



Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales

Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO)

Resumen

El presente artículo aborda los principales aspectos de la producción de biogás agroindustrial: características técnicas de los residuos/subproductos agroindustriales, ventajas de la co-digestión, características básicas de los sistemas de co-digestión y uso del digestato. Posteriormente, se incluye como ejemplo, la descripción de la planta de biogás de la Granja San Ramón, ubicada en la Comunidad Valenciana.

1. Introducción

En muchos casos, la valorización energética es una alternativa necesaria para optimizar la explotación de los residuos/subproductos agroalimentarios. Además, el interés por convertir dichos materiales en fuente de energía renovable ha aumentado notablemente en los últimos años ante la subida del precio del barril de petróleo y las perspectivas de futuro a este respecto.

Existen una gran variedad de técnicas de valorización energética que son aplicables en función del tipo de residuo o subproducto a valorizar. Se clasifican en métodos termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), métodos químicos (producción de biodiesel mediante transesterificación), y métodos bioquímicos (producción de bioetanol mediante fermentación alcohólica y producción de biogás a través de la fermentación o digestión anaerobia).

Los métodos termoquímicos suelen requerir sustratos de poca humedad, lo que restringe su uso en muchas ocasiones, ya que los subproductos de la industria agroalimentaria suelen presentar un elevado contenido en agua. La producción de biodiesel exige un tipo de residuos muy concreto, con alto contenido en grasas y cierto grado de pureza. Para producir bioetanol también se precisa un tipo concreto de residuos (elevado contenido en hidratos de carbono, almidón, etc.) con bajo contenido en impurezas.

A diferencia de las alternativas mencionadas anteriormente, la producción de biogás de origen agroalimentario o agroindustrial admite residuos de elevada humedad y de muy distinta composición y procedencia.

Al proceso microbiológico que posibilita la producción de biogás se le denomina digestión o fermentación anaerobia. Durante dicho proceso, el cual se desarrolla en ausencia de oxígeno, la materia orgánica biodegradable se descompone por acción de diferentes grupos de microorganismos desde sus formas más complejas (carbohidratos, proteínas, lípidos, etc.), hasta otras formas más sencillas, generándose así el biogás.

El biogás es un gas compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, que se obtiene como resultado de la digestión anaerobia de sustratos orgánicos tanto por vía líquida como seca. El biogás puede ser aprovechado como combustible, ya que su poder calorífico oscila entre 5.000 y 6.000 kcal/m³ en función del contenido en metano. La composición media del biogás se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición media del biogás

Componente	
Metano (CH ₄)	50-80 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	20-50%
Otros gases (H ₂ , H ₂ O, NH ₃)	1-5%
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	100 - 4.000 ppm

2. Características técnicas de los residuos agroindustriales para su uso en co-digestión anaerobia.

A continuación se describen las principales características técnicas a tener en cuenta en un residuo o mezcla de residuos para su valorización energética en forma de biogás:

- **Sólidos Totales / Humedad**

La materia seca o sólidos totales (ST) de los residuos agroindustriales puede ser muy variable. Algunos como el lactosuero o los purines de porcino pueden tener un contenido inferior al 10% de ST mientras que otros superan el 20% (Tabla 3). El agua contenida en los residuos no produce biogás y por tanto ocupa un volumen no aprovechado en el digestor. Sin embargo, resulta imprescindible para que el proceso fermentativo se desarrolle adecuadamente a nivel microbiológico. Así pues, debe alcanzarse un equilibrio entre la productividad de biogás asociada al aporte de sólidos y la humedad necesaria para la digestión. La digestión de residuos agroindustriales se realiza habitualmente por debajo del 15% de ST (vía húmeda). Por otro lado, los residuos con un alto contenido en sólidos pueden crear problemas de bombeo, agitación, sedimentación o costras, entre otros, en el digestor. Por ello los sistemas de incorporación al digestor, los mecanismos de agitación o los de eliminación de sedimentos, deben ser diseñados adecuadamente.

- **Sólidos Volátiles / Biodegradabilidad**

El porcentaje de sólidos volátiles respecto al de sólidos totales (% de sólidos volátiles o SV) suele variar entre el 70-95%. Los residuos que tienen un porcentaje inferior al 60% no suelen considerarse buenos sustratos para la digestión anaerobia. Una buena biodegradabilidad es clave para obtener un alto rendimiento de biogás. La Tabla 2 muestra la biodegradabilidad de los principales componentes presentes en los residuos agroindustriales disponibles para producir biogás.

Tabla 2. *Biodegradabilidad anaerobia de los principales componentes de los residuos agroindustriales.*

Componente	Presente en	Biodegradabilidad anaerobia
Azúcares	Remolacha o caña de azúcar. Subproductos de industria azucarera o fábrica de golosinas, etc.	Excelente
Almidón	Excedentes de cereales, patatas, subproductos de fábricas de snacks o de almidones, etc.	Excelente
Celulosa	Paja triturada, hierba, pulpas y pieles de frutas y verduras, etc.	Buena
Proteínas	Subproductos animales, productos cárnicos, lácteos, o de la pesca, etc.	Excelente
Grasas	Subproductos de origen animal o vegetal	Buena ¹⁾
Pesticidas, antibióticos, detergentes	Restos de producción vegetal, estiércol y purines, subproductos de la industria farmacéutica.	Regular
Sales.	Salmueras o residuos salinos.	No biodegradable
Arena, piedras	Estiércol, purines, restos vegetales, etc.	No biodegradable
Metales	Residuos de envases.	No biodegradable
Plásticos	Residuos de envases.	No biodegradable

¹⁾ Requiere mayores tiempos de retención.

- **Balance C/N**

La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) de un residuo, o mezcla de residuos, tiene una gran importancia para el proceso fermentativo. Esta relación puede variar entre 6 (ej. deyecciones ganaderas) y más de 500 (ej. madera). Para una degradación óptima se recomienda un ratio 20-25. En la Tabla 3 se muestran ratios representativos para varios residuos agroindustriales.

- **Potencial máximo de producción de biogás y producción real.**

Cada residuo orgánico tiene asociado un potencial máximo de producción de biogás, existiendo diferencias importantes según su composición y grado de biodegradabilidad. El potencial máximo se determina experimentalmente mediante un ensayo discontinuo (o *batch*) a escala de laboratorio en el que el residuo se biodegrada completamente en condiciones anaerobias controladas. El potencial máximo puede variar desde 0,15 hasta 0,90 m³ de biogás/kg SV. Los residuos ricos en grasas son los que proporcionan altos rendimientos en biogás pero requieren elevados tiempos de retención.

Pero la producción real de biogás de un residuo, o mezcla de residuos, a escala industrial, no solo depende de este potencial máximo, sino también de otros factores como la temperatura, presencia de materiales no deseables y/o sustancias

inhibidoras, y sobre todo, del **tiempo de retención**. El tiempo de retención indica el tiempo medio en el que la mezcla de residuos incorporada al digester permanece en su interior sometida a la digestión anaerobia. Se calcula dividiendo el volumen del digester entre el caudal de alimentación.

Por ejemplo, los sustratos de un digester de 2.000 m³ alimentado con un caudal de 80 m³/día tienen un tiempo de retención de 25 días. A escala industrial los tiempos de retención se ajustan para aprovechar los picos de producción de biogás, lo que sucede generalmente con porcentajes de eliminación de sólidos volátiles entre el 40 y el 60%. El tiempo de residencia alcanza un valor óptimo en función de criterios técnicos y económicos.

- **Materiales no deseables.**

Los materiales no deseables pueden crear problemas de separación de fases por su sedimentación o flotación, espumas, etc. Se trata de materiales que suelen acompañar al residuo desde su origen: paja entera, arena, piedras, cristal, metales, materiales plásticos, etc. Una vez introducidos en el digester son difíciles de retirar por lo que es importante separarlos antes.

- **Sustancias inhibidoras**

Las sustancias inhibidoras son compuestos que bien están presentes en el residuo antes de su digestión o bien se forman durante el proceso de digestión anaerobia. Estas sustancias reducen el rendimiento de la digestión e incluso pueden llegar a causar la desestabilización completa del proceso fermentativo. Por ejemplo, la rápida descomposición de moléculas de gran tamaño como los carbohidratos y las grasas características de los residuos agroindustriales incrementa la concentración de ácidos grasos volátiles (AGVs). A determinados niveles los AGVs generan serios problemas de inhibición. Otros problemas de inhibición son los causados por el amonio (ej. digestión de gallinaza), el ácido sulfhídrico, o los ácidos grasos de cadena larga. Los pesticidas, desinfectantes o antibióticos presentes en algunos residuos también pueden llegar a afectar el proceso según su concentración.



Tabla 3. Características y producción de biogás de algunos residuos orgánicos agroindustriales

Residuo	Sólidos Totales ST [%]	Sólidos Volátiles [% de ST]	C:N [-]	Producción Biogás ³⁾ [m ³ . Kg ⁻¹ SV]	Tiempo de retención [días]	CH ₄ [%]	Sustancias NO deseables	Sustancias inhibitoras	Problemas frecuentes
Purín de cerdo	3-8 ¹⁾	70-80	3-10	0,25-0,50	20-40	70-80	virutas de madera, cerdas, arena, cuerdas	antibióticos, desinfectantes	espumas, sedimentos
Estiércol	5-12 ¹⁾	75-85	6-20 ²⁾	0,20-0,30	20-30	55-75	cerdas, tierra, paja, madera	antibióticos, desinfectantes	espumas
Gallinaza	10-30 ¹⁾	70-80	3-10	0,35-0,60	>30	60-80	pedras, arena, plumas,	NH ₄ ⁺ , antibióticos, desinfectantes	inhibición por NH ₄ ⁺ , espumas
Residuos de frutas	15-20	75	35	0,25-0,50	8-20	ND	partes poco biodegradables	AGV, pesticidas	acidificación
Restos de alimentos	10	80	ND	0,50-0,60	10-20	70-80	huesos, metales, plásticos	AGV, desinfectantes	acidificación sedimentos, mecánicos
Lactosuero	1-5	80-95	ND	0,80-0,95	3-10	60-80	impurezas	-	acidificación
Vinazas	1-5	80-95	4-10	0,35-0,55	3-10	55-75	partículas poco biodegradables	AGV	acidificación
Hojas	80	90	30-80	0,10-0,30 ⁴⁾	8-20	ND	tierra	pesticidas	-
Paja	70	90	90	0,35-0,45 ⁵⁾	10-50 ⁵⁾	ND	arena	-	espumas biodegradabilidad
Madera	60-70	99	723	ND	∞	ND	NO UTILIZAR	-	biodegradabilidad
Jardinería	60-70	90	100-150	0,20-0,50	8-30	ND	tierra, restos poco biodegradables	pesticidas	biodegradabilidad
Hierba	20-25	90	12-25	0,55	10	ND	pedras, arena, tierra	pesticidas	acidificación

¹Según dilución; ²Según presencia de paja; ³Según tiempo de retención; ⁴Según secado; ⁵Según picado
ND: no disponible.

Fuente: Adaptado de Steffen, R., et al. (1998)

3. Ventajas de la co-digestión anaerobia.

El tratamiento de dos o más residuos mediante digestión anaerobia se denomina co-digestión anaerobia. Frente a procesos de digestión que emplean un solo sustrato este planteamiento cuenta con importantes ventajas técnicas, medioambientales y económicas que se describen a continuación.

La co-digestión anaerobia permite **aprovechar la complementariedad de la composición de los residuos**. El mejor ejemplo es la co-digestión de deyecciones ganaderas y residuos alimentarios. Los residuos ganaderos tienen una reducida concentración de materia orgánica y una baja relación C/N, pero cuentan con una concentración elevada de micro y macronutrientes (básicos para el crecimiento de microorganismos anaerobios) así como capacidad tampón (alcalinidad) fundamental para evitar procesos de acidificación. Los residuos alimentarios ricos en carbohidratos, proteínas y grasas suelen tener una alta proporción de materia orgánica biodegradable y una alta relación C/N, pero su digestión anaerobia se ve afectada negativamente por la ausencia de micronutrientes y también por problemas de acidificación. Así pues, la mezcla de ambos tipos de residuos da lugar a **procesos más estables y con un incremento considerable de la producción de biogás**. Por ejemplo, la producción de 10-20 m³ biogás/t en una digestión anaerobia mono-sustrato con deyecciones ganaderas se podría duplicar incorporando un 20-30% de residuos alimentarios.

La co-digestión permite **integrar la valorización de los residuos orgánicos de una zona geográfica determinada**. De este modo conseguimos obtener por un lado una fuente de energía de carácter renovable en forma de biogás, y por otro un subproducto resultante de la digestión denominado digestato con características de fertilizante orgánico y aplicable en agricultura bajo condiciones controladas. Se trata por tanto de un **reciclaje integral** que reduce el impacto ambiental de estos residuos (contaminación suelo, agua, olores, etc.). No obstante, hay que recordar que la digestión anaerobia no reduce significativamente la concentración de nitrógeno o de fósforo por lo que es fundamental realizar en todos los casos un balance de nutrientes antes de la aplicación del digestato al campo. En caso de haber zonas vulnerables es imprescindible acudir a técnicas de reducción o recuperación de estos nutrientes.

A nivel económico, el incremento en la producción de biogás se traduce en **mayores ingresos** por la venta de la electricidad y/o uso del calor producido. Además, la gestión de algunos residuos empleados como co-sustratos puede generar también ingresos. Por otro lado, el hecho de integrar en una sola instalación el tratamiento de todos los residuos de una zona permite **ahorrar costes de inversión y operación** si lo comparamos con el tratamiento por separado de cada uno de los residuos gestionados.

4. Características básicas de los sistemas de co-digestión anaerobia de residuos agroindustriales.

Los sistemas de digestión anaerobia empleados habitualmente para la co-digestión de residuos agroindustriales son los **reactores de mezcla completa**, también denominados en inglés *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR). También se

emplean aunque de forma menos frecuente los digestores de tipo horizontal denominados tipo flujo-pistón o **plug-flow**.

En general, la alimentación del digestor con material fresco se realiza de forma continua o periódica (ej. diaria). En función del tipo de residuo y su estado puede ser necesario llevar a cabo un **pretratamiento**. Los pretratamientos más frecuentes son la separación de materiales no biodegradables, la trituración del residuo o tratamientos térmicos (ej. pasterización de residuos cárnicos o restos de catering), entre otros.

Como ya se indicó anteriormente, los digestores de residuos agroindustriales suelen trabajar por **vía húmeda**, es decir, con un porcentaje de sólidos inferior al 15%. En los digestores verticales agitados de mezcla completa, la concentración óptima de sólidos totales suele estar en el rango del 6-10%. En estos digestores, la concentración de sólidos y microorganismos es similar durante todo el proceso. Ello se consigue generalmente gracias a una **agitación** continua a través de hélices o palas. En procesos que trabajan a una baja concentración de sólidos existen también en el mercado sistemas de agitación neumáticos por recirculación del biogás producido. El digestor horizontal o flujo-pistón permite trabajar con concentraciones de sólidos algo mayores, por encima del 10%. En ocasiones este último tipo de digestor se instala justo antes del digestor vertical de mezcla completa.

La mayoría de digestores agroindustriales trabajan la digestión con temperaturas en **rango mesofílico**, es decir, en el entorno de los 35°C. La alternativa es el rango termofílico, alrededor de los 55°C. Esta última tiene ventajas y desventajas. Por un lado se consiguen rendimientos mayores y tasas de destrucción de patógenos superiores, pero por otro lado, el proceso fermentativo es más sensible y puede sufrir más desequilibrios por procesos de inhibición.

5. Uso del digestato

Tan importante como maximizar el rendimiento en biogás es obtener un digestato que tenga un valor potencial y pueda ser aprovechable en el marco del sistema objeto de estudio. Hay que recordar que este subproducto es similar en volumen al ocupado por los residuos de partida, aunque también cabe destacar que presenta ventajas significativas.

El digestato tiene una composición homogénea, tanto más cuanto mayor sea el tiempo de retención dentro del digestor. Además, gracias a las transformaciones que suceden durante la digestión anaerobia, no presenta olor desagradable ni emite compuestos orgánicos volátiles. Por lo tanto, el proceso consigue una cierta estabilización de los residuos que, como se expuso anteriormente, tienen en la emisión de olores uno de sus impactos negativos más notables.

Por otro lado, algunas sustancias que inhiben los procesos de compostaje (polifenoles y otras sustancias) son reducidas durante la digestión anaerobia lo cual facilita la obtención de productos para uso agrícola.

En cuanto al valor agronómico del digestato, es importante destacar que el contenido en nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) del sustrato se mantiene estable en el digestato tras la digestión. Existe un margen de innovación para el enriquecimiento en nutrientes del digestato y adaptación a distintos cultivos tanto en fase líquida como sólida.

6. Ejemplo de planta de biogás en el ámbito agrícola en la Comunidad Valenciana

El **proyecto de la Planta de biogás de la Granja San Ramón** (Campo Arcís, Requena) se caracteriza por la utilización de deyecciones ganaderas (estiércol de vacuno) y otros materiales orgánicos de origen vegetal.

La Granja San Ramón (GSR) dispone de unas instalaciones ganaderas dedicadas a la explotación de ganado vacuno lechero y el entorno agrícola en el cual se ubica está caracterizado por la presencia de viñedo, almendro y olivar.

Como parte del personal técnico al cargo de la explotación y de la planta de biogás se encuentran diferentes perfiles profesionales, entre los que se incluye una Ingeniero Técnico Agrícola (titulación actualmente adaptada como Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural).

Por otra parte, a nivel de producción de deyecciones ganaderas, esta explotación produce alrededor de 35.000 toneladas de estiércol al año, que son co-digeridas con otros sustratos de origen vegetal.



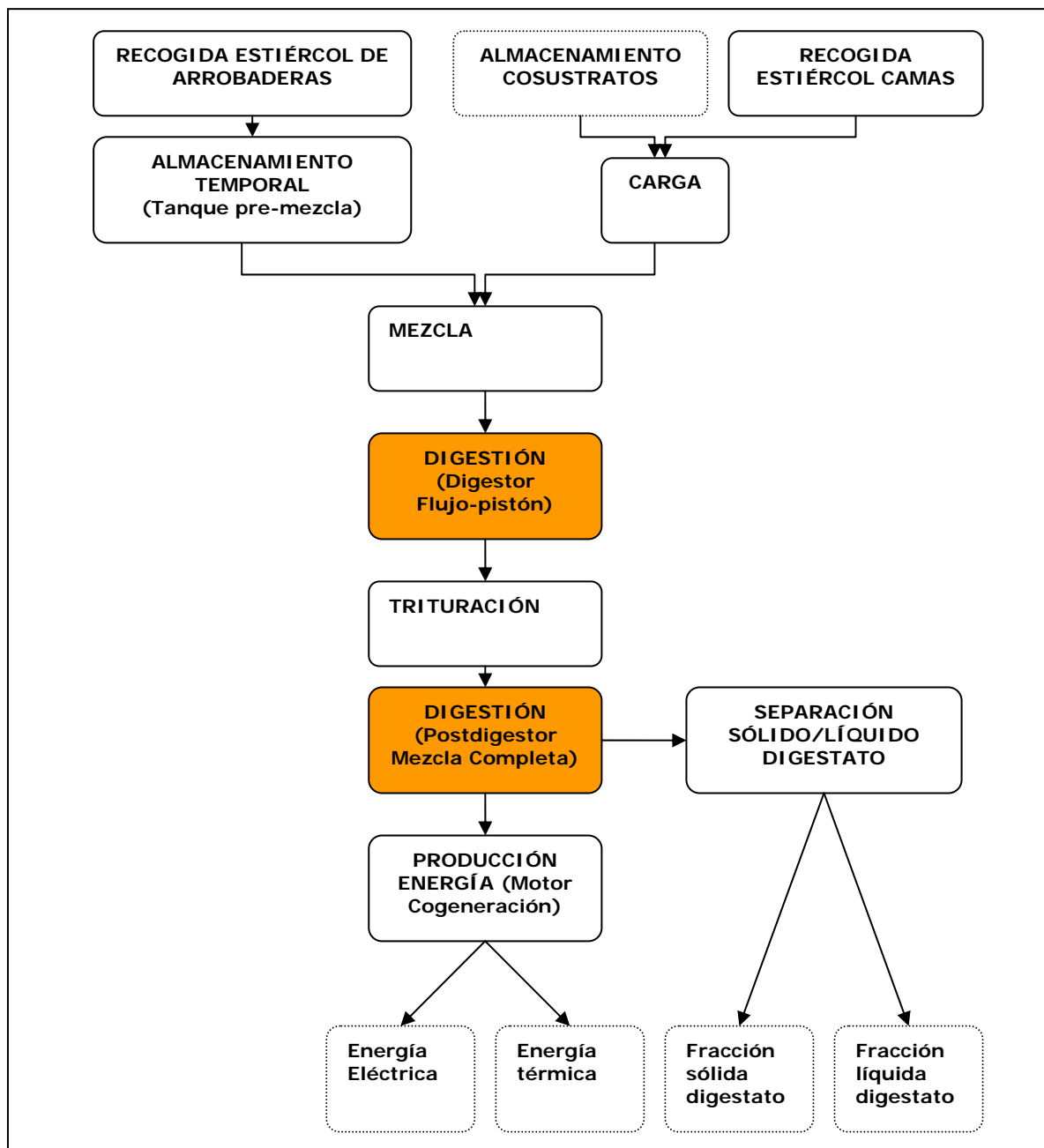
Foto 1. Vista general de la Explotación ganadera de la GSR (izq.) y detalle de los alojamientos de ganado vacuno en producción (dcha.)

En el caso de GSR, el proceso de la digestión anaerobia se realiza en dos digestores, el primero es de tipo flujo-pistón y el segundo de tipo mezcla completa, este último dispone de gasómetro de doble membrana para almacenar el biogás producido.

Descripción general del proceso e instalaciones

En el siguiente diagrama se presentan de forma resumida las etapas del proceso de producción de biogás en la planta de biogás de la GSR.

Figura 1. Diagrama de flujo de la planta de biogás de la Granja San Ramón



Los principales componentes de la planta de biogás de la Granja San Ramón se describen a continuación:

- Cargador de la planta
Mediante un cargador de 45 m³ se realiza la carga del fermentador flujo-pistón. Antes de la entrada a este fermentador tiene lugar una mezcla del estiércol con parte de la materia que se recircula desde la salida del post-digestor cilíndrico.
- Digestor flujo-pistón
Tiene una capacidad de 800 m³, está construido a base de hormigón armado y dispone de agitación mediante palas. La salida del fermentador flujo-pistón está conectada a un post-digestor.
- Post-digestor tipo mezcla completa
Tiene una capacidad de 2.200 m³, está construido a base de hormigón armado y dispone de agitación mediante hélices. Este digestor está equipado con un gasómetro de doble membrana para la recogida del biogás.
- Balsa
La fracción líquida del digestato se lleva desde un separador sólido/líquido (tornillo prensa) situado a la salida del post-digestor, a una balsa de la explotación. La fracción sólida del digestato se almacena en una plataforma dentro de una nave.
- Motor de cogeneración (CHP)
El biogás de la digestión se desulfuriza biológicamente en el post-digestor. Posteriormente tiene lugar una condensación del biogás mediante enfriamiento, y finalmente, se aprovecha en una unidad de cogeneración (CHP).

En relación con el **proceso de digestión anaerobia**, las principales características del proceso aplicado en la planta de biogás de la GSR son:

- Digestión por vía húmeda: la mezcla con la que se alimenta a la planta contiene un porcentaje de sólidos inferior al 20%
- Digestión en rango mesofílico: la temperatura en la que se desarrolla el proceso se sitúa en torno a los 35 °C

Aprovechamiento energético del biogás y uso del digestato

En el caso de esta planta, el biogás se lleva a un motor de **co-generación** donde se emplea como combustible (motor a gas de mezcla pobre, *ciclo Otto*), ubicado próximo al postdigestor, y que permite la generación de energía eléctrica y energía térmica.

En los motores de *ciclo Otto*, una chispa eléctrica produce la ignición de una mezcla de combustible y aire introducida en el cilindro del motor. El combustible y el aire son mezclados antes de introducirse en el cilindro y la mezcla se comprime en el cilindro antes de la ignición. La eficiencia energética de los motores Otto que utilizan gas como combustible se encuentra normalmente en el rango de 40-50%. En el caso del motor de la unidad de co-generación de la GSR, el rendimiento eléctrico del motor es de un 40,4% y la potencia instalada es de 500 kW.

Respecto al uso del digestato, tanto la fracción líquida como la sólida, son aprovechadas como enmiendas orgánicas en parcelas agrícolas cercanas.

7. Referencias

- *BIOEXELL - Training manual on anaerobic digestion* [en línea]. Esbjerg (Dinamarca): Teodorita Al Seadi, University of Southern Denmark, 2001. *Project deliverable of BIOEXELL – European Biogas Centre of Excellence* <http://web.sdu.dk/bio/Bioexell/Down/Bioexell_manual.pdf>. [Consulta:Febrero 2011]
- *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Biomasa: Digestores anaerobios* [en línea]. Madrid: IDAE, Octubre 2007. <http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf>. [Consulta: Febrero 2011]
- *An introduction to anaerobic digestion of organic waste* [en línea]. Remade Scotland: Fabien Monnet, 2003. <http://www.biogasmax.eu/media/introanaerobicdigestion__073323000_1011_24042007.pdf>. [Consulta:Febrero 2011]
- Steffen, R., Szolar, O., Braun, R., 1998. *Feedstocks for anaerobic digestion*. Institute of Agrobiotechnology Tulin, University of Agricultural Sciences, Vienna (1998).