobre la superficie de la biomasa y la formación de “espacios muertos” sin actividad biológica.



Ilustración 40 Ejemplos de agitación para un digestor anaerobio.

- Los digestores llevarán incorporado un sistema de aislamiento de poliuretano (o similar) para retener mayor cantidad de calor posible. Así mismo en el interior de la pared de hormigón se distribuirán una serie de tubos de polietileno que conformarán el sistema de calefacción. El agua caliente que circulará por el interior del sistema de calefacción, podrá proceder del agua de refrigeración de la camisa del motor y de los gases de escape en caso de que se acople a la instalación un sistema de motores para el aprovechamiento energético del biogás.



Ilustración 41 Diferentes partes de un sistema de calefacción de un digestor anaerobio.

4.3.4. Arranque de digestores anaerobios.

Los microorganismos anaerobios presentan un lento crecimiento, en especial las bacterias metanogénicas, por ello durante el arranque de los sistemas anaerobios se suele utilizar un inóculo bacteriano. Este inóculo corresponderá a un lodo que ya posea una población de microorganismos capaces de iniciar el proceso de degradación anaerobio.

Inicialmente, durante la inoculación y arranque del digestor, será necesario que la actividad del inóculo sea muy importante, de forma que sea capaz de asimilar el sustrato a tratar. Por ello se



deberá contar con suficiente volumen para la inoculación (10-30% del volumen del reactor) [21]. La **selección de un inóculo adecuado** va a ser fundamental para obtener un arranque rápido y disminuir el tiempo requerido para la formación de las uniones bacterianas necesarias para el desarrollo de un proceso anaerobio.

4.4. ANÁLISIS ECONÓMICO PARA PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

Este análisis económico se va a llevar a cabo con el estudio de tres instalaciones con diferentes cantidades y tipos de residuos. Estas tres instalaciones realizan el proceso de codigestión, se ha cogido este proceso porque es el que más se asemeja a la digestión anaerobia de residuos agrícolas y porque en alguna de ellas se introduce el residuo agrícola para que sea codigerido con otros residuos. También se ha considerado interesante en introducir estos datos por si en el futuro existe la posibilidad de establecer un proceso de codigestión.

Estas evaluaciones son orientativas, y con ellas lo que se busca es dar una idea de aspecto económico para diferentes volúmenes de residuos. Para una evaluación detallada es necesario un estudio de las condiciones particulares de cada instalación y de la producción específica de biogás de cada residuo a digerir.

El primer paso para evaluar una instalación es su dimensionado y esto se realizará en función de los residuos que se van a digerir.

A continuación se describen las tres plantas y en la Tabla 5 sus características principales

- Planta 1: se tratan 13.000 toneladas / año (35,6 toneladas / día) de la mezcla de residuos biodegradables.
- Planta 2: con un caudal de tratamiento de 25.500 toneladas / año (69,9 toneladas / día), se han sustituido los residuos de matadero (intestinos y contenido intestinal) y los lodos residuales de los tres tipos de la planta 1 por harinas de carne, gallinaza de ponedoras y fruta podrida.
- En la planta 3: con un caudal de tratamiento de 55.000 toneladas / año (150,7 toneladas / día), se ha reducido ligeramente el contenido de harinas de carne hasta un 2% respecto de la planta 2 y se han introducido tierras filtrantes de aceite.



Planta 1	Residuos	Restos de mataderos, fangos de depuradora, purines de cerdo, purines de bovino, residuos vegetales de procedencia industrial.
	Biogás producido	42,4 m ³ /t de mezcla de residuos
	Total de residuos	13.000 m ³ /año = 35,6 m ³ /día
	Volumen total del digestor	1.100 m ³
	Producción total de biogás	440.769,1 m ³ biogás/año
Planta 2	Residuos	Harinas de carne, purines de cerdo, gallinaza, purines de bovino, fangos de flotación, residuos vegetales de procesos industriales y fruta podrida.
	Biogás producido	43,6 m ³ /t de mezcla de residuos
	Total de residuos	25.500 m ³ /año = 69,86 m ³ /día
	Volumen total del digestor	2.400 m ³
	Producción total de biogás	876.907,1 m ³ biogás/año
Planta 3	Residuos	Restos de matadero, harinas de carne, fangos de depuración, purines de cerdo, gallinaza, purines de bovino, tierras filtrantes de aceite y fangos de flotación.
	Biogás producido	37,3 m ³ /t de mezcla de residuos
	Total de residuos	55.000 m ³ /año = 150,68 m ³ /día
	Volumen total del digestor	4.200 m ³
	Producción total de biogás	1.642.655 m ³ biogás/año

Tabla 5 Descripción de las tres plantas tipo. Fuentes: Producción de biogás por digestión anaerobia. Instituto Catalán de la Energía. 2008.



La inversión de las plantas de biogás depende mucho del tamaño de la instalación y de su caudal de tratamiento, y muestra una marcada economía de escala. En la Ilustración 42 se ofrece la inversión por unidad de potencia eléctrica en función de la potencia eléctrica de la instalación, a partir de datos de plantas de Austria, Dinamarca, Alemania y varias plantas en España.

En la Ilustración 42 se identifica una curva que nos da idea del coste de una planta, la gran dispersión que presenta esta curva se debe a inversiones de adaptación de cada instalación a necesidades específicas de cada planta (depósitos de almacenamiento para la pre y postdigestión , por ejemplo), la contabilización de algún equipo de postratamiento, el hecho de construir varios depósitos de entrada de cosustratos o a la necesidad de adecuación de la línea eléctrica para la venta de la producción eléctrica en la red (en la actualidad las empresas que generan esta potencia eléctrica no la vierten en la red si no que es utilizada para el autoconsumo, pero es importante su consideración para usos posteriores). La curva que ajusta los valores de la Ilustración 42 viene definida por [24]:

$$\text{Inversión unitaria (€ / kW)} = 16.272 \cdot \text{Potencia (kW)} - 0,2114$$

Esta curva se utilizará para hacer la estimación de la inversión de las tres plantas de biogás genéricas objeto de análisis. Se entiende que serán posibles valores de inversión tanto por encima como por debajo de este valor estimado y que, por tanto, los resultados sólo tienen un valor indicativo.

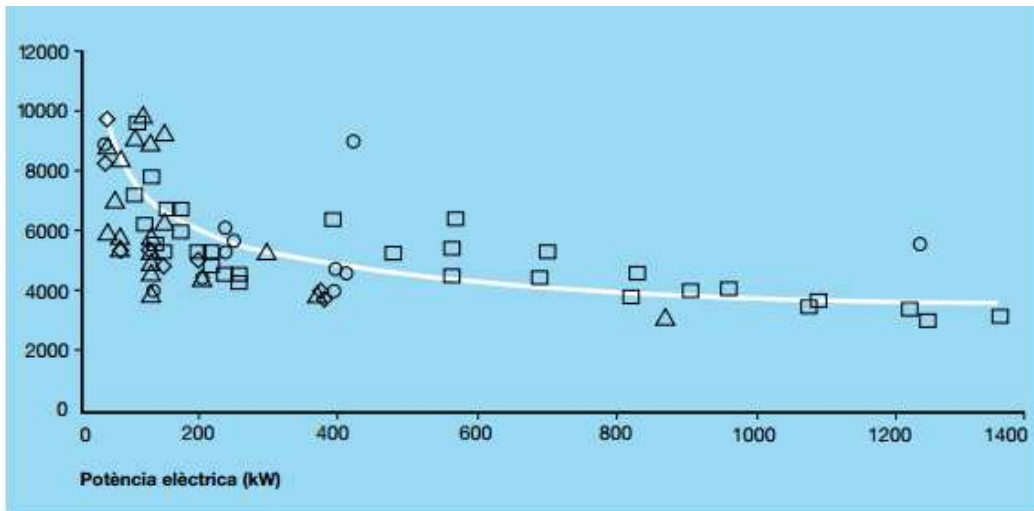


Ilustración 42 Relación entre inversión unitaria por unidad de potencia eléctrica y potencia eléctrica. Datos obtenidos a partir de la información de diversas instalaciones en funcionamiento o de anteproyectos. Fuente: Producción de biogás por digestión anaerobia. Instituto Catalán de la Energía. 2008.

En relación a los costes de mantenimiento y funcionamiento se han considerado [27]:

- 0,01 € / kWh para los motores de cogeneración, en base a la energía eléctrica bruta producida.
- 1,5% anual del total de la inversión en concepto de reparaciones, mantenimiento, administración y seguros.

Para estimar el coste de dedicación de personal se ha considerado una dedicación base del 25% del tiempo de una persona, más un incremento lineal del equivalente de una persona a tiempo completo por cada 200 kW de potencia de la instalación, a razón de un coste medio de 45.000 € / persona · año [27]

A efectos de esta evaluación se considera que la obtención de los residuos para la cogeneración no representa un coste para la instalación. Tampoco se tiene en cuenta el posible coste debido a la aplicación agrícola del material digerido o debido a procesos posteriores de tratamiento. En cambio, tampoco se considerará un ingreso posible para ahorro



en la compra de elementos fertilizantes. Tampoco se han incluido posteriores tratamientos de los posibles efluentes generados en la planta.

En la Tabla 6 se muestran los costes asociados a cada una de las plantas de estudio. Estos son datos totalmente orientativos y a los que hay que añadir, como se ha comentado con anterioridad, todos los pretratamientos para conseguir los valores más eficientes en la producción de biogás y los procesos de tratamiento del gas generado para su posterior uso.

		Planta 1	Planta 2	Planta 3
Datos básicos de dimensionado	Cantidad total de residuo tratada (t/año)	13.000	25.500	55.000
	Producción específica de biogás (m³ biogás/t)	33,9	34,4	29,9
	Potencia eléctrica (kWe)	114,3	227,4	426
	Volumen del digestor (m³)	1.100	2.400	4.200
Costes	Inversión (€)	683.000	1.147.900	1.927.400
	Costos anuales de mantenimiento y operación (€/año)	56.400	98.200	170.100

Tabla 6 Evaluación económica de las tres plantas de estudio. Fuente: Producción de biogás por digestión anaerobia. Instituto Catalán de la Energía. 2008.



5. CASO PRÁCTICO: DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS.

5.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS.

Los residuos que van a ser introducidos en el digestor anaerobio son restos hortofrutícolas procedentes de la provincia de Almería, concretamente del Poniente Almeriense, como ya se ha comentado con anterioridad.

En la provincia de Almería se producen anualmente más de 3 millones de toneladas de productos hortofrutícolas, en concreto para la campaña desde el 1 de septiembre de 2012 al 31 de agosto de 2013 se produjeron 3.139.871 toneladas lo que lleva asociado una alta producción de residuos vegetales. Los principales cultivos son el tomate, pimiento, pepino y calabacín, como se identifica de forma gráfica en la Ilustración 43, acaparando los tres primeros alrededor del 60% de la producción.

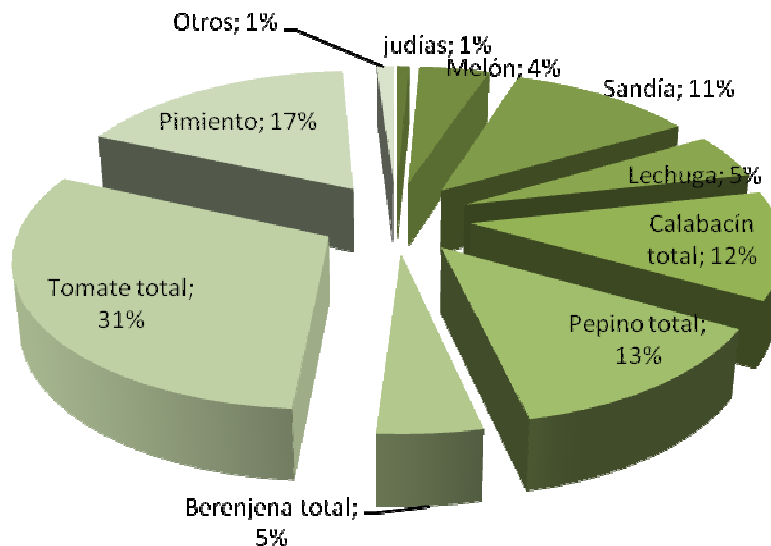


Ilustración 43 Producción por tipos de productos hortofrutícolas de la provincia de Almería durante la temporada 2012-2013. Fuente: Delegación de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de Almería. 2014.



Partiendo de datos bibliográficos [22] se ha realizado una estimación de los residuos generados en el Poniente Almeriense durante la temporada 2012-2013 obteniéndose como resultado 663.600 toneladas de residuos, lo que supone alrededor de un 35% de la producción (la producción de esta zona también se ha calculado en base a la referencia bibliográfica [24], se ha estimado una producción de 1.897.039 toneladas).

En la Tabla 7 se muestra una estimación de las toneladas o metros cúbicos de residuos que se generan por hectárea, alcanzándose un promedio de 99,68 m³ o 25,33 toneladas por hectárea.

Cultivo	Residuos	
	m ³ /Ha	Tm/Ha
Pimiento (T)	100	25
Pimiento (I)	110	27
Tomate (T)	140	35
Tomate (I)	182	45,5
Pepino (T)	90	22,5
Pepino (I)	94,5	23,6
Calabacín	90	22,5
Berenjena	90	22,5
Judía	70	17
Sandía	50	15
Melón	80	23
Promedio	99,68	25,33

Tabla 7 Estimación de residuos generados por hectárea. T: cultivo en invernadero tradicional; I: cultivo en invernadero industria. Fuente: La Agricultura Intensiva del Poniente Almeriense. Año 2003.

En relación a la estacionalidad del residuo no habría problema, en la actualidad con el sistema de invernadero se generan residuos agrícolas de este tipo a lo largo de todo el año. Puede ocurrir que disminuya la cantidad de algún cultivo específico, pero se verá incrementado otro que podrá actuar como sustituto. Hay que añadir que son cultivos con características muy semejantes desde un punto de vista botánico, ya que muchos de ellos pertenecen a familia de las solanáceas.

Estos residuos vegetales presentan un factor limitante a la hora de someterlos al proceso de digestión anaerobia. Dicha limitación radica principalmente en la composición y es que suelen venir mezclados con otros tipos de residuos tales como:



- Plásticos: tipo film (para bandas laterales, cubiertas de invernadero, acolchados, tunelillos, doble techo, solarización de suelos, etc.), rafias, tuberías de riego por goteo, sacos, bolsas de abono, envases, bandejas de transporte y plantación, entre otros.
- Esto no se ha detectado en las muestras que hemos recibido. Metales: alambres de distintos grosores.
- Residuos químicos: insecticidas, herbicidas, fungicidas y acaricidas.

Todos estos elementos actuarán como inhibidores del proceso de digestión anaerobia, por lo que es necesario que esta fracción sea inexistente o lo más pequeña posible. Para ello será importante una concienciación por parte del agricultor y sus trabajadores, y un sistema de pretratamiento que impida que estas impurezas lleguen al digestor.

El residuo deberá de cumplir también una serie de **características físico-químicas que aseguren el éxito del proceso**. En la Tabla 8, se identifican algunas características de residuos de frutas (parámetros identificados en la bibliografía consultada, que podrían tomarse como referencia para el desarrollo del estudio con restos agrícolas) que van a servir como punto de partida a la hora de valorar el residuo. Mientras que en la Tabla 9 se identifican **los requerimientos que debe de tener el residuo para la producción de biogás**. Es importante resaltar la presencia de ciertos elementos trazas durante la formación del metano, ya que la ausencia de estos micronutrientes necesarios para el metabolismo de los microorganismos anaerobios podría causar una reducción significativa de su rendimiento.

Residuos de frutas	
Parámetro	Valor
ST(%)	15-20
SV (%)	75
C:N	35

*Tabla 8. Características principales de residuos de la fruta.
Fuente: La producción de biogás a partir de residuos ganaderos. AINIA. 2010*



Parámetros	Hidrólisis/acidificación	Formación del metano
Temperatura	25-35°C	Mesofílico: 32-42°C Termofílico: 50-58°C
pH	5,2-6,3	6,7-7,5
Relación C:N	10-45	20-30
Contenido sólido	<40% materia seca	<30% materia seca
Potencial redox	+400-300 mV	<-250 mV
Demanda de nutrientes C:N:P:S	500:15:5:3	600:15:5:3
Elementos traza	No se identifican requerimientos específicos	Ni, Co, Mo, Se

Tabla 9 Requerimientos para el proceso de producción de biogás. Fuente: Pfeiffer, B. 2008.

Si nos fijamos en la Tabla 8 y Tabla 9 en la primera vienen los parámetros principales que presentan los residuos de la fruta, mientras que la segunda tabla identifica aquellos valores más aconsejables que debe de presentar el residuo para poder ser utilizado en el proceso de digestión anaerobia. Un ejemplo sería con la relación carbono-nitrógeno, se identifica en la Tabla 8 que esta relación en los residuos de la fruta es de 35, y en la Tabla 9 que para que se dé un proceso lo más idóneo posible este valor debe de encontrarse entre 10-45 en las primeras etapas de la digestión (que se cumpliría) y entre 20-30 en la última etapa, por lo que actuaría como un factor más limitante en esta etapa.

Una vez identificadas las características que de forma general presentan los residuos de la fruta (todo a partir de datos bibliográficos) y de las particularidades que debe de presentar para la idoneidad en la generación de biogás, en la Tabla 10 (también desde un punto bibliográfico pero acercándose más a los residuos presentes en la zona de estudio) se describe la producción de metano de algunos residuos de los que se cultivan en la provincia de Almería y son objetos de este estudio. La producción promedio de metano es en torno a 300 m³ por tonelada de sólidos volátiles alimentados.



Residuo	SV (% de ST)	Producción de metano (m ³ /t SV alimentado)
Tomate	95,3	298
Cebolla	88,2	400
Patata	90,9	267
Berenjena	92,6	385
Coliflor	84,6	261
Nabo	84,4	314
Rábano	83,3	299

Tabla 10 Producción de metano en algunos residuos hortofrutícolas en rango mesófilo. Fuente: PROBIOGÁS. 2008.

5.2. DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN.

El análisis técnico de una instalación de digestión anaerobia va a ser algo que venga determinado por la composición de los residuos a tratar, el volumen de residuos a tratar y el rendimiento que se quiera alcanzar.

En la actualidad no hay ninguna planta en funcionamiento para el tratamiento únicamente de residuos agrícolas, así que los datos que se van a comentar a continuación son datos estrictamente teóricos y datos de plantas de codigestión de residuos agrícolas con otros tipos de residuos.

El mejor modo de poder valorar el comportamiento biológico de los diferentes reactores es el empleo simultáneo de tres indicadores que están relacionados entre sí:

- La velocidad de adición de sustrato.
- La velocidad de formación del producto.
- El tiempo de retención.



La velocidad de carga orgánica, expresada como kg de SV/m³ de reactor-día, indica la capacidad de degradación del sistema.

La velocidad de formación del producto va a indicar el volumen de biogás seco, o mejor de metano, producido por unidad de volumen de reactor (Nm³ CH₄/m³ de reactor día) representa la eficacia de la conversión.

El tercer parámetro aludido, el tiempo de retención, también relacionado con la máxima velocidad sostenible de reacción, es aproximadamente igual a la inversa de la velocidad de carga orgánica cuando ésta se expresa en unidades de masa húmeda de sustrato por unidad de volumen de reactor y de tiempo. Lógicamente, si la velocidad de carga orgánica máxima de un reactor fuera desconocida, el rendimiento en biogás obtenido sólo resultará un indicador válido de comparación con sistemas donde se hayan empleado residuos de origen y composición semejantes, puesto que dicho rendimiento depende mucho más de la composición del residuo que del comportamiento del proceso.

Todas estas circunstancias han dado lugar a cierta diversificación en los reactores empleados para la digestión anaerobia, en función de sus fines, escala y tipo de alimentación, circunstancia que hace conveniente su análisis independiente, si bien es necesario disponer de criterios homogéneos que permitan la comparación entre los diferentes diseños.

El tamaño del digestor viene determinado por las tres variables comentadas con antelación, que son interdependientes entre sí. **La velocidad de adición del sustrato, VA**, expresa la cantidad de material biodegradable (normalmente expresada como sólidos volátiles) por unidad de volumen que se introduce en el digestor en la unidad de tiempo y que, por tanto, puede ser transformado en biogás, es decir:

$$VA = \frac{\text{kg SV}}{(\text{m}^3 \text{ digestor}) / (\text{día})}$$

Si la velocidad de alimentación es muy baja, la actividad metabólica de las bacterias es menor y se producirán sólo pequeñas cantidades de gas. Si la velocidad de alimentación es muy alta, se producirá una sobrecarga que hará aumentar la formación de ácidos volátiles con el consiguiente aumento de la proporción de dióxido de carbono en el gas.



El tiempo de residencia hidráulico, TRH, es el tiempo medio que los sólidos alimentados permanecen en el digestor, y se obtiene dividiendo el volumen del mismo por el caudal de alimentación, es decir:

$$\text{TRH} = \frac{\text{m}^3 \text{ digestor}}{(\text{m}^3 \text{ alimento})/\text{día}}$$

El tiempo de retención mínimo es una constante para cada tipo de biomasa. Tiempos menores impiden la reproducción adecuada de las bacterias metanogénicas, cuya velocidad de regeneración es muy baja frente a la de las bacterias acidogénicas, como ya se ha dicho con anterioridad, produciéndose el fenómeno de *lavado* del digestor, es decir, el arrastre de las bacterias con el efluente antes de que se puedan reproducir. Por el contrario, tiempos de retención muy altos hacen que las bacterias consuman toda la materia biodegradable presente, deteniéndose el proceso por falta de alimentación. En este caso, se estaría llevando a cabo un *proceso discontinuo*, es decir, se carga la alimentación en el digestor y se deja que los microorganismos la consuman completamente, lo que da lugar a la destrucción completa de los sólidos volátiles, con la consiguiente variación de la composición del gas a medida que transcurre el tiempo.

A partir de las fórmulas anteriores se puede calcular el volumen necesario que debe de presentar el digestor para un procesado de la materia lo más eficientemente posible. Se cogerá como referencia la fórmula relacionada con el tiempo de residencia hidráulico (TRH):

TRH: 20 días (valor encontrado en la bibliografía [22] y [21]).

m³ de alimento al día: se va a considerar una cantidad de 30.000 toneladas/año que correspondería a alimentar el digestor con 82,2 toneladas/día, lo pasamos a m³ considerando la densidad del residuo: 0,25 T/m³ [24], 328,8 m³/día.

$$\text{m}^3 \text{ digestor} = \text{TRH} \times \text{m}^3 \text{ de alimento}/\text{día} = 20 \times 328,8 = 6.576 \text{ m}^3$$

La cantidad considerada de 30.000 toneladas/año se considera el residuo tal cual llega a la planta, este residuo será sometido a un pretratamiento de eliminación de impurezas (se estima que alrededor del 3%, según las muestras de residuos hortofrutícolas llegadas al Laboratorio del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Escuela Técnica



Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla de la Universidad de Sevilla), adecuación de la partícula al proceso, incluso es interesante el planteamiento de un pretratamiento biológico que ayude a incrementar la degradabilidad del residuo como se ha visto con antelación.

Una vez conocidas las dimensiones del digestor, éste deberá de funcionar en un régimen de mezcla completa, con agitación y en rango mesofílico (28-33°C). Según las fuentes y bibliografía consultada, en la actualidad la gran mayoría de plantas que realizan el proceso de digestión anaerobia lo realizan con estos parámetros, puede encontrarse alguna planta en concreto que utilice otro tipo de régimen u opere en otro rango, pero son casos puntuales.

Una vez conocido el volumen del reactor se pasa a calcular el volumen de biogás a producir durante la digestión anaerobia. Como base para el cálculo de estos datos se tendrán en cuenta las muestras recibidas en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla con fecha 8 de septiembre de 2014, en la Ilustración 44 se observa el estado en que llegan las muestras (tamaño de los residuos e impurezas).



Ilustración 44 Muestras de residuos hortofrutícolas a su llegada al laboratorio.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Volátiles en total a tratar en un día (Tn/día) (1)	16,38	9,57	15,08	11,02	13,82
Volátiles en total a tratar en un día (m ³ /día) (2)	65,50	38,27	60,31	44,09	55,28

Tabla 11 Cálculo de volátiles generados diariamente. (1) Resultado de analítica en laboratorio; (2) Cantidad de residuo que supuesta; (3) Cálculo a partir de resultado de analítica y/o cantidad de residuo supuesta; (4) Se ha considerado la densidad del residuo 0,25 Tn/m³ [24].



En la *Tabla 11* se muestran los resultados obtenidos para las cinco muestras que llegaron en relación al peso de volátiles que presentan. Se ha realizado un análisis partiendo del tanto por ciento en peso de humedad y volátiles. Para ello se ha tomado como cantidad de residuo a tratar la cantidad supuesta de 30.000 toneladas/año, a ésta se le ha restado el porcentaje de impurezas que suelen presentar (en torno al 3%). Tras realizar los cálculos pertinentes se aprecia una diferencia notable entre unas muestras y otras, por tanto es interesante realizar el estudio de las cinco muestras ya que en el residuo al ser heterogéneo (es decir, no presentar un único componente) se pueden encontrar situaciones en las que se produzcan picos de volátiles, por lo que hay que contemplar estos posibles incrementos en el volumen del digestor. Visto los resultados obtenidos en la *Tabla 11*, la mayor cantidad de volátiles se identifican en la muestra 1, 65,50 m³/día.

Si volvemos a la *Tabla 10* del apartado anterior, se observa la producción de metano en función de los volátiles para diferentes residuos hortofrutícolas. Si se coge como referencia el promedio de la producción de metano, 318 m³ de CH₄/T SV alimentados y teniendo en cuenta el resultado obtenido en sólidos volátiles alimentados es de 65,50 m³/día, lo que corresponde a una producción anual de 23.907,5 m³ de CH₄.

En la *Ilustración 45* se plantea un esquema de una planta para el tratamiento de los residuos hortofrutícolas. Está basado en el ejemplo de planta que se expuso en el punto 4.1 de este estudio. En una primera parte se plantea una zona de eliminación de rechazo (plástico, alambres, piedras) a través del trómel podemos conseguir quitar residuos de una menor densidad, como pueden ser plásticos. Posteriormente una separación de inertes a través de mesas densimétricas que eliminen residuos de una mayor densidad como piedras, y por último un separador magnéticos que elimine los pequeños fragmentos de metal. Este rechazo se llevará a vertedero para su correcta gestión.

El residuo una vez ha sufrido el pretratamiento se lleva a la zona de digestión anaerobia, se introduce en el digestor, allí estará continuamente agitado para conseguir la máxima homogeneidad del residuo y las condiciones idóneas para el desarrollo de los microorganismos encargados de la digestión, para ello es muy importante controlar la temperatura, pH, presencia de tóxicos, la alcalinidad y la proporción entre diferentes elementos (ver *Tabla 9*). Una vez transcurrido el tiempo de retención hidráulico, 20 días, se obtiene el digestato que podrá ser utilizado como abono, por ejemplo. Durante este tiempo que el residuo ha estado en



el digestor se ha ido generando el biogás, que se irá almacenando en el gasómetro para su posterior tratamiento y uso, se describe en el apartado 5.4 de este estudio.

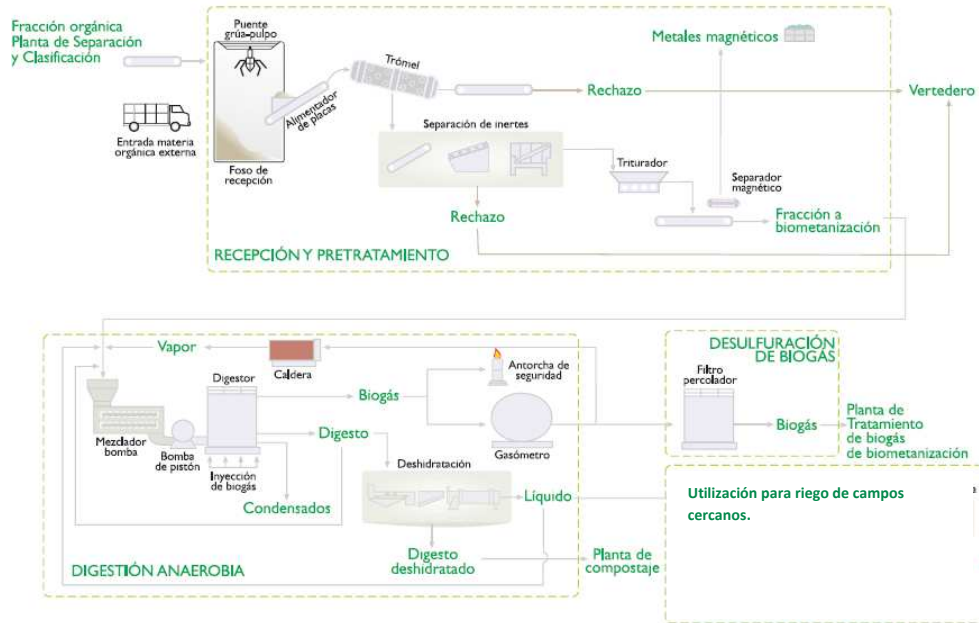


Ilustración 45 Esquema de una posible combinación de planta de digestión anaerobia de residuos agrícolas.



5.3. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA INSTALACIÓN.

A continuación se va a realizar una estimación del coste de la instalación para el tratamiento de los residuos objeto de este estudio. Para ello se va a seguir los pasos realizados en el apartado 4.4.

Planta Poniente almeriense	Residuos	Residuos hortofrutícolas
	Biogás producido	0,79 m ³ /t de mezcla de residuos
	Total de residuos	120.000 m ³ /año = 328,76 m ³ /día
	Volumen total del digestor	6.576 m ³
	Producción total de biogás	23.907,5 m ³ biogás/año

Tabla 12 Datos de la planta para el tratamiento del Poniente Almeriense.

En la se resumen las características principales del tratamiento de los residuos agroindustriales, todos estos cálculos han sido elaborados en el apartado anterior. En la Tabla 13 se identifican tanto los costes de inversión como los costes anuales de mantenimiento y operación para la planta.

Datos básicos de dimensionado	Cantidad total de residuo tratada (t/año)	30.000
	Producción específica de biogás (m³ biogás/t)	0,79
	Potencia eléctrica (kWe)	5,22
	Volumen del digestor (m³)	6.576
Costes	Inversión (€)	1.350.471
	Costos anuales de mantenimiento y operación (€/año)	115.529

Tabla 13 Costes de inversión y mantenimiento de la planta de estudio.



La potencia eléctrica generada es baja en comparación con otras plantas, el cálculo de sólidos volátiles de las mezclas de residuos ha dado como resultado un valor muy bajo en volátiles lo que nos va a determinar el volumen de biogás producido.

5.4. USOS ALTERNATIVOS DEL BIOGÁS PRODUCIDO.

El biogás obtenido como resultado de la digestión anaerobia de los residuos agrícolas puede ser:

- Utilizado como combustible en equipos para la generación de energía térmica (por ejemplo en calderas y hornos).
- Cogenerado para la producción de electricidad y calor.
- Usado en aplicaciones de trigeneración (obtención simultánea de electricidad, calor y frío) a través del empleo de diferentes tecnologías como motores de combustión interna, turbinas de gas, pilas de combustible o microturbinas.
- Aprovechado para la obtención de productos químicos, combustibles en el sector automovilístico o inyectado en la red de gas natural.

El uso del biogás producido, como ya se comentaba en apartados anteriores, va a depender de la calidad alcanzada tras el refinado al que se somete el gas resultante de la digestión anaerobia. Con este proceso se van a eliminar contaminantes como el nitrógeno, ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y humedad.

El acondicionamiento del gas va a ser algo fundamental para su uso posterior, por lo que se hace necesario estudiar las distintas alternativas para su depuración en función de dos aspectos fundamentales: la producción de gas y los requisitos de pureza. Estos factores son de crucial importancia en el dimensionado y evaluación económica de las plantas de biogás, ya que están muy ligados los costes de instalación de los sistemas de purificación a la escala del proceso.

El biogás procedente del proceso de digestión anaerobia de materia orgánica es utilizado mundialmente con fines energéticos, debido a la elevada presencia de metano. Una



composición tipo de un biogás de origen agroindustrial puede ser la que se muestra en la Tabla 14.

Gases	Cantidad
Metano (CH ₄)	50-80%
Dióxido de carbono (CO ₂)	30-50%
Hidrógeno (H ₂)	0-2%
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	100-7000 ppm
Nitrógeno (N ₂)	0-1%
Oxígeno (O ₂)	0-1%

Tabla 14 Composición biogás agroindustrial. Fuente: PROBIOGÁS.

Algunos inconvenientes que puede presentar el uso del biogás desde un punto de vista técnico y económico de las plantas de aprovechamiento, es la presencia de componentes minoritarios. Estos compuestos pueden ser: ácido sulfhídrico y mercaptanos⁷: son corrosivos para los equipos (pilas d combustible, procesos catalíticos d reformado, refrigeradores, calentadores, etc.). Cuando se encuentran por encima de 1000mg/Nm³ acortan la vida del aceite del motor y ponen en peligro su sistema de combustión.

- Compuestos halogenados: en los motores de combustión interna los compuestos orgánicos clorados generan ácido clorhídrico (HCl) y dióxido de carbono (CO₂) principalmente. El HCl al ser altamente corrosivo va a atacar directamente o produce la acidificación del aceite lubricante del motor. Los efectos negativos del biogás comenzarán con una concentración superior a 50mg/Nm³.

Por tanto, al ser el biogás cada vez más utilizado como biocombustible, se ha llevado a cabo la búsqueda de mecanismos para eliminar los componentes nocivos para la salud, el medioambiente y la mecánica de las instalaciones.

En relación al sistema de análisis empleado para determinar la composición de biogás han sido técnicas de cromatografía de gases con detectores FID o TCD. Y en referencia a la toma de las

⁷ Compuesto orgánico que contiene el grupo -SH (grupo tiol o sulfhidrilo). Los mercaptanos son análogos de los alcoholes y los fenoles, en los cuales el grupo -OH (oxhidrilo) ha sido sustituido por el grupo -SH. Son de olor desagradable y con frecuencia se agregan al gas licuado o a otros gases tóxicos e inodoros para alertar al usuario sobre fugas. Los olores característicos de las refinerías de petróleo se deben en parte a los mercaptanos, también se les llama tioles. Su toxicidad es variable.



muestras para su posterior transporte y almacenaje de gases puede ser: contenedores de gases (canisters), botellas de gases, bolsas tipo TEDLAR, trampas (impingers) y/o tubos sorbentes. Un factor importante a la hora de realizar la toma de muestras es que todos los materiales que van a estar en contacto con los derivados de azufre tienen que ser cuidadosamente elegidos y ser inertes. La toma de muestras se puede realizar por quimisorción sobre metales, adsorción sobre sólidos no metálicos y “trampas enfriadas” (absorción).

El biogás una vez sale del proceso de digestión anaerobia presenta diferentes concentraciones de metano, dióxido de carbono, vapor de agua y otros contaminantes. **Sin tratamiento alguno sólo puede ser usado en su lugar de producción.** Por ello es muy importante su purificación, de forma que se incremente su contenido energético para que sea rentable tanto desde un punto de vista económico como energético, su transporte a largas distancias.

En la Tabla 15 se identifican las posibles aplicaciones de este biogás y las características que deben presentar en función de la misma.

Aplicación	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O	Trazas
Motor estacionario	<1000 ppm	No	No	Sí (ej. Siloxanos)
Microturbinas	<70.000 ppm	No	Sí	Sí (ej. Siloxanos)
Cogeneración	<1000 ppm	No	Evitar la condensación	Sí (ej. Siloxanos)
Motor vehículos	Sí	Sí	Sí	Sí
Pilas combustibles (SOFC)	<0,1 ppm	No, es diluyente	No	Sí (ej. Siloxanos)
Inyección red de gas	Sí	Sí	Sí	Sí

Tabla 15 Grado de purificación necesario según aplicación final del biogás producido.
Fuente: PROBIOGÁS.

En función de para qué se vaya a utilizar el biogás, el tratamiento será más o menos complejo. En la Ilustración 46 se puede observar gráficamente como la combustión es lo que necesita menor grado de refinado, mientras que usos más complejos como es el de pilas de combustible, necesitan un mayor grado de refinado.

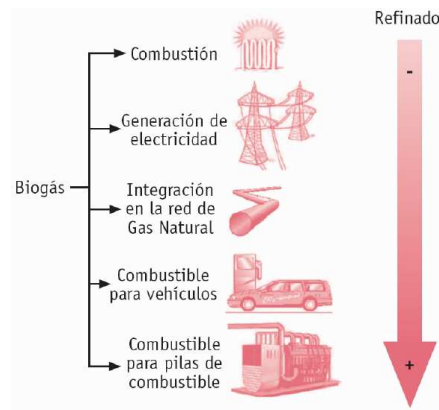


Ilustración 46 Diferentes tipos de aprovechamiento del biogás en función de su grado de depuración. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

5.4.1. Técnicas de purificación del biogás producido

Una vez conocida la composición del gas resultante del proceso de digestión anaerobia de los residuos agrícolas, hay que llevar a cabo el proceso de purificación más aconsejable para conseguir los mejores rendimientos de los procesos de explotación del biogás y reducir el impacto de las emisiones gaseosas. Estos tratamientos de purificación van a afectar a los costes de producción y por tanto al coste final de la energía generada.

En las Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18 se identifican aquellos métodos más aconsejables según el contaminante a eliminar. En ellas se indican las ventajas como los inconvenientes de cada uno de ellos, se identifican tanto métodos más generalistas como el carbón activo, utilizado para eliminar diferentes contaminantes (SH_2 , siloxanos y CO_2) y como otros más específicos, como la separación criogénica, con el que se consiguen valores más exigentes de eliminación y que pueden ser interesantes para usos muy concretos del biogás.



	Tecnología	Ventajas	Inconvenientes
Eliminación CO₂	Separación criogénica	El CO ₂ puede ser eliminado como líquido enfriando la mezcla del biogás a elevada presión. El biogás producido contiene más del 97 % de CH ₄ .	Los elevados costes de inversión y operación limitan su aplicación actual. Aplicación experimental.
	Scrubber (lavado) con agua	La solubilidad del CO ₂ en agua depende de la T, y PH.	Recomendable eliminar primero el H ₂ S. Un 5 - 10 % del CO ₂ no se recupera.
	Scrubber (lavado) con disolventes orgánicos	Selexol [®] , Genosorb [®] , alcanol aminas. Reducciones hasta niveles de 0,5 - 1 %.	Costes operación más elevados que en el lavado con agua. Vertido y consumo de disolventes. Vaciado periódico parcial.
	Carbón activo	Diseño y operación simple, mediante PSA. Eficiencias elevadas.	Coste operación elevado. Necesidad eliminación previa del agua.
	Separación por membranas	Equipos y operación simples.	Necesidad de altas presiones. Pérdida de CH ₄ .
Eliminación de agua	Absorción en sílica gel o Al ₂ O ₃	Eliminación de H ₂ O cuando se requieren bajos puntos de rocío.	Costes operación elevado.
	Absorción en glicol o sales higroscópicas	Las sales pueden ser recuperadas a elevadas temperaturas.	Coste operación elevado.
	Refrigeración	Método utilizado comúnmente para condensar el agua. Para alcanzar elevados puntos de rocío, el gas puede ser comprimido antes del enfriamiento.	Aumenta la eficiencia cuando baja la temperatura, con lo que el coste energético es mayor.

Tabla 16 Métodos de depuración de biogás para la eliminación de agua y dióxido de carbono. Fuente: PROBIOGÁS. Revisar el texto de las tablas.



Tecnología		Ventajas	Inconvenientes
Eliminación de H ₂ S	Carbón activo	El carbón activo actúa como catalizador para convertir H ₂ S en azufre elemental. Es necesaria la impregnación con KI. El uso de carbón activo impregnado con KI es un método común para eliminar H ₂ S antes del tratamiento PSA.	Requiere la regeneración del carbón activo o bien su disposición final. Costes operación elevados. Mejores resultados a altas presiones (PSA). La eficiencia del sistema disminuye a medida que se produce la saturación del material.
	Adición de sales férricas	Operación sencilla. Eliminación hasta < 150 ppm.	Exceso de Fe ⁺³ puede inhibir formación biogás.
	Desulfuración biológica	Los microorganismos de la familia <i>Thiobacillu</i> , pueden ser utilizados para reducir el nivel de sulfitos en el biogás por oxidación a azufre elemental y a algunos sulfatos. La mayor parte de microorganismos son autotróficos, lo cual significa que pueden usar el CO ₂ del biogás como fuente de carbono. Los contenidos en H ₂ S pueden reducirse de 3000 - 5000 ppm a 50 - 100 ppm.	Debe ser añadido oxígeno al biogás para la desulfurización biológica. El nivel necesario depende de la concentración de H ₂ SO ₄ , normalmente entre 2-6 % vol aire en biogás.
	Scrubber (lavado) con soluciones aminas	Absorbe también el CO ₂ .	Elevado costes operación.
	Scrubber (lavado) con soluciones alcalinas.	Absorbe el H ₂ S. Se eliminan los problemas de formación de espumas y corrosión.	El agente antiespumante hace que el equipamiento y la operación sean más complicados. Este método consume mucha energía para el bombeo de la solución y de los gases.
	Scrubber (lavado con NaOH)	Reduce el H ₂ S, formando las sales insolubles Na ₂ S/NaHS	Generación de un residuo a eliminar.

Tabla 17 Métodos de depuración de biogás para la eliminación de ácido sulfhídrico. Fuente: PROBIOGÁS.



Tecnología		Ventajas	Inconvenientes
Eliminación gases traza	Carbón activo	Es el método más utilizado para la eliminación de siloxanos. Puede ser un filtro simple, PSA o TSA. Eficiencias elevadas (> 95 %)	Requiere la regeneración del carbón activo o bien su disposición final. Costes operación elevados. Mejores resultados a altas presiones (PSA). La eficiencia del sistema disminuye a medida que se produce la saturación del material.
	Adsorción Sílica gel	Elevadas eficiencias (> 98 %)	En proceso investigación. Elevada relación eficiencia-coste.
	Absorción en disolventes orgánicos no volátiles	Ha sido investigada con rangos de eliminación de hasta el 60 %.	En proceso de investigación.

Tabla 18 Métodos de depuración de biogás para la eliminación de gases trazas. Fuente: PROBIOGÁS.

5.4.2. Costes de purificación en función del aprovechamiento.

En relación a los costes de purificación es bastante difícil cuantificarlos ya que hay bastantes factores que influyen en los costes finales de la planta. Por un lado, se identifican todos los condicionantes de calidad final del biogás (origen de la biomasa, tipo de digestión, los parámetros de operación y el diseño de la planta, por ejemplo), y por otro, el uso final que se le quiera dar y los pretratamientos a los que se someta para alcanzar el límite exigido.

La misma aplicación en distintas plantas puede presentar costes muy dispares, lo que exige el estudio y la evaluación de cada planta antes de la implantación de una u otra tecnología.

A continuación, en la Tabla 19 , se muestran unos **valores orientativos de varias tecnologías utilizadas como sistemas de purificación**. Estos valores se han calculado a partir de ofertas de proveedores reales de tecnología para una planta tipo en Austria y Alemania (en estos países los mercados relacionados con este sector presentan mayor madurez, por lo que las ofertas presentarán menores grados de fluctuación).



Tecnologías	Costes Inversión (€/m ³)	Costes Operación (€/m ³)	Total (€/m ³)
Lavado (Scrubber)	0,1	0,06	0,17
Biofiltro percolador	0,004	0,001	0,005
Pellets óxido de hierro (adición de sales férricas)	0,01	0,01	0,02
Secado a 4°C (refrigeración)	0,002	0,001	0,003
PSA (carbón activo)	0,08	0,04	0,13

Tabla 19 Costes orientativos de purificación de biogás con distintas tecnologías. Fuente: PROBIOGÁS.

5.4.3. Aplicaciones más relevantes para el biogás

Las tecnologías más comúnmente empleadas a día de hoy, para el aprovechamiento del biogás producido resultan ser los motores de cogeneración para la generación de calor y electricidad. Otro uso común del biogás es su inyección y distribución en las redes de gas natural.

En la actualidad se están desarrollando nuevas tecnologías de aprovechamiento energético, con el objeto de llevar a cabo dicha acción de una manera más eficiente. Estas tecnologías, junto con las citadas anteriormente, se analizan a continuación.

5.4.3.1. Motores de cogeneración

La cogeneración se define como la producción simultánea de energía eléctrica y térmica utilizando un mismo combustible. La principal ventaja de la cogeneración frente a los sistemas convencionales de generación de electricidad es que presenta una mayor eficiencia energética en el proceso.

Los sistemas para llevar a cabo la cogeneración son muy variados: motores de combustión interna alternativos, microturbinas, turbinas de vapor o gas, motores Stirling o ciclos Rankie.

En la Tabla 20 se muestran unos datos sobre las características más relevantes de estos sistemas.

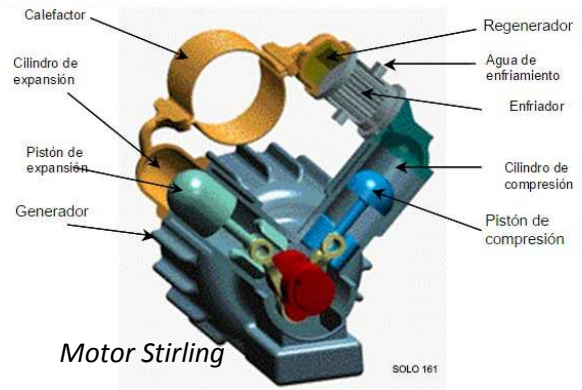
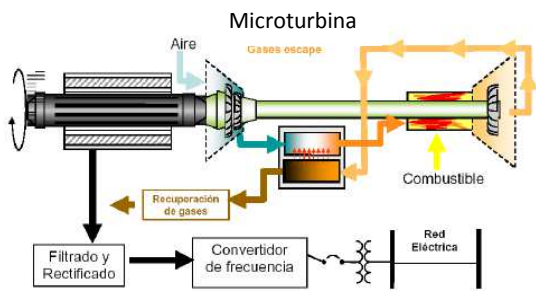


Ilustración 47 Ejemplos de motores de cogeneración

Tecnología	MCIA ¹	Microturbina	Turbina de gas	Stirling	Pilas de combustible
Tamaño (MW)	0,03-6	0,001-0,4	0,5-30	0,0250-0,055	0,1-3
Inversión (€/MW)	560.000-965.000	950.000-1.350.000	325.000-725.000	900.000-1.600.000	3.200.000-4.000.000
O&M (€/MWh)	6,2-16	6,4-12	3,2-8	4-6,4	1,5-2,3
Eficiencia sobre PCI (%)	30-42	14-30	21-40	30	26-50

Tabla 20 Tecnologías utilizadas para la valorización del biogás: rango de potencias, coste de instalación y operación y mantenimiento y eficiencia sobre el poder calorífico inferior (se define cuando toda el agua proveniente del combustible o formada durante la combustión se encuentra como vapor en los productos de combustión. No comprende el calor de condensación). Fuente: IDAE. 1: Motores de combustión interna alternativos.



Como se puede ver en la Tabla 20, para el rango de potencia más habitual en las plantas de biogás agroindustrial [23], la alternativa más económica es el Motor de Combustión Interna Alternativo (MCIA), que también es competitivo en términos de eficiencia sobre el Poder Calorífico Inferior (PCI). Esto lleva a que los motores de cogeneración sean los más utilizados para el aprovechamiento del biogás agroindustrial.

El motor de combustión interna alternativo va a transformar la energía química contenida en el combustible, en este caso en el biogás, en energía térmica útil y energía mecánica. La energía mecánica se utilizará en un rotor que la transforma en energía eléctrica.

Los motores de cogeneración producen dos corrientes de energía térmica, una a baja temperatura (80-90°C) generada de la refrigeración de la camisa del motor, y otra corriente a alta temperatura (450-500°C) procedente de los gases de escape del motor.



Ilustración 48 Ejemplos de motores de biogás.

Los motores de combustión interna alternativos presentan una tecnología madura (en la Ilustración 49 se observa un esquema de un motor), con una amplia implantación en la industria. Normalmente se utilizan con gas natural y para utilizarlos con el biogás, no es necesario llevarlo a un grado de purificación muy alto, aunque sí es preciso reducir la concentración de determinados componentes, principalmente la humedad y el sulfuro de hidrógeno.

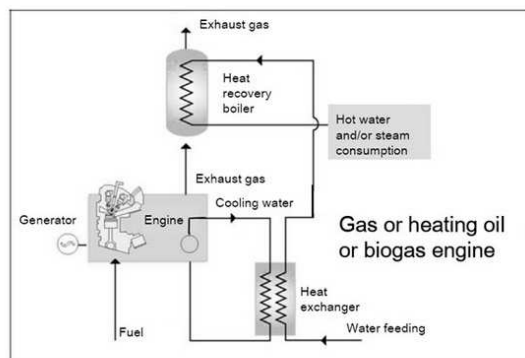


Ilustración 49 Esquema de un motor de combustión interna alternativo.

En la Tabla 21 se identifican las principales ventajas y beneficios de los motores de cogeneración en relación al biogás.

Elevada resistencia al ataque corrosivo de los gases.
Excelente comportamiento frente a la oxidación.
Muy elevada protección de los asientos y guías de las válvulas de culata.
Máxima protección contra el rayado de pistones y desgaste superficial de las camisas.
Excelente limpieza del motor.
Mínima formación de depósitos.
Gran resistencia a la formación de espumas y corrosión.
Larga duración en servicio.

Tabla 21 Ventajas y beneficios de los motores de cogeneración. Fuente: PROBIOGÁS. 2010.

Para asegurar el buen funcionamiento del motor de cogeneración se deberán de realizar los análisis oportunos que identifiquen la composición del biogás. En la Tabla 22 se identifican de forma general, aquellos parámetros más interesantes de analizar, pero siempre habrá que tomar como guía las especificaciones técnicas del motor que se haya instalado. Estos análisis se realizarán de forma periódica y también son relevantes cuando se observa algún cambio en el gas generado o existan dudas sobre la aparición de componentes dañinos para el equipo.



1	Descripción del punto de toma de muestra, dentro de la instalación.
2	Hora / fecha de la toma de muestra.
3	Hora / fecha de realización del análisis.
4	Método analítico empleado.
5	Temperatura y presión de suministro del gas.
6	Concentración de CH ₄ (%vol.)
7	Concentración de CO ₂ (%vol.)
8	Concentración de N ₂ (%vol.)
9	Concentración de O ₂ (%vol.)
10	Concentración de H ₂ S (ppm o mg/m _n ³)
11	Concentración de otros compuestos de azufre (ppm o mg/m _n ³)
12	Humedad relativa del gas (%)
13	Concentración de haluros (ppm o mg/m _n ³)
14	Concentración de compuestos orgánicos halogenados (ppm o mg/m _n ³)
15	Concentración de NH ₃ (ppm o mg/m _n ³)
16	Concentración de partículas sólidas (mg/m _n ³)

Tabla 22 Parámetros a analizar para conocer la composición del biogás. Fuente: PROBIOGÁS

Estos análisis nos van a dar una idea de en qué condiciones viene el biogás resultante del proceso de digestión anaerobia.

En la Tabla 23 se identifica de forma más exhaustiva que en apartados anteriores valores a tener en cuenta para introducir el biogás en el motor.



Parámetro	Valor
Presión y temperatura	Van a depender del sistema de carburación empleado.
Humedad del gas	La humedad relativa del gas a la entrada deberá ser siempre inferior al 80%.
Oxígeno en gas	Máxima cantidad admisible de oxígeno es el 2% vol.
Hidrógeno en gas	Máxima cantidad admisible de oxígeno es el 12% vol.
Hidrocarburos superiores en gas	Máxima cantidad permitida de hidrocarburos C ₄ + (butano y superiores) no debe sobrepasar el 1% del volumen total de la mezcla de gases.
Compuestos de azufre como SH₂	El límite máximo se fija en 70mg/MJ, en motores sin catalizador.
Compuestos halogenados (F, Cl, Br, I) como Cl-	Máximo nivel de haluros expresados como cloruros equivalentes: 3,5 mg de Cl ⁻ equivalente ¹ /MJ. En motores sin catalizador.
Amoniaco (NH₃)	Máximo nivel se fija en 1,5mg/MJ
Partículas sólidas	Tamaño máximo de partícula 5 micras.

Tabla 23 Condiciones generales de suministro de gas combustible. Fuente: PROBIOGÁS.

5.4.3.2. Uso en redes de gas natural.

El biogás producido una vez purificado si cumple con las características establecidas puede ser inyectado en la red de gas natural. Esto se puede llevar a cabo de dos modos diferentes:

- Ajustando el poder calorífico del biogás al del gas natural de la red. De este modo el biogás se inyectaría sin ningún tipo de limitaciones. A este biogás se le denomina gas de intercambio.



- Introduciendo el biogás en la red en pequeños porcentajes de forma que la mezcla no supere los límites establecidos para el poder calorífico del gas natural. Este biogás se denominará de mezcla o adicional.

A través de la Resolución del 22 de septiembre de 2011 de la Dirección General de Política Energética y Minas, se establecen los límites que deben de cumplir todos los gases que se introducen en el Sistema Gasista de España, Tabla 24.

Propiedad (a)	Unidad	Mínimo	Máximo
Índice de Wobbe	kWh/m ³	13,403	16,058
PCS (b)	kWh/m ³	10,26	13,26
Densidad relativa	m ³ /m ³	0,555	0,700
S total	mg/m ³	-	50
H ₂ S + COS (como S)	mg/m ³	-	15
SRSH (como S)	mg/m ³	-	17
O ₂	mol %	-	0,3 (c)
CO ₂	mol %	-	2,5
H ₂ O (Punto de rocío)	°C a 70 bar (a)	-	+2
HC (Punto de rocío)	°C a 70 bar (a)	-	+5
Polvo/Partículas	-	Técnicamente puro	

Tabla 24 Especificaciones de calidad del gas introducido en el Sistema Gasista. (a) Se expresa en las siguientes condiciones de referencia [0°C, V (0°C, 1,01325 bar)]. (b)PCS: poder calorífico del gas en el punto de medida medido en las condiciones de referencia (1,01325 bar y 273,15K). (c) Valor modificado por la Resolución del 21 d diciembre de 2012, de la Dirección General de Política Energética y Minas. Fuente: Resolución 22 de septiembre de 2011.

Pero a los gases procedentes de fuentes no convencionales, tales como el biogás, producido mediante procesos de digestión microbiana, tienen que cumplir además con las especificaciones de calidad de la Tabla 25.



Propiedad (se expresa en las siguientes condiciones de referencia [0°C, V (0°C, 1,01325 bar)])	Unidad	Mínimo	Máximo
CH ₄	mol %	95	-
CO	mol %	-	2
H ₂	mol %	-	5
Compuestos halogenados	mg/m ³	-	101
Flúor			
Cloro			
Amoníaco	mg/m ³	-	3
Mercurio	µg/m ³	-	1
Siloxanos	mg/m ³	-	10
Benceno, Tolueno, Xileno (BTX)	mg/m ³	-	500
Microorganismos	-	Técnicamente puro	
Polvo/Partículas	-	Técnicamente puro	

Tabla 25 Especificaciones de calidad del gas procedente de fuentes no convencionales introducido en el Sistema Gasista. Fuente: Resolución del 22 de septiembre de 2011.

Además en esta resolución se establecen los criterios generales para el procedimiento de análisis de la composición del gas. Adicionalmente a los requisitos establecidos para los instrumentos de medida en el ámbito del control metrológico, derivados de la Ley 3/1985 y de sus normativas de desarrollo, diariamente, el cromatógrafo llevará a cabo una calibración automática utilizándose para ello botellas de gas patrón elaboradas por suministradores acreditados para el análisis del gas natural según la norma ISO 17.025 (Evaluación de la conformidad. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración).

También se establece que los usuarios del Sistema Gasista que introduzcan gas serán los responsables de su calidad y del cumplimiento de las especificaciones recogidas en la Resolución 22 de septiembre de 2011. Aquellas empresas que inyecten gases procedentes de fuentes no convencionales, tales como el biogás, tienen que justificar, mediante certificación emitida por los organismos competentes correspondientes, que el gas aportado cumple las especificaciones establecidas en las Tabla 24 y Tabla 25, para su entrada en la red de transporte.



A lo anterior hay que añadir que para los gases procedentes de procesos como la digestión anaerobia, estará condicionada a la evaluación, por parte del usuario, del riesgo que los microorganismos y otros posibles componentes minoritarios de estos gases puedan representar para la salud de las personas o para la integridad de las instalaciones o aparatos de consumo.

Para poder introducir el biogás producido en la red de gas natural existente, será necesario conseguir los niveles de purificación establecidos. Para ello el biogás deberá de seguir el esquema marcado en la Ilustración 50.

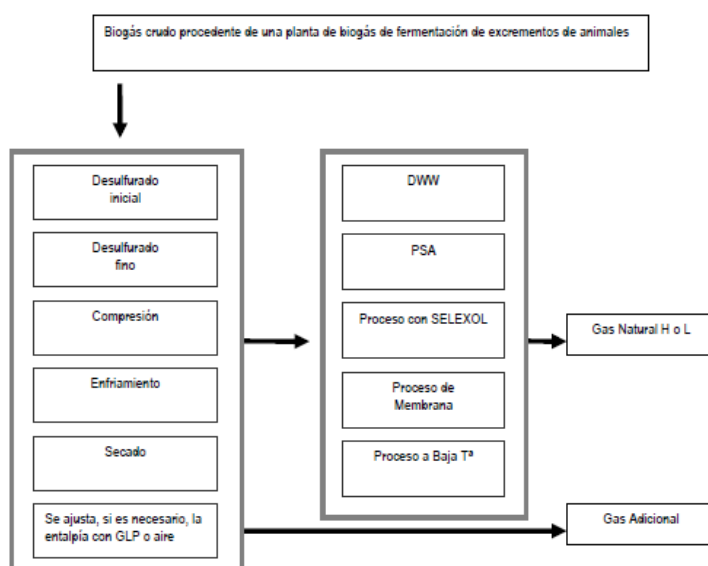


Ilustración 50 Procesos de purificación del biogás.

En un punto anterior se nombró de forma general la tecnología necesaria para la purificación de contaminantes, a continuación se identificarán aquellas que llevan un mayor tiempo en el mercado, y por tanto, presentan un mayor grado de madurez y están más relacionadas con este uso del biogás: Revisa coherencia del texto (puntos, comas, etc.). No entiendo este párrafo.

- Proceso con Selexol: se basa en solubilidades diferentes de metano y dióxido de carbono. Se realiza mediante un proceso de absorción y otro de regeneración. El selexol se emplea como absorbente, no es ni tóxico ni corrosivo y presenta una solubilidad más alta para el dióxido de carbono que la que tiene el agua.



- Proceso de separación con membranas: es un proceso que se realiza en seco o en húmedo. En el seco se hace pasar el biogás a través de una membrana selectiva para el dióxido de carbono, se necesitará aplicar una presión determinada. Mientras que el húmedo el dióxido de carbono se separará por efecto de su diferente solubilidad y velocidad de difusión a través de una membrana.
- Proceso criogénico: va a permitir la separación de dióxido de carbono en forma de líquido.
- PSA (pressure swing adsorption): se van a utilizar generalmente carbones activos, tamices moleculares (zeolitas) y tamices moleculares específicos para hidrocarburos. Este proceso se basa en la diferencia de comportamiento del dióxido de carbono, el metano y el agua en los adsorbentes. Antes de realizar este proceso se necesita una desulfuración para eliminar las trazas de azufre, pero no se va a necesitar un secado del biogás al final del proceso.
- Lavado con agua a presión: este proceso está basado en la solubilidad de los diferentes gases que componen el biogás en el agua. En la Tabla 26 se observan los valores de solubilidad de los diferentes componentes.

	Solubilidad en agua 1 bar P parcial (mmol/Kg.bar)	
	0°C	25°C
NH ₃	53.000	28.000
H ₂ S	205	102
CO ₂	75	34
CH ₄	2,45	1,32

Tabla 26 Solubilidad de componentes del biogás en agua. Fuente: PROBIOGÁS.



Ilustración 51 Ejemplo de proceso de acondicionamiento de biogás para ser inyectado en la red de gas natural.

5.4.3.3. Nuevos usos del biogás.

Se identificarán dos usos más novedosos del biogás producido: las pilas de combustible y el gas de síntesis.

Las Pilas de Combustible

Estas pilas son dispositivos en los que tiene lugar una reacción electroquímica entre un combustible y un compuesto oxidante obteniéndose electricidad.

La principal característica que presentan es que convierten directamente la energía química en energía eléctrica, lo que hace que se genere energía con alta eficiencia y menor impacto medioambiental, en comparación con otros procesos como los motores o turbinas convencionales.

Pueden funcionar con una gran variedad de combustibles y oxidantes, pero estos combustibles tienen que ser transformados en hidrógeno (H_2) antes de su entrada en la celda, para su posterior reacción con el oxígeno del aire y la consecuente producción de energía.

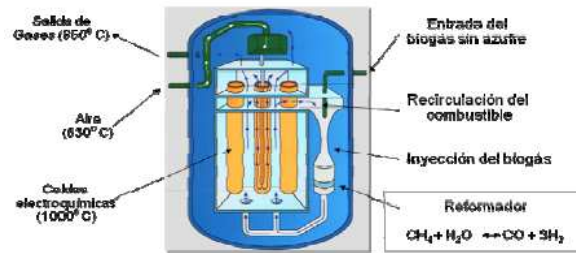


Ilustración 52 Principio de funcionamiento de una pila de combustible.

Gas de Síntesis

Éste es un gas de gran interés para la industria química y petroquímica, debido a que es la materia prima necesaria de muchas reacciones, que van desde la síntesis química de compuestos de alto valor añadido hasta la síntesis de combustibles sintéticos. Principalmente este proceso se lleva a cabo con gas natural, pero ya que el biogás contiene un alto porcentaje de metano, se puede proponer esta fuente de energía como materia prima alternativa.



6. CONCLUSIONES

En Andalucía y concretamente en la zona donde se realiza este estudio se concentra una cantidad de este residuo bastante elevada, lo que facilita mucho su utilización en este proceso, ya que el coste en transporte tanto para llevar los residuos hasta la planta como para luego la utilización del digestato como compost. Un aspecto interesante de este compost es que al utilizarlo como abono se cierran los diferentes ciclos de los elementos de la naturaleza (carbono, nitrógeno, fósforo) recuperándose la calidad del suelo.

En relación a la zona, desde un punto de vista climatológico no presenta unos inviernos muy fríos, son suaves, lo que facilita el proceso de digestión al no tener que emplear un porcentaje elevado de energía para mantener la temperatura del digestor.

En la actualidad, como se ha podido ver, en Europa se apuesta por la utilización de las energías renovables y en concreto por el proceso de digestión anaerobia a diferentes escalas (instalación de digestores en granjas, cooperativas, grandes plantas), lo que está facilitando el tratamiento de los residuos agrícolas y ganaderos (codigestión anaerobia). En España la actual legislación no promueve estos tipos de iniciativas, las plantas que se encuentran en funcionamiento están utilizando la energía generada para el autoconsumo de la instalación de digestión anaerobia y de instalaciones asociadas y, sólo se ha tenido información de un caso está introduciendo gas en el Sistema Gasista. Por tanto, es necesario un cambio en la legislación que sí apueste por estos procesos.

Desde un punto de vista empresarial, estas iniciativas aportan un valor añadido al producto, y para el caso de Almería es un punto interesante ya que los productos agrícolas producidos se reparten por toda Europa y este tipo de actuación es muy bien vista en estos mercados por los consumidores.

En relación al caso práctico en concreto que se plantea, la producción de biogás es inferior a la esperada, se han buscado plantas de tratamiento de únicamente residuos agrícolas y todo lo que se ha encontrado son plantas de codigestión de residuos de diferente procedencia (ganadero, lodos depuradora, procesos industriales...) lo que lleva a la idea de que para producir mayores cantidades de biogás será interesante el estudio de las mezclas resultantes de residuos de diferente naturaleza.

La instalación de este tipo de plantas también aporta un desarrollo tecnológico en la zona, consiguiéndose el desarrollo de nuevas tecnologías y empresas, y una diversificación de la actividad económica.



7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como futura línea de investigación se plantea la codigestión de residuos ganaderos, ya que en la zona también se presentaba, según datos de PROBIOGÁS un potencial desde el punto de vista ganadero. Así se establecerían sinergias entre diferentes sectores lo que ayudaría a la reducción de los numerosos residuos de la zona. En la Ilustración 53 se identifican este potencial.

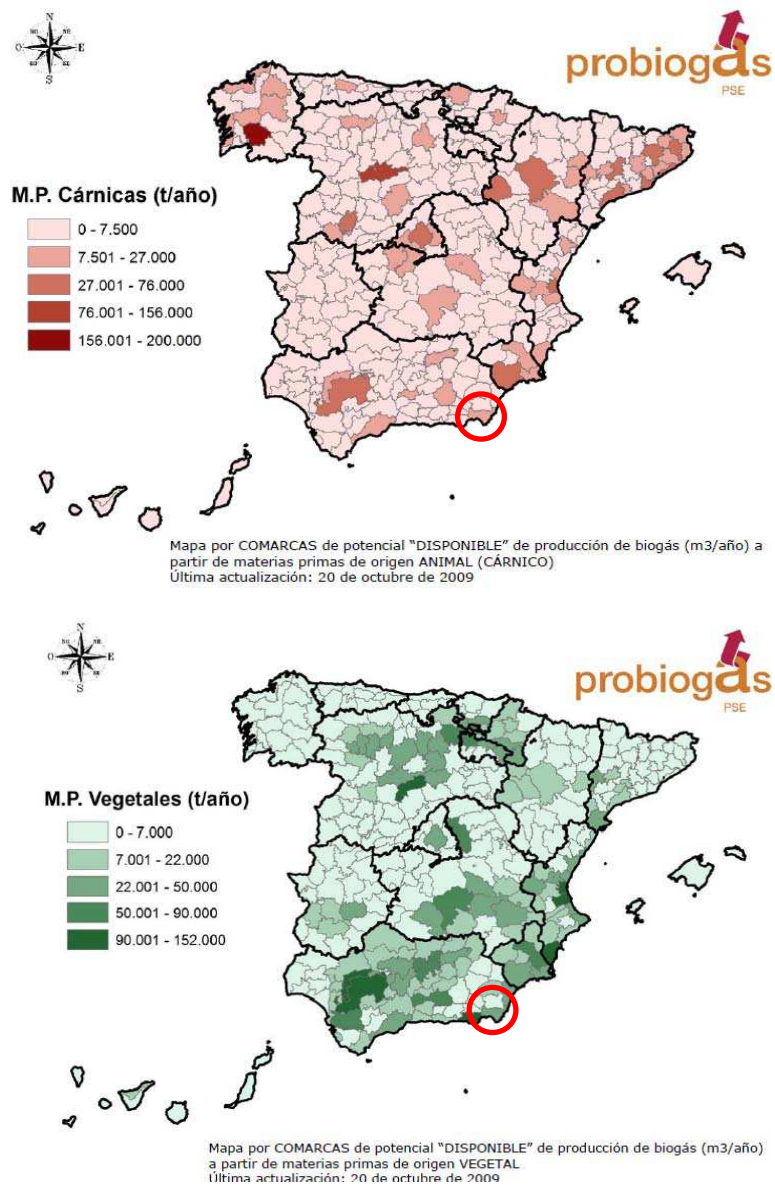


Ilustración 53 Potencial de materias primas cárnicas y vegetales según PROBIOGÁS.



8. BIBLIOGRAFÍA

- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía:
<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/>
- European Commission Eurostat:
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Main_Page
- EurObserv'Er « L'Observatoire des Energies Renouvelables»:
<http://www.eurobserv-er.org/>
- Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía:
<http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/>
- PROBIOGÁS: <http://www.probiogas.es/>
- AINIA Centro Tecnológico: www.ainia.es
- Cicloagro: <http://cicloagro.com/index.php?&actopc=25>
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
<http://www.ciemat.es/>
- Aragón investiga: <http://www.aragoninvestiga.org/>
- Cero residuos: <http://www.zeroresidues.eu/>
- Investigación y tecnología agroalimentarias: <http://www.irta.cat>
- Centro de estudios y experimentación obras públicas: <http://www.cedex.es/>
- Anaenergía UTS : <http://www.uts-biogas.com/>
- SENER Energías y procesos: <http://www.sener-power-process.com>
- MB Ingenierie: <http://www.asdconsultores.cl/gasometros.htm#>

REFERENCIAS

[1] Catálogo de Residuos de Andalucía. Aprobado por el Decreto 73/2012, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. 2013.

[2] Orden MAM/304/2002 de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos, y la lista europea de residuos. Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de España. 2002.



- [3] Valorización de los residuos generados en el procesado de aceites vegetales usados. Hidalgo-Barrio, D.; Gómez-Rincon, M.; Aguado-Pesquera, A.; Martín-Marroquín, J.M.; Sastre-García, E.. *ForesSciences/Scientia/Forestalis*. Volume 42, Issue 102, June 2014, Pages 279-288.
- [4] Oxidaciónn supercrítica para tratar lodos y residuos alimentarios. AINIA Centro Tecnológico. 2011.
- [5] Utilización de residuos sólidos de la industria de celulosa como materia prima para la fabricación de ladrillos. Use of solid waste from the pulp industry as raw material for the manufacture of bricks. Izidio, L.L.; Subtil, G.W.; De Andrade, A.A.. *O Papel* Volumen 75, Issue 1, January 2014, pages 50-52.
- [6] Estrategia Energética de Andalucía 2014-2020. Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo. 2014.
- [7] Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. Bruselas 2008.
- [8] Programa Estatal de Prevención de Residuos. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2013.
- [9] Ley 7/2007 de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental (GICA). Junta de Andalucía.
- [10] Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al reglamento del uso de energías procedentes de energías renovables y por la que se modifican y derogan las Directivas 2001/77/CEE y 2003/30/CEE.
- [11] Proyecto Europeo Green Gas Grids. <http://www.greengasgrids.eu>
- [12] Renewables Obligation Order. Regulación establecida en Reino Unido para promover la generación de electricidad a partir de energías renovables.
- [13] Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors. Souza M.E. (1992). *Water Science Technology*, vol.18, no.12, pp.55-69.
- [14] Anaerobic digestion of piggery wastes. Andreadakis A.D. (1992) *Wat. Sci. Tech.* vol.25 No.1 pp.9-16.



- [15] Anaerobic waste treatment fundamentals: I. Chemistry and microbiology; II. Environmental requirements and control; III. Toxic materials and their control; IV. Process Design. McCarty P. (1964) Public Works, nos. 9-12, Sept.-Dec.
- [16] Valorización energética de residuos ganaderos y bienestar animal. “La producción de biogás a partir de residuos ganaderos”. Andrés Pascual. AINIA Centro Tecnológico. COITAV. 2010.
- [17] Nuevo pretratamiento biológico para la gestión de residuos sólidos urbanos. Oferta Tecnológica, Científica y Humanística. Universidad de Cádiz.
- [18] Effect of particle size on biogas generation from biomass residues. Sudhir K. Sharma, I. M. Mishra, M. P. Sharma a & J. S. Saini. 1988.
- [19] Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. H. Bouallagui, R. Ben Cheikh, L. Marouani, M. Hamdi. Bioresource Technology 86 (2003) 85–89. Elsevier Science.
- [20] Estudio básico del biogás. Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de Economía, Innovación y Ciencias. Junta de Andalucía. 2011.
- [21] Evaluación de un sistema de digestión anaerobia para la estabilización de lodos provenientes de las aguas residuales. Gustavo Adolfo Cubero Madriz. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2011.
- [22] La agricultura intensiva del poniente almeriense. Diagnóstico e instrumentos de gestión ambiental TOLÓN A., LASTRA X. Revista electrónica de Medioambiente 2010.
- [23] Estudios de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. Capítulo 2. Motores de Cogeneración. PROBIOGÁS. 2010.
- [24] Producción de biogás por digestión anaerobia. Colección de cuadernos prácticos nº1. Instituto Catalán de la Energía. 2008.



9. ANEXOS

País	2010			Total	2011			
	Vertederos	Depuradoras (a)	Otras Fuentes (b)		Vertederos	Depuradoras	Otras Fuentes	Total
Alemania	232,5	402,6	6.034,5	6.669,6	149,0	504,2	4.414,2	5.067,4
Reino Unido	1.492,6	258,0	0,0	1.750,6	1.482,4	282,4	0,0	1.764,8
Italia	349,6	8,1	149,8	507,5	755,6	16,2	323,9	1.095,7
Francia	236,7	44,1	53,2	334,0	249,7	41,9	58,0	349,6
Holanda	36,7	50,2	206,5	293,4	31,5	51,5	208,3	291,3
República Checa	29,5	35,9	111,3	176,7	31,8	38,8	179,9	250,5
España	119,6	12,4	66,7	198,7	148,1	15,3	82,6	246,0
Austria	5,1	22,3	144,2	171,6	4,3	16,4	138,8	159,5
Polonia	43,3	63,3	8,0	114,6	47,5	67,8	20,1	135,4
Bélgica	41,9	14,6	70,9	127,4	41,9	14,6	70,9	127,4
Suiza	35,7	60,7	14,8	111,2	12,4	68,9	37,9	119,2
Dinamarca	8,1	20,1	74,0	102,2	5,2	19,6	73,2	98,0
Grecia	51,7	15,0	1,0	67,7	55,4	16,1	1,4	72,9
Irlanda	44,2	9,6	4,6	58,4	43,8	8,2	5,6	57,6
Eslovaquia	0,8	9,5	1,8	12,1	3,0	13,6	29,3	45,9
Portugal	28,2	1,7	0,8	30,7	42,3	1,8	0,9	45,0
Finlandia	22,7	13,2	4,5	40,4	23,9	13,4	4,8	42,1
Eslovenia	7,7	2,8	19,9	30,4	7,1	2,7	26,2	36,0
Hungría	2,6	12,3	19,3	34,2	7,3	6,4	15,5	29,2
Letonia	7,9	3,3	2,2	13,4	7,8	2,4	11,8	22,0
Luxemburgo	0,1	1,2	11,7	13,0	0,1	1,4	11,3	12,8
Lituania	2,0	3,0	5,0	10,0	5,9	3,1	2,1	11,1
Estonia	2,7	1,1	0,0	3,8	2,2	1,1	0,0	3,3
Rumanía	0,0	0,0	3,0	3,0	0,0	0,0	3,0	3,0
Chipre	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0
Unión Europea	2.801,7	1.065,0	7.008,8	10.875,5	3.157,9	1.208,0	5.719,3	10.085,2

Tabla 27 Estimación de la producción de calor a partir de biogás en la Unión Europea en 2010 y 2011 (ktep) en el sector de la transformación. (a): depuradoras urbanas e industriales. (b): unidades descentralizadas de biogás agrícola, digestores anaerobios de desechos urbanos y unidades centralizadas de codigestión Fuente: EurObserv'ER 2012.

País	<u>2010</u>			<u>2011</u>		
	Unidades de calor	A través de la Cogeneración	Total	Unidades de calor	A través de la cogeneración	Total
Alemania	13,6	22,4	36	28,8	29,2	58
Italia	0,2	24,3	24,5	0	29,7	29,7
Dinamarca	3,5	24,1	27,6	3,9	25	28,9
Polonia	0,3	17,6	17,9	0	14,9	14,9
Suiza	9,5	8	17,5	7,5	7,3	14,8
Austria	7,5	4,8	12,3	5,1	5,3	10,4
Finlandia	7,4	0,9	8,3	7,6	1	8,6
Bélgica	0	6,5	6,5	0	6,9	6,9
República Checa	1,2	4,9	6,1	1,7	5,5	7,2
Holanda	0	6,7	6,7	0	6	6
Eslovenia	0	4,6	4,6	0	5,5	5,5
Letonia	0	1,2	1,2	0	4	4
Eslovaquia	0,7	1	1,7	0,4	3,3	3,7
Estonia	0,1	1,5	1,6	0,1	1,3	1,4
Luxemburgo	0	0,8	0,8	0	0,9	0,9
Lituania	0	0,4	0,4	0	0,6	0,6
Unión Europea (27 países)	44,1	129,8	173,9	55,1	146,4	201,5

Tabla 28 Estimación de la producción bruta de electricidad a partir de biogás en la Unión Europea en 2010 y 2011 (GWh). Fuente: EurObserv'ER 2012

PROYECTO FIN DE MÁSTER:



**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS
AGRÍCOLAS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Autora: Ana María González Cabrera

Director: D. Benito Navarrete Rubia

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

DPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE SEVILLA







Índice

1. Estado del arte.....	4
1.1. Generación de residuos.....	6
1.2. Situación actual de la digestión anaerobia.....	14
2. Objetivos del proyecto.....	20
3. La digestión anaerobia.....	22
3.1 Aspectos generales.....	22
3.2 Etapas.....	25
3.3 Estabilidad.....	27
3.4 Parámetros condicionantes.....	29
4. Características técnicas de una instalación de digestión anaerobia.....	37
4.1. Instalación.....	37
4.2. Pretratamiento.....	44
4.3. Digestores anaerobios.....	48
4.4 Análisis económico para plantas de digestión anaerobia.....	57
5. Caso práctico: digestión anaerobia de residuos procedentes de la agricultura intensiva.....	62
5.1. Características de los residuos.....	62
5.2. Análisis técnico de la instalación.....	66
5.3. Análisis económico de la instalación.....	72
5.4. Uso alternativos del biogás producido.....	73
6. Conclusiones.....	92
7. Futuras líneas de investigación.....	93
8. Bibliografía.....	94
9. Anexos.....	97