

# 1. Introducción

---

## 1.1. Motivación y objetivos del estudio.

En la actualidad, el desarrollo de nuevos modelos energéticos no dependientes de fuentes no renovables, es un reto importante para nuestra sociedad. El presente trabajo estudia uno de estos modelos a pequeña escala capaz de suplir las necesidades energéticas de un municipio, con sus propios recursos locales. A partir de los residuos ganaderos de sus granjas y de plantaciones energéticas cultivadas por sus habitantes mediante plantas de producción de biogás son capaces de generar calor y electricidad para autoabastecimiento propio.

Además, un modelo energético basado en combustibles fósiles, fundamentalmente petróleo, carbón y gas natural, presenta tres inconvenientes principales.

En primer lugar, al basarse en energías no renovables las reservas en un futuro no están garantizadas. Esto está produciendo la actual crisis del petróleo con el aumento de los precios y los conflictos económicos y sociales, los cuales se pueden agravar con el continuo aumento del consumo.

En segundo lugar, la dependencia a estos combustibles fósiles que, en la mayoría de ocasiones, deben ser importados desde otros países haciéndonos más vulnerables ante posibles conflictos entre los países productores y consumidores. En el caso de España el 80% de la energía que consumimos es importada, así como el 100% del petróleo que utilizamos (EUROSTAT, 2008). Por lo que deberíamos considerar una necesidad para asegurar el suministro energético futuro, más que una obligación, el desarrollo y la implantación generalizada y eficaz de fuentes energéticas locales y renovables.

El tercer inconveniente, que no el menos importante, es el impacto ambiental que está generando en la Tierra el uso indiscriminado de combustibles fósiles y derivados, produciendo el calentamiento global del planeta, del cual estamos sufriendo las primeras consecuencias.

Aunque en la actualidad estamos en un momento clave para el fomento y aplicación de las energías renovables, fue en los años 70 del pasado siglo cuando tras la repentina

crisis del petróleo (1973 y 1979) y las primeras señales del calentamiento global, que urgían a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, comenzó la investigación encaminada al estudio de nuevas fuentes alternativas para la producción de energía a gran escala. Estas se basan en fuentes inagotables como la luz y el calor procedente del sol (energía de la biomasa y solar), las olas, el viento o la fuerza hidráulica.

Las razones anteriormente citadas junto con la estancia en un programa de prácticas internacionales en la región alemana de Göttingen han motivado el presente trabajo fin de carrera. Durante el periodo de prácticas tuve la oportunidad de conocer los denominados pueblos bioenergéticos, en los que mediante la construcción de plantas de biogás agrícolas a pequeña escala y consumiendo materias primas locales se produce electricidad y calor. Dichos proyectos son posibles no solo gracias al apoyo gubernamental, si no que tienen un fuerte respaldo social de los agricultores, granjeros y vecinos de la zona.

Por consiguiente, el principal objetivo de este estudio es caracterizar el funcionamiento de una planta de biogás a pequeña escala. Con el fin de alcanzar este objetivo, el estudio comprende varios objetivos específicos:

- Estudio del funcionamiento de cuatro plantas de co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y cultivos energéticos ensilados.
- Estudio de las materias primas utilizadas anual y diariamente en cada planta y la cantidad de biogás producido.
- Determinación del calor y la electricidad obtenida mediante cogeneración en relación a la materia prima utilizada.
- Examinar la estabilidad del proceso mediante monitorización y control de parámetros ambientales y operacionales de cada planta del estudio.

## 1.2. La biomasa como recurso energético.

La directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo define “**biomasa**” como la fracción biodegradable de productos, basuras o residuos de origen biológico proveniente de la agricultura (incluyendo sustancias animales y vegetales), silvicultura e industria relacionada, incluyendo pesca y acuicultura, así como la fracción biodegradable de la industria y los residuos municipales.

La biomasa ha sido utilizada como recurso energético a lo largo de la historia de la humanidad, quemándola directamente para producir calor, o para generar electricidad. En la actualidad el 35% de las necesidades de tres cuartas partes de la población mundial, en la mayoría de los países en desarrollo, provienen de la energía de la biomasa (Rosillo-Calle *et al.*, 2007). Sin embargo, las aplicaciones energéticas actuales de la biomasa responden a la necesidad de reducir las emisiones de efecto invernadero, responsables del calentamiento global. A la vez que se reduce la dependencia de los países industrializados a los recursos energéticos derivados del petróleo. Desde la perspectiva de las emisiones de gases efecto invernadero y del ciclo del carbono, la bioenergía es diferente a otros sistemas energéticos con una notable disminución de las emisiones contaminantes. La producción de biomasa implica la captura del CO<sub>2</sub> que se emite cuando la quemamos, dentro de lo que se considera un ciclo neutro de CO<sub>2</sub>.

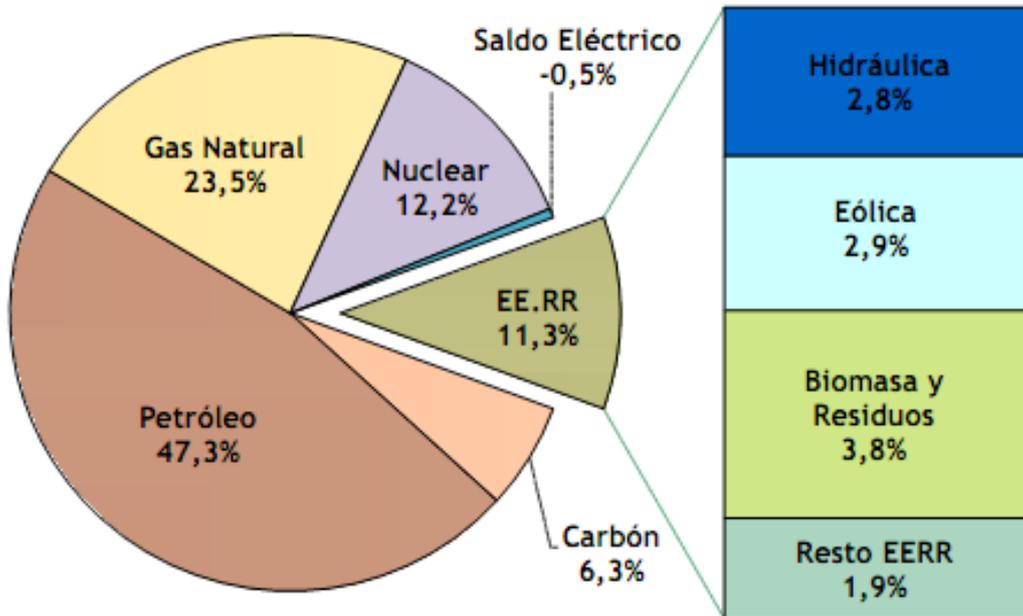
Con el fin de reducir las emisiones de gases con efecto invernadero el Parlamento Europeo creó la mencionada directiva 2009/28/CE, la cual tiene como finalidad promover el uso de recursos renovables para la producción energética. En el primer artículo define los objetivos generales de la misma:

*“establecer un marco común para el fomento de la energía procedente de fuentes renovables. Fijando objetivos nacionales obligatorios en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía y con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el transporte”*

Para alcanzar dichos objetivos, la directiva fija como fecha máxima para su cumplimiento el año 2020, y es cuando el consumo final bruto de energía debe proceder como mínimo en un 20% de recursos renovables. A su vez, el consumo final de energía en transportes para cada estado miembro debe proceder como mínimo en un 10% de recursos renovables para todo tipo de transportes. Se entiende por consumo final de energía aquel realizado en la forma en que llega al consumidor, es decir, gas, petróleo, electricidad o agua caliente. Como indica el primer artículo la directiva 2009/28/CE donde se establecen los objetivos obligatorios para cada Estado Miembro, e insta a adoptar planes de acción nacionales de energías renovables. La Tabla A1.1 del Anejo I muestra la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final de energía en 2005 y los objetivos de cada país para el año 2020.

En 2005 España tenía una cuota de consumo de energías renovables del 8,7%, en 2009 dicha cuota había aumentado hasta el 9,4% según datos del Ministerio de Industria, Transporte y Comercio, lejos de los objetivos de Plan de Energías Renovables 2005-2010 (PER) del 12,1%. En el caso en Alemania, en 2005 la cuota de consumo de energías renovable era inferior a la de España con un 5,8%, sin embargo, en el mismo periodo de tiempo (2005-2009) alcanzó el 10,3%. Esto es debido, fundamentalmente, al incremento de la producción eléctrica derivada de la biomasa y de las instalaciones fotovoltaicas, las cuales según datos del Ministerio alemán de Medio Ambiente, la Conservación de la Naturaleza y la Seguridad nuclear aumentaron entre 2005 y 2009 en un 42% y 19% respectivamente (AGEE-Stat, 2011), convirtiéndose en un modelo de desarrollo energético a imitar.

En la actualidad, la principal energía primaria consumida en España es el petróleo crudo con un 47,3% y el gas natural con un 23,3%. Se entiende como energía primaria aquella energía que todavía no ha sido procesada, y normalmente se clasifica en petróleo crudo, gas natural, nuclear, carbón y renovables. El resto de energías primarias están resumidas en la Figura 1.1, en la cual se observa que el 11,3% de la energía primaria proviene de fuentes renovables, siendo la biomasa la más importante con un 3,8% del total. A su vez cabe destacar que en el año 2009 el 24,7% de la producción de electricidad proviene de las energías renovables, en particular, de la energía eólica (12,4%) y la hidráulica (9%).



**Figura 1.1:** Energías primarias en España en 2010 (Fuente MITyC/IDAE).

Para promocionar el uso de energías renovables el “Plan de Acción Nacional de Energías Renovables” (PANER) especifica las acciones a seguir, a la vez, aporta datos sobre la producción energética y el origen de la misma. La Tabla A1.2 y Tabla A1.3 del Anejo I muestran respectivamente la cantidad de biomasa disponible en España y en Alemania en el año 2006, así como las previsiones para el 2015 y el 2020, para la producción de energía primaria.

Dicha biomasa se puede clasificar de diferentes maneras, pero una de ellas la divide en biomasa leñosa y biomasa no leñosa. A continuación cada tipo se subdivide en diferentes categorías (Rosillo-Calle *et al.*, 2007):

1. Biomasa leñosa:

- 1.1. *Bosques naturales*: incluye toda la biomasa proveniente de boques naturales así como los residuos forestales.
- 1.2. *Plantaciones forestales*: biomasa de plantaciones comerciales (papel, muebles,...) y de plantaciones energéticas, es decir, árboles producidos para la producción de energía.

## Capítulo 1. Introducción

- 1.3. *Plantaciones agro-industriales*: plantaciones forestales para la producción de materia prima, con la recolección de madera como subproducto.
- 1.4. *Árboles no pertenecientes a bosques*: árboles que crecen fuera de un bosque como arbustos y árboles urbanos, a los márgenes de la carretera o en el interior de propiedades particulares.

### 2. Biomasa no leñosa:

- 2.1. *Cultivos agrícolas*: cultivos específicos para la alimentación, forraje o producción energética.
- 2.2. *Residuos agrícolas (o agro-industriales)*: residuos resultantes del procesado agro-industrial de los cultivos agrícolas.
- 2.3. *Residuos animales*: principalmente deyecciones ganaderas, aunque también se consideran residuos animales los generados en mataderos.
- 2.4. *Lodos de depuradora*: lodo espeso de los materiales sólidos obtenidos a partir de aguas residuales durante el proceso de tratamiento por sedimentación.
- 2.5. *Cultivo de algas*: ciertos géneros de algas como la *Chorella vulgaris* (Deublein & Steinhauser, 2008).
- 2.6. *Residuos Sólidos Urbanos (RSU)*: residuos generados en municipios y servicios (hoteles, comercios,...), siendo particularmente aprovechable la fracción orgánica de estos residuos (FORSU).

Las principales aplicaciones de la biomasa como recurso energético son la producción de calor para agua caliente sanitaria o para procesos industriales, la producción de combustibles líquidos para el transporte como bioetanol y biodiesel, y la generación de electricidad para suplir la red eléctrica. También permite obtener biogás mediante digestión anaerobia de la biomasa, que una vez purificado y procesado con los correspondientes aditivos puede ser incorporado en la red de gas natural. Las principales tecnologías para la transformación de la biomasa en calor y electricidad son las siguientes (Rosillo-Calle *et al.*, 2007), (Brown *et al.*, 2005):

- A. **Combustión directa**: Este sistema se basa en generar vapor mediante la combustión de la biomasa, produciendo energía mecánica a través de turbinas y finalmente energía eléctrica en alternadores.

- B. Combustión conjunta: Es la combustión simultánea de una mezcla de combustibles, por ejemplo, carbón y biomasa.
- C. Gasificación: Es la combustión en defecto de oxígeno con transformación de un material sólido en un gas aprovechable como combustible.
- D. Pirolisis: Descomposición térmica de biomasa en ausencia de oxígeno obteniendo como producto un combustible líquido conocido como bio-aceite y una mezcla de diferentes gases.
- E. Cogeneración, (*Combined Heat and Power*, CHP): Es la producción de energía eléctrica combinada con el aprovechamiento del calor residual producido.
- F. Digestión anaerobia: Es un proceso biológico que convierte biomasa sólida o líquida en gas en ausencia de oxígeno. El producto, denominado biogás, está principalmente compuesto por metano y dióxido de carbono, así como con bajas cantidades de otros gases. El residuo sólido resultante del proceso puede ser utilizado como fertilizante.

### 1.3. La región de Göttingen y su potencial biomásico.

Göttingen es un distrito en el sur de la Baja Sajonia en Alemania (Figura A1.1 y Figura A1.2 del Anejo I). Está rodeado por los estados de Thuringia y Hesse, y por los distritos de Northeim y Osterode (Figura A1.3 del Anejo I).

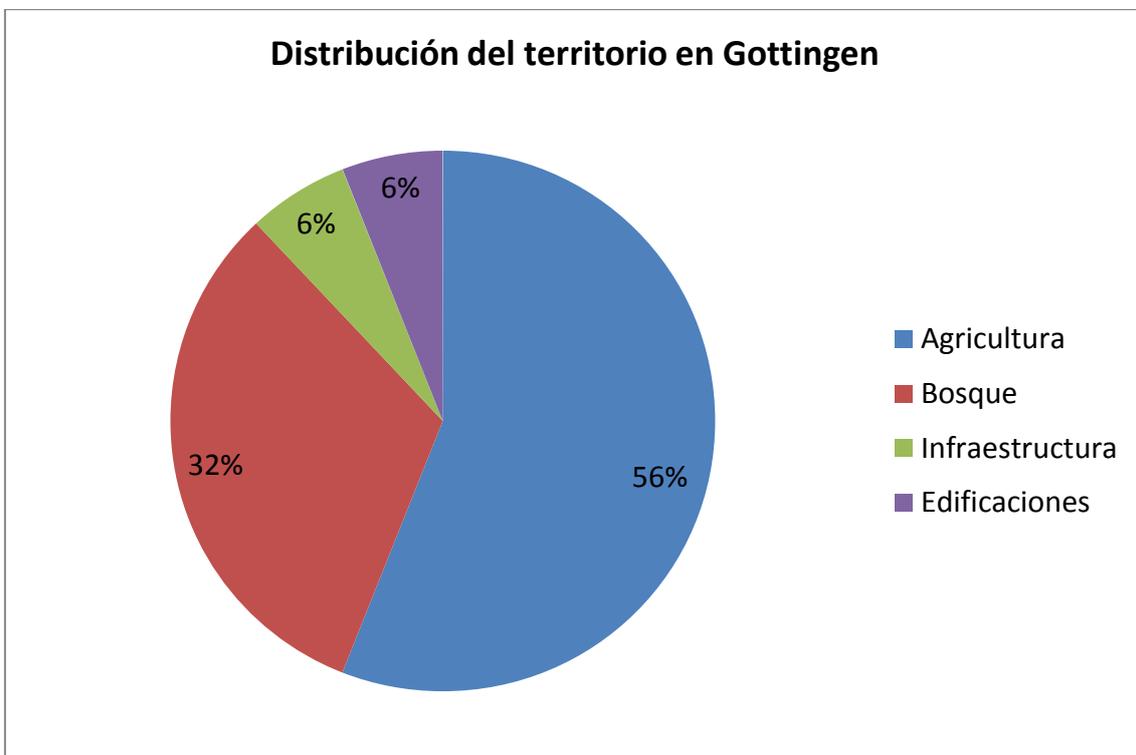
El distrito de Göttingen está formado por doce núcleos urbanos y su área es de 1.117 km<sup>2</sup> con una población total de aproximadamente 265.000 habitantes. Esto significa una densidad de 23 habitantes por km<sup>2</sup>. De dichos núcleos urbanos el mayor es la ciudad de Göttingen con 121.500 habitantes, de los cuales alrededor de 25.000 son estudiantes debido a la presencia de la Universidad George August de Göttingen, un centro de educación e investigación con más de 13.500 empleados.

La región de Göttingen pertenece al macro-clima *templado* y al bioclima *templado oceánico* (Rivas-Martinez *et al.*, 2009). En dicho bioclima hay entre 4 y 7 meses con una temperatura media de 10°C o superior. Los inviernos son relativamente suaves y húmedos, mientras que los veranos son relativamente fríos, con temperaturas entre 13 y 18°C. La temperatura media anual es de 8,7°C, con una máxima mensual de

## Capítulo 1. Introducción

18,6°C en julio y una temperatura mínima mensual es 0,8°C durante el mes de enero. Las precipitaciones anuales en la región de Göttingen son de 644,9 mm. El mes con mayores precipitaciones es julio con aproximadamente 80 mm y el mes con menores precipitaciones es abril con una media de 38,1 mm. Los días con más de 1 mm por año son 121. En las Tabla A1.4 y Tabla A1.5 y en la Figura A1.4 del Anejo I se muestran los datos climáticos entre el año 2000 y el 2010 (Wetterstation Göttingen, 2010).

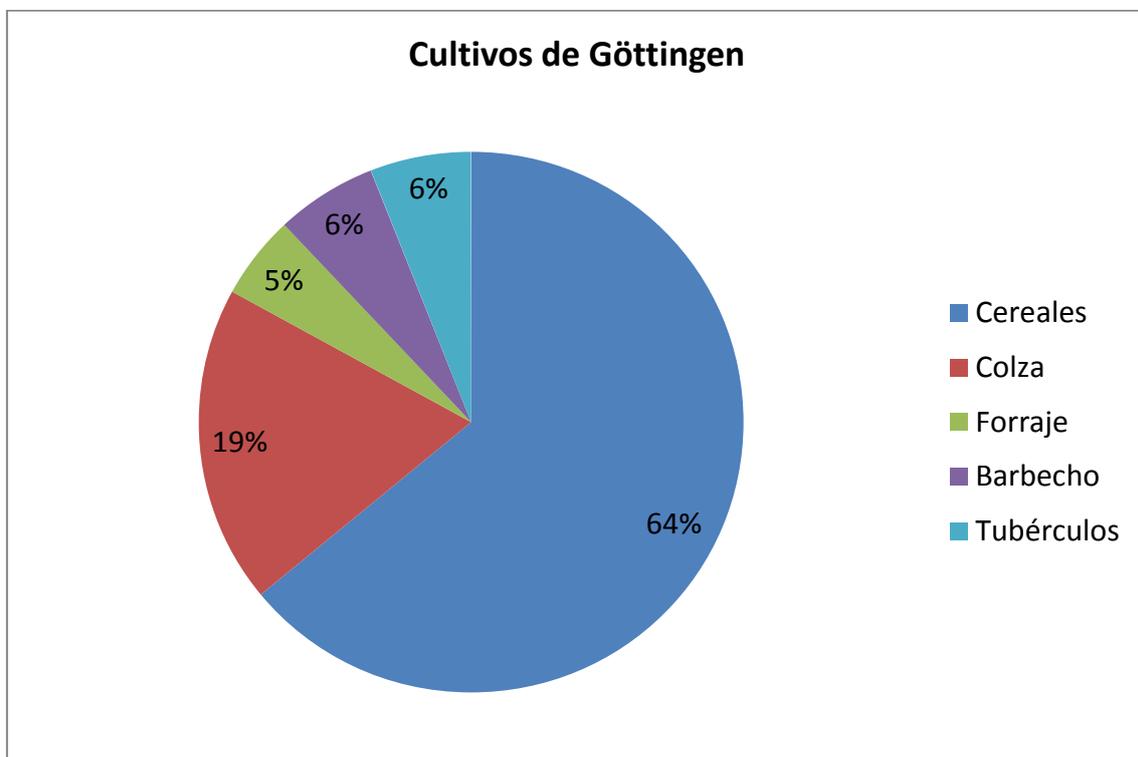
La distribución de usos del territorio en la región de Göttingen corresponde, como se puede observar en la Figura 1.2, es su mayoría a uso agrícola con un 57,1% de la superficie. El 32,9% de la misma está ocupada por bosques, el 6,2% por infraestructuras de tráfico y el 6,2% son áreas con edificaciones (LSKN, 2009). Las actividades económicas de la región generaron en 2009 un Valor Añadido Bruto (VAB) de 6.211 millones de euros. El VAB mide la contribución a la economía de cada productor, industria o sector. En el caso de la región de Göttingen la agricultura representa el 1% del VAB, la industria el 25%, el comercio y transporte el 17%, y finalmente, otros servicios contribuyen en un 57%.



**Figura 1.2:** Distribución del uso del territorio en la región de Göttingen.

De acuerdo con el tema de este trabajo, es importante describir en mayor detalle la estructura agrícola y forestal de la región, así como el potencial biomásico que se puede obtener de las mismas. Según las estadísticas del año 2007 del *Landwirtschaftskammer Niedersachsen* (Cámara de Agricultura de Baja Sajonia) existen 926 explotaciones agrícolas en la región de Göttingen, las cuales ocupan un área de 57.413 hectáreas.

El área utilizada para la producción agrícola es de 49.432 hectáreas. Como se observa en la Figura 1.3, los cultivos son mayoritariamente de cereales, especialmente trigo y cebada de invierno, pero también maíz, triticale, centeno y avena. El cultivo más importante por detrás de los cereales es la colza (LSKN, 2009).



**Figura 1.3:** Cultivos de la región de Göttingen.

La producción animal de la región está basada en granjas de pequeño tamaño. Existen 334 granjas bovinas, de las cuales el 75% tiene menos de 100 animales. De las 438 granjas porcinas el 68% tiene menos de 100 animales y el 29% tiene entre 200 y 1000 animales. Por último, existen 85 granjas ovinas todas con menos de 100 animales, y 217 granjas avícolas.

Las actividades anteriormente mencionadas caracterizan a Göttingen como una región rural con un amplio potencial de biomasa, tanto de la agricultura (residuos agrícolas y ganaderos, y cultivos energéticos) como forestal. De dicho potencial puede hacerse un cálculo aproximado basándose en los datos del estudio “Biomass energy in a small-scale region of a developed country — the case of the district of Göttingen” (Ahl, 2000). En 2008 de las 49.432 ha cultivadas 9.392 estaban dedicadas a la producción de colza con un rendimiento medio de 3.600 kg/ha, 31.142 ha eran de cereales con un rendimiento medio de 5.000 kg de paja/ha. De dicha paja aproximadamente el 50% puede ser utilizada para la fines energéticos, mientras que el otro 50% permanece en el campo, se utiliza como alimento o no se puede recoger. Finalmente, existían 3.460 ha en barbecho, que podrían ser cultivadas con una variedad de cereal con alto rendimiento de biomasa (cultivo energético) obteniendo 13.000 kg de paja y grano/ha. En la Tabla 1.1 se resumen los resultados del supuesto estudiado en la región de Göttingen en tonelada de biomasa seca (MS).

		<b>Colza</b>	<b>Cereales (50%)</b>	<b>Barbecho (Cereal con alto rto de biomasa)</b>
<b>Área</b>	[ha]	9.392	15.571	3.460
<b>Rendimiento</b>	[t MS/ha]	3,6	5	13
<b>Total MS</b>	[t]	33.811	77.855	44.980

**Tabla 1.1:** Producción de biomasa derivada de la agricultura en la región de Göttingen.

En cuanto al potencial biomásico forestal, en el año 2008 un área de 36.749 hectáreas estaba cubierta por bosques, el 66% de este bosque son árboles de hojas anchas, de los cuales el 73% son coníferas. La materia seca anual producida por los árboles de hoja ancha es de 5 m<sup>3</sup> por hectárea, mientras que las coníferas producen alrededor de 7 m<sup>3</sup> por hectárea y año. Toda esta materia puede ser utilizada con fines energéticos o únicamente el 60%, procedente de aclareos. En la tabla 1.2 se resume el resultado de la producción de biomasa forestal en toneladas de la región de Göttingen.

El principal uso energético de los residuos forestales es la quema directa o el pelletizado, que consiste en la trituración y extrusión de la biomasa en forma de pequeños cilindros denominados pellets, para su posterior combustión.

		Árboles hoja ancha	Coníferas
Área	[ha]	24.254	17.705
Crecimiento	[m <sup>3</sup> /ha·año]	5	7
Total	[m <sup>3</sup> ]	121.270	123.935
	[t]	78.847	49.615
Aclareo	[m <sup>3</sup> ]	72.762	43.657
	[t]	74.361	29.744

**Tabla 1.2:** Resultado de la producción de biomasa forestal en la región de Göttingen.

En el caso de la producción animal no existen datos los residuos ganaderos producidos en el distrito de Göttingen. Sin embargo, se puede hacer un cálculo aproximado de la cantidad de estiércol producido por el ganado porcino y bovino durante un año, susceptible a ser utilizado con fines energéticos. Según datos de la asociación agraria *Landvolk Göttingen* en el año 2007 habían 17.186 cabezas bovinas y 78.326 cerdos en las diferentes granjas de Göttingen (Hübner, 2010). Suponiendo que todos son animales en fase de engorde, cada cabeza bovina y porcina producirá respectivamente por animal y año 18 m<sup>3</sup> y 1,62 m<sup>3</sup> (Deublein *et al.*, 2008). La producción anual de estiércol que puede ser utilizado con fines energéticos queda resumida en la Tabla 1.3.

		Cabezas bovinas	Cabezas porcinas
Número	[n°]	17.186	78.326
Estiércol por animal	[m <sup>3</sup> /año·animal]	18	1,62
Estiércol total	[m <sup>3</sup> /año]	309.348	126.888

**Tabla 1.3:** Producción anual de estiércol bovino y porcino en la región de Göttingen.

#### 1.4. Municipios energéticamente sostenibles en la región de Göttingen.

La región de Göttingen pertenece al programa “*Regiones Bioenergéticas*” de Alemania. Se trata de un programa promovido por la Unión Europea bajo la iniciativa LEADER, como parte de la política de desarrollo rural comunitaria. Durante el periodo

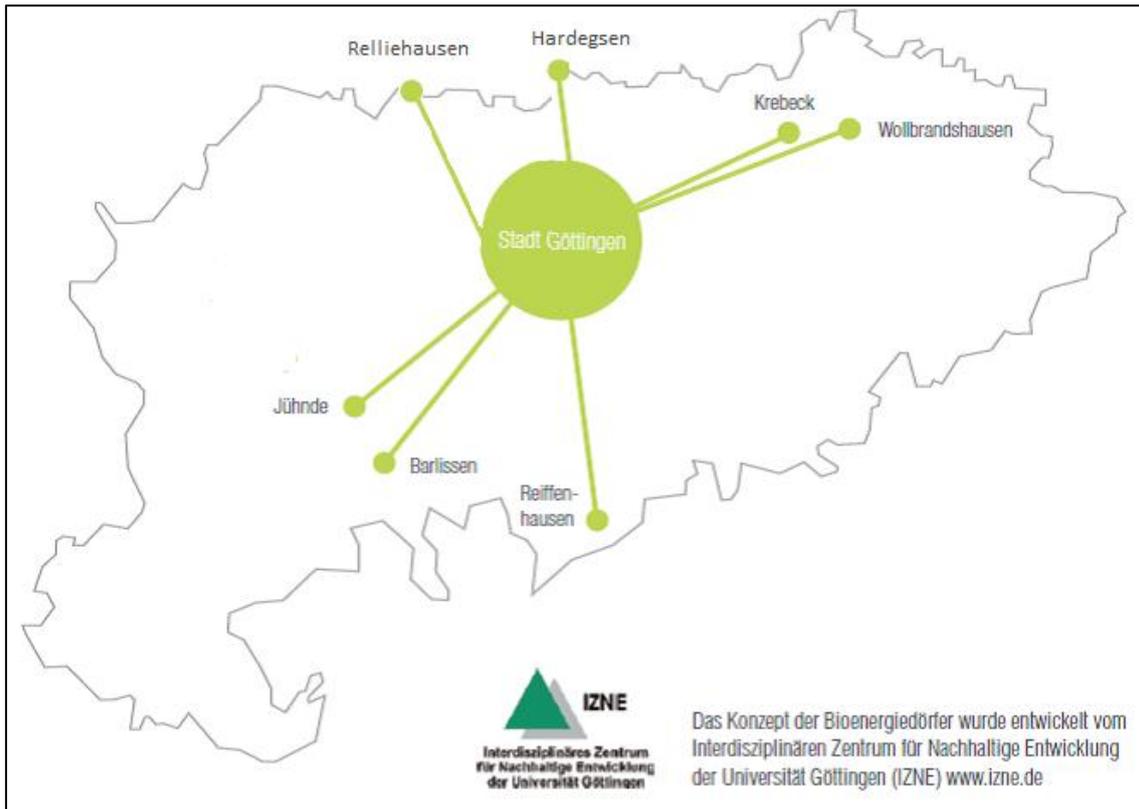
## Capítulo 1. Introducción

2000-2006, se orientó a la diversificación de la actividad económica en las áreas rurales mediante la aplicación de estrategias de desarrollo innovadoras, integradas y participativas. Tras dicho periodo la región de Göttingen fue seleccionada por el Gobierno alemán como una de las 32 regiones LEADER en la Baja Sajonia para un nuevo periodo del 2007 al 2013.

Una de las iniciativas de dicho programa es la creación de los denominados “*Pueblos Bioenergéticos*”. La idea original de un pueblo bioenergético es reorganizar los mecanismos de abastecimiento de energía (calor y electricidad) basándose en el aprovechamiento de la biomasa. Para ello, se estudian los recursos energéticos de la zona y se proyectan aquellas tecnologías de transformación de esta biomasa con mejores rendimientos.

En el caso particular de la región de Göttingen, en la mayor parte de los casos se construyen plantas de biogás a pequeña escala con co-digestión de residuos ganaderos y cultivos energéticos. El biogás producido alimenta una central de cogeneración de ciclo combinado que, mediante un generador, produce al menos tanta electricidad como se consume en el pueblo. Además, el calor que resulta de la combustión del biogás en el ciclo combinado es parcialmente aprovechado para acelerar el propio proceso de fermentación. Sin embargo, la mayor parte de ese calor queda disponible para calefacción doméstica, con lo cual se puede reducir el consumo de otros combustibles (carbón, gas natural o aceites). Dicho calor se distribuye en forma de agua caliente por un sistema de tuberías, abasteciendo de calefacción y agua caliente sanitaria. En épocas de elevada demanda se puede combinar el calor obtenido durante la cogeneración con los gases de la combustión de biomasa peletizada, procedente de poda y limpieza del bosque para alimentar el intercambiador de calor.

Se trata de instalaciones que operan a nivel local, descentralizando el abastecimiento de energía y creando puestos de trabajo en las localidades donde se sitúan. Por tanto, tienen un gran componente social al tratarse de cooperativas gestionadas por los vecinos de dichos pueblos. En la actualidad existen 7 pueblos bioenergéticos en la región de Göttingen como se muestra en la Figura 1.4 (LEADER Regionalmanagement Göttinger Land, 2010). A continuación se realiza una pequeña introducción a los biopueblos del estudio: Krebeck-Wollbrandhausen, Reiffenhausen, Rellichausen y Hardegsen.



**Figura 1.4:** Pueblos bioenergéticos en la región de Göttingen.

Los pueblos de Wollbrandshausen y Krebeck están situados a 20 kilómetros al este de Göttingen y desde Julio de 2010 producen calor y electricidad en una planta de biogás común. Wollbrandshausen tiene una población aproximada de 620 habitantes y Krebeck de 720 habitantes. La planta situada en Krebeck abastece calor a ambas poblaciones a través de cuatro unidades CHP. Parte de la electricidad generada suministra a 259 casas de la cooperativa, el resto es vertido a red. El sistema completo tiene una potencia eléctrica instalada de 1.350 kW. Al igual que en el resto de plantas las materias primas son suministradas por agricultores y ganaderos locales, ya que se trata de poblaciones principalmente dedicadas a la agricultura.

Reiffenhausen es una villa perteneciente al municipio de Friedland, situada a 18 kilómetros al sur de Göttingen, en la frontera con Turingia. Con alrededor de 720 habitantes produce electricidad y calor en una planta de biogás desde 2008. La cooperativa está integrada por 94 hogares, en este caso, la planta es propiedad de un granjero del municipio el cual produce electricidad y distribuye calor mediante una red local de calefacción. El calor generado supone dos tercios de las necesidades, por lo que

es suplementado en invierno con una planta de calefacción con astillas de madera. La potencia eléctrica instalada es de 515 kW.

Relliehausen es un pequeño pueblo de 166 habitantes situado al nordeste de Göttingen. Desde 1966 la Universidad George-August de Göttingen tiene una granja de investigación de la Facultad de Ciencias Agrarias en dicha población, con 2.300 cerdos de engorde, 180 hectáreas de cultivos y 80 hectáreas de pastos. Desde 2007 producen biogás en una planta a pequeña escala. La electricidad es vertida a red, mientras que el calor generado es empleado para la calefacción de 2.300 m<sup>2</sup> de porquerizas y de 10 casas de la localidad.

Por último, Hardegsen es una población situada en el límite entre el distrito de Northeim y el distrito de Göttingen, a 18 kilómetros al norte de este último. Con una población de 8.222 habitantes tiene una planta de biogás desde 2008. A diferencia de las anteriores, el calor y electricidad generados no se consumen en las proximidades de la planta de digestión anaerobia, por lo el biogás es acondicionado produciendo biometano, el cual es vertido a la red de gas natural tras un proceso de acondicionamiento y utilizado en CHP instaladas en el lugar de consumo. Además, la planta es gestionada por una compañía eléctrica.

## **1.5. El proceso de la digestión anaerobia.**

### **1.5.1 Historia, proceso microbiológico y bioquímico de la digestión anaerobia.**

La **digestión anaerobia** es un proceso con diversas etapas que requiere la actividad de microorganismos para descomponer material biodegradable en ausencia de oxígeno. El resultado final de la digestión anaerobia, también denominada *fermentación anaerobia*, es la conversión del material orgánico inicial, fundamentalmente, en dos componentes: el *biogás*, mezcla gaseosa de metano y dióxido de carbono, principalmente, y de sulfuro de hidrógeno, hidrógeno y amoníaco, en menores proporciones; y el *efluente*, biomasa estabilizada rica en microorganismos.

El proceso anaerobio es conocido desde la antigüedad, ya que se produce de forma natural al degradarse la materia orgánica en pantanos, en yacimientos subterráneos o en el estómago de los rumiantes. En los siglos XVIII y XIX se produjo un estudio más profundo del proceso, así en el año 1804 Dalton estableció la composición química del metano. En 1868 Beauchamp descubrió la presencia de microorganismos en la producción de metano, y en 1987 Pasteur investigó la digestión de residuos animales y la influencia de la temperatura en el mismo, sugiriendo su utilización del metano en el alumbrado de las calles. Sin embargo, fue a mitad del siglo XX cuando comenzaron numerosas experiencias piloto para su explotación energética, debido a la escasez de combustible durante la segunda guerra mundial. Así, en 1945, Alemania fue la primera en utilizar únicamente productos agrícolas para la producción de biogás (Deublein *et al.*, 2008).

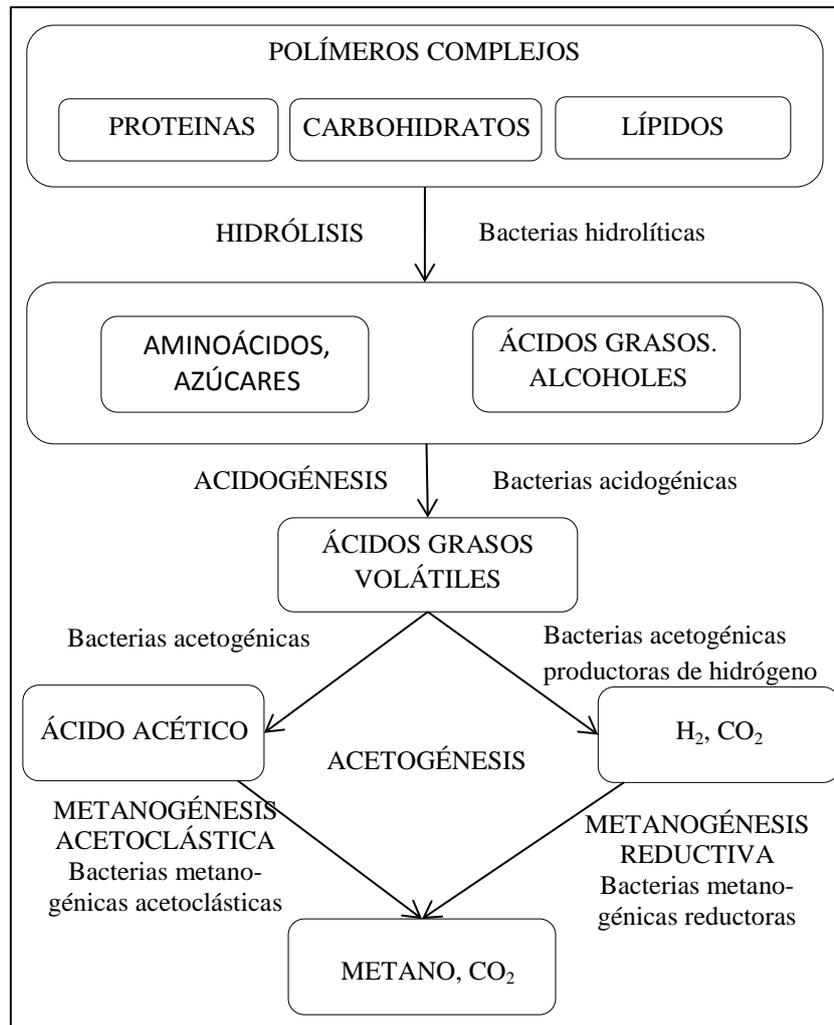
A partir de los años 60, aparecen dos corrientes diferenciadas que motivan la producción de biogás; mientras en países en vías de desarrollo como India y China se impulsa dicha tecnología con fines energéticos y de mantenimiento de las propiedades fertilizantes, en los países desarrollados la motivación para el uso de digestión anaerobia es más medio ambiental que puramente energética. Por ejemplo, para la estabilización de los lodos activos residuales de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. En los años 80 con la caída de los precios del petróleo el interés por dicha tecnología volvió a decaer y solo en algunos países, como el caso de Dinamarca, continuaron su investigación con el objetivo de gestionar residuos. En la actualidad, tanto la crisis energética como los objetivos medioambientales han devuelto el interés por la producción de biogás.

Por tanto, la digestión anaerobia es un proceso ampliamente estudiado y conocido, sin embargo el control de todos los parámetros que intervienen en el proceso y la optimización de la producción de biogás se encuentra todavía en estudio. A continuación se realiza una introducción a sus fases y los microorganismos que participan en la misma, así como una revisión bibliográfica de los parámetros que regulan el proceso. En el punto 1.8 se expondrá el estado de la monitorización de las plantas de biogás en la actualidad.

La fermentación anaerobia es un proceso complejo que normalmente se divide en cuatro fases, de acuerdo con el proceso principal que tiene lugar en cada una. Además, en cada fase actúa un grupo específico de bacterias. La primera de dichas fases es la Fase de Hidrólisis en la que los compuestos orgánicos insolubles son hidrolizados en sus monómeros solubles: carbohidratos a azúcares, proteínas a aminoácidos y grasas a ácidos grasos. Las bacterias hidrolíticas pertenecen a diversos géneros como *Bacteroides*, *Lactobacillus* o *Clostridium*, y excretan enzimas que catalizan las degradaciones, como hidrolasas, celulasas, proteasas y lipasas. La tasa de hidrólisis depende tanto de la biodegradabilidad, como del tamaño de partícula, la estructura química y la complejidad del sustrato, como de los factores operacionales (Macías-Corra *et al.*, 2007).

Los monómeros formados en la fase hidrolítica son degradados a ácidos orgánicos de cadena corta por bacterias acidogénicas en la Fase de Acidogénesis, es decir, son degradados a ácidos grasos volátiles (AGV) (ácido butírico, propiónico, acético, y acetato), con la formación de alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono en el proceso. Estas reacciones se producen inmediata o simultáneamente con la hidrólisis. Los productos de la Acidogénesis pueden ser utilizados directamente para la producción de metano o acetato, como el hidrógeno y el dióxido de carbono; mientras que los AGV son degradados en la siguiente fase, denominada Acetogénesis, a acetato, hidrogeno y dióxido de carbono. El acetato es el principal precursor de la producción de metano. Las bacterias formadoras de acetato (bacterias acetogénicas) son productoras obligadas de hidrógeno, pero solo sobreviven en condiciones de baja presión parcial de hidrógeno, por lo que deben vivir en simbiosis con bacterias formadoras de metano, que consumen el hidrógeno y que únicamente pueden sobrevivir en condiciones de alta presión parcial de hidrógeno.

Por último, en la Fase de Metanogénesis las bacterias metanogénicas producen metano bajo estrictas condiciones anaerobias, y para ello pueden seguir dos rutas distintas; alrededor del 66% del metano se produce del acetato por descarboxilación, catalizada por bacterias metanogénicas acetoclásticas, y el 34% es formado del dióxido de carbono reducido por hidrógeno, mediante bacterias metanogénicas hidrogenofílicas (Nayono, 2009). En la Figura 1.5 se resumen los productos y bacterias de cada fase (Nayono, 2009).



**Figura 1.5:** Fases de la digestión anaerobia.

De la degradación de proteínas y amino ácidos se acumula amonio en el digester. El amonio puede reaccionar con el dióxido de carbono y el agua formando carbonato de amonio, lo cual dota de alcalinidad al sistema. Un medio ligeramente alcalino es necesario para el crecimiento óptimo de las bacterias metanogénicas. Además de las bacterias que participan en el proceso de digestión anaerobia en el digester existen muchas más bacterias, como por ejemplo las bacterias que reducen sulfato. Dichas bacterias utilizan los mismos sustratos que las metanogénicas (hidrógeno y acetato) por lo que pueden suponer una competencia, dificultando la producción de metano.

### 1.5.2 Productos de la digestión anaerobia.

Los productos de la digestión, como se ha indicado anteriormente, son una mezcla de gases denominada biogás y el efluente estabilizado. La composición del gas es de metano (50-75%), dióxido de carbono (25-45%) y diversas impurezas, detalladas a continuación (FNR, 2009): 2-7% agua ( $H_2O$ ), menos del 2% oxígeno ( $O_2$ ), menos del 2% nitrógeno ( $N_2$ ), menos del 1% amonio ( $NH_3$ ) y menos del 1% sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ). Dicha composición varía en función del sustrato utilizado como se observa en la Tabla A1.6 del Anejo I (Coombs, 1990).

De la mezcla de gases el único con valor económico es el metano, ya que se trata de un gas inflamable natural y puede ser usado como combustible. El biogás con un 70% de metano y un 30% de dióxido de carbono tiene un contenido energético aproximado de  $6,4 \text{ kWh/m}^3$ . Según estudios del IDAE (2007), un metro cúbico de dicho gas es equivalente a:

- 0,8 litros de petróleo.
- $0,6 \text{ m}^3$  de gas natural.

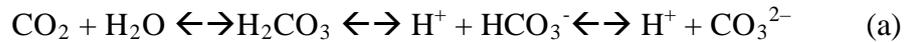
La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que multitud de organismos están involucrados, por lo que es recomendable que las condiciones bajo las que se desarrolla la actividad microbiana sean constantes (Deublein *et al.*, 2008). Dichas condiciones dependen de numerosos parámetros, usualmente clasificados en **parámetros ambientales** y **operacionales** (Elias Castells, 2005).

### 1.5.3 Parámetros ambientales.

#### **pH y alcalinidad**

La actividad enzimática está directamente influenciada por el pH, así cada fase de la digestión anaerobia tiene unos valores del pH aceptables próximos a la neutralidad (6,5-8,0). Una alcalinidad adecuada es esencial para un control correcto del pH, sirviendo como tampón que evita cambios rápidos en el pH. La alcalinidad aparece principalmente como bicarbonatos, en equilibrio con el  $CO_2$  en el biogás a un pH determinado. Cuando los compuestos orgánicos son degradados, el  $CO_2$  y el amonio

aumentan, se produce ácido carbónico, alcalinidad de bicarbonato y alcalinidad de carbonato (reacción a), y con la reacción b se generan iones de amonio.



La caída del pH y el aumento de la cantidad de CO<sub>2</sub> del biogás es un indicador de alteraciones en el proceso de digestión.

### **Nutrientes**

La relación entre algunos nutrientes influye en la cinética de reacción y en la producción de metano. La relación C/N del substrato debe estar entre valores de 15:1 a 45:1, siendo óptimo a 30:1 (Elias Castells, 2005). Substratos con una relación C/N baja pueden producir el incremento de amonio en el digestor y por tanto la inhibición de la producción de metano.

### **Inhibidores**

Los inhibidores pueden ser sustancias del propio substrato, como metales pesados, o subproductos de la actividad metabólica de las bacterias como oxígeno, compuestos de azufre, ácidos orgánicos, amonio y amoniaco. Las consecuencias de los inhibidores en el proceso de digestión anaerobia puede ser la disminución de la producción de biogás e incluso el fallo del digestor.

#### 1.5.4 Parámetros operacionales.

### **Temperatura**

La mayoría de las bacterias metanogénicas están activas en dos rangos de temperatura:

- Rango mesofílico: de 25 a 45°C.
- Rango termofílico: de 45 a 65°C.

La temperatura influye en la tasa hidrolítica, el crecimiento bacteriano y, por tanto, en la producción de metano; la cual aumenta con el aumento de temperatura. Las bacterias formadoras de metano son muy sensible a las variaciones de temperatura,

## Capítulo 1. Introducción

siendo la temperatura óptima 35°C con oscilaciones de +/-2°C. Por encima de los 40°C se agravan los problemas de control y estabilidad del proceso.

### Agitación

La agitación tiene un importante papel en el digester por las siguientes razones; elimina la estratificación térmica, mezcla el sustrato fresco con el degradado, inoculándolo con bacterias, mantiene el sustrato del digester química y físicamente uniforme, y evita la formación de espumas. Además, la agitación asegura el contacto espacial entre las bacterias formadoras de acetato y las bacterias formadoras de metano, que, como se expone anteriormente, cohabitan en simbiosis. La agitación debe ser lenta y no violenta, y se puede hacer mecánicamente mediante agitadores, o hidráulica o neumáticamente con el uso de bombas. En las plantas de biogás agrícolas normalmente son agitadores mecánicos de hélice o axiales.

### Tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga orgánica

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el tiempo que cierta sustancia permanece dentro del digester. Puede ser calculado como la capacidad del digester ( $V_R$ ) en relación con el caudal de tratamiento diario ( $V$ ) (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e., 2004):

$$\text{TRH [d]} = V_R [\text{m}^3] / V [\text{m}^3/\text{d}]$$

Por otro lado, la velocidad de carga orgánica (VCO) es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. El incremento en la VCO implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida, debiendo encontrar un valor óptimo técnico/económico para cada instalación y residuo a tratar.

## 1.6. Tecnologías para la digestión anaerobia

Es importante mencionar las **tecnologías disponibles en la actualidad**. Los sistemas de fermentación se clasifican como: *sistemas discontinuos* y *sistemas continuos*.

En los sistemas de producción de biogás discontinuos, también conocidos como sistemas de bañera, el digestor se llena completamente con sustrato fresco y se cierra herméticamente. El sustrato es degradado hasta el final del tiempo de retención seleccionado, sin añadir o extraer nada del mismo. La producción de biogás comienza despacio tras el llenado y sellado, creciendo hasta alcanzar un máximo y disminuyendo después. Tras el proceso el tanque es vaciado y el digestato se acumula en un tanque de almacenamiento. Una pequeña parte del digestato permanece para inocular el nuevo sustrato. La alimentación discontinua es la técnica más utilizada en la fermentación seca y su principal desventaja es la producción de gas discontinua.

Actualmente, los sistemas continuos de producción de biogás son más habituales. Estos se caracterizan por una alimentación regular del digestor; la misma cantidad de sustrato es añadida y extraída diariamente. Esto tiene como resultado una producción de biogás bastante regular. El digestato extraído puede ser almacenado en un digestor secundario con la consecuente producción de biogás, y finalmente en un tanque de almacenamiento. El principal inconveniente de este sistema es el consumo de energía necesaria para calentar el digestor. Los sistemas continuos pueden ser clasificados en tres diferentes tipos de acuerdo a la concentración de microorganismos en el reactor (Elias Castells, 2005):

- *Reactor con agitación continua (CSTR), sin recirculación:* en el reactor existe una distribución continua de sustrato y concentración de microorganismos, debido a una correcta agitación.
- *CSTR, con recirculación:* los microorganismos y el digestato son separados, en un tanque de decantación, y los primeros son recirculados al digestor. Este sistema únicamente es aplicable en tratamiento de aguas residuales.
- *Reactor de flujo ascendente (UASB), sin recirculación:* un reactor tubular con retención de microorganismos mediante filtros, floculación de la biomasa o sedimentación. También únicamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales.

Los sistemas de digestión también se pueden clasificar como *fermentación húmeda*, cuando el contenido en agua es superior al 85%, o *fermentación seca*, cuando el contenido en agua es entre el 55 y el 75%.

### 1.7. Co-digestión de residuos ganaderos y cultivos energéticos.

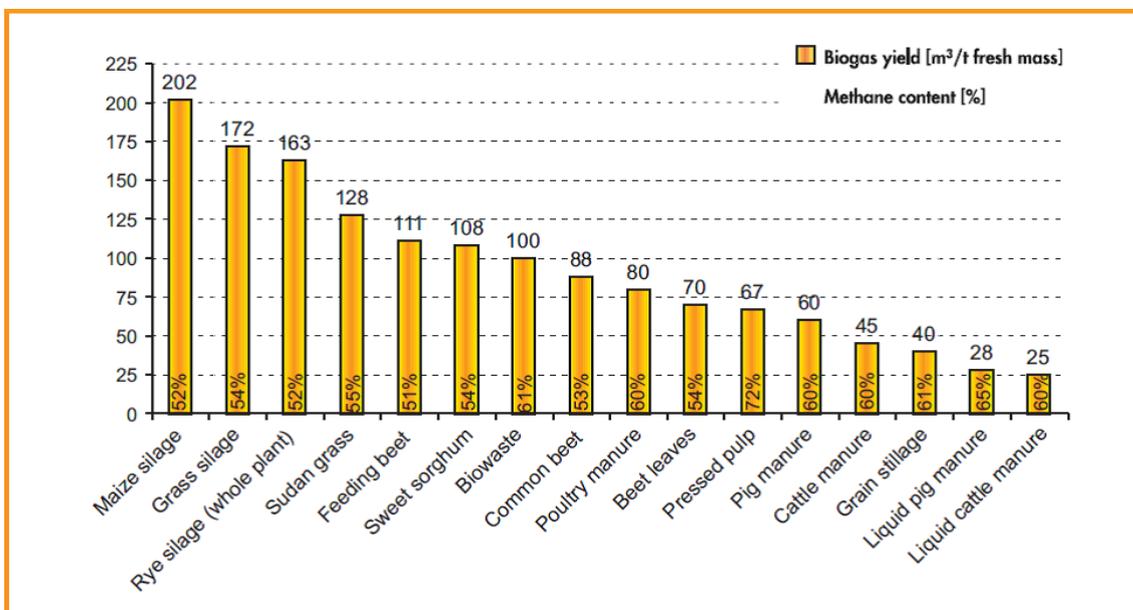
La digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen y composición se denomina **co-digestión**, y se considera una forma de optimización del proceso, ya que aumenta la producción de metano. Esto es debido a que la mezcla de sustratos compensa las carencias de cada uno por separado. Además de esta ventaja, la co-digestión nos permite compartir instalaciones de tratamiento de residuos y compensar las variaciones temporales de producción de cada sustrato, a la vez que reducimos costes de inversión y explotación (Flotats, 2008).

La co-digestión puede realizarse entre diferentes tipos de sustratos, aunque habitualmente es entre purines, con una baja tasa de producción de metano pero con alto contenido en agua, alta capacidad tampón y alto contenido en nutrientes, y otros sustratos fácilmente degradables como residuos de agroindustriales, residuos orgánicos urbanos, residuos animales o cultivos energéticos (Boe, 2006). Entendemos por **cultivos energéticos** aquellos producidos para la obtención de biomasa con fines exclusivamente energéticos. Estos pueden ser cultivos forestales o especies agrícolas (IDAE, 2007). Las especies agrícolas más utilizadas son la colza, los cereales (maíz, centeno, avena o triticale) y los pastos, aunque en la actualidad se están introduciendo otras especies como la remolacha, la patata, el sorgo o el cardo.

Existe una gran experiencia en este campo en países como Dinamarca, Alemania u Holanda (PROBIOGAS, 2009). En la Figura 1.6 se muestra la tasa de producción de biogás de diferentes sustratos en m<sup>3</sup> por tonelada de materia fresca y su correspondiente contenido en metano (FNR, 2009). Como se puede observar los sustratos con mayor tasa de producción de biogás son el maíz ensilado, el pasto ensilado y la planta completa de centeno ensilado. Mientras que las que tienen menor tasa de producción de biogás son los purines líquidos porcinos y bovinos. Diversos estudios han demostrado la eficacia del **ensilado** para aumentar la tasa de producción de biogás, especialmente en maíz (Amon *et al.*, 2006). El ensilado consiste en el triturado, compactado y almacenamiento en condiciones anóxicas del sustrato, favoreciendo la producción de ácido láctico. La degradación de los azúcares produce pequeñas pérdidas respecto a la biomasa fresca, pero aumenta la tasa de producción de biogás hasta un 25% en el caso del maíz (Bartuševics *et al.*, 2008). Durante el proceso de ensilado se forma ácido láctico, ácido acético, metanol, alcohol, ácido fórmico,

protones y dióxido de carbono, importante precursores de la formación de metano (Madigan *et al.*, 2000). El ensilado es considerado un **pre-tratamiento** de los substratos, y es ampliamente utilizado tanto en plantas agrícolas de producción de biogás como en plantas industriales.

En la co-digestión la proporción entre los substratos utilizados es variable y afecta a la producción final de biogás y a su contenido en metano. En el caso de la fermentación de residuo ganadero y cultivos energéticos la proporción suele ser de 40% residuo ganadero y 60% de cultivo energético, pudiendo variar ligeramente, y obteniendo un contenido en metano de entre el 51 y el 55% (PROBIOGAS, 2009; Comino *et al.*, 2009).



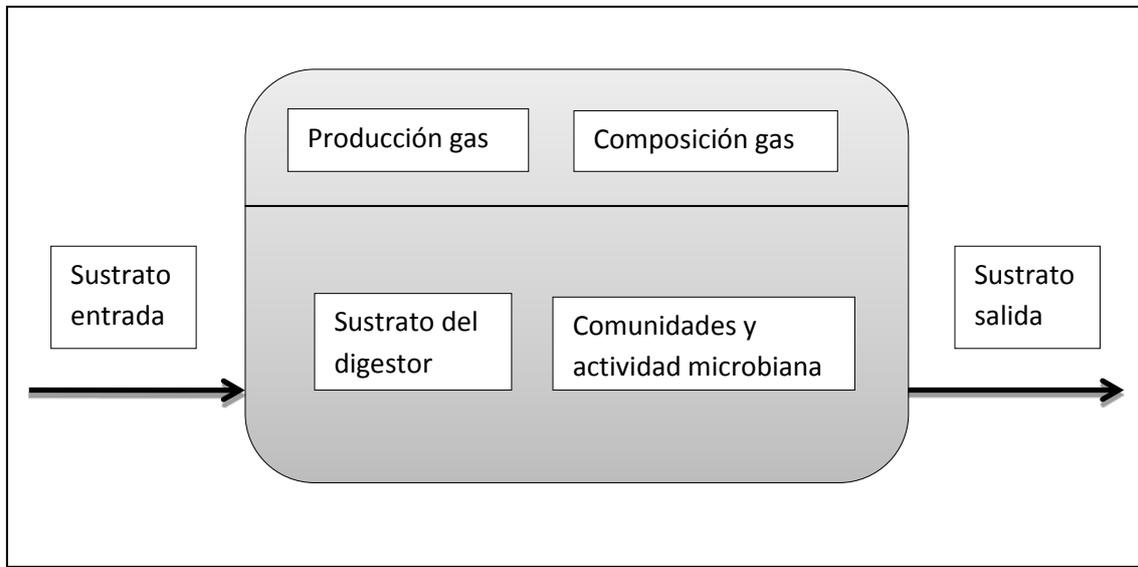
**Figura 1.6:** Tasa de producción de biogás y contenido en metano de varios substratos.

De esta forma, las experiencias en este campo confirman que la co-digestión de materias primas permite optimizar y estabilizar el proceso de digestión, empleando substratos que se complementen con el objetivo de aumentar la producción de biogás.

### 1.8. Monitorización en plantas de biogás.

La monitorización de los digestores anaerobios es necesaria tanto para asegurar el correcto funcionamiento del proceso, como para asegurar la máxima producción de biogás. Como se ha mostrado con anterioridad, la digestión anaerobia en un proceso complicado en el que multitud de bacterias y procesos actúan simultáneamente. Por lo

que es imprescindible conocer el estado de la digestión con el fin de prevenir fallos en el proceso. La digestión anaerobia puede ser monitorizada midiendo la conversión del sustrato a la entrada y la salida del digestor, analizando el sustrato del digestor, la producción de biogás, las comunidades microbianas o la actividad microbiana, como se muestra en la Figura 1.7 (Boe, 2006).



**Figura 1.7:** Control de parámetros del proceso de digestión anaerobia.

Dependiendo del tipo de digestor y de la finalidad del mismo (producción de biogás, tratamiento de aguas residuales...) los parámetros a analizar así como la frecuencia de los mismos será diferente. En el caso de las plantas agrícolas de biogás los parámetros monitorizados son los siguientes (Clemens, 2007):

- Sustrato de entrada.
- Sustrato del digestor:
  - pH.
  - Sólidos totales (TS) y sólidos orgánicos totales (oTS).
  - Alcalinidad. Relación FOS/TAC.
  - Ácidos grasos volátiles (AGV).
  - Nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ).
- Temperatura.
- Biogás cantidad y calidad.

En las plantas agrícolas de producción de biogás la monitorización *online* (en tiempo real) es muy poco frecuente debido a los altos costes de adquisición y mantenimiento (Boe, 2006; Wolf *et al.*, 2009). El método más utilizado para el control y optimización de proceso en la actualidad es la realización de análisis de laboratorio del sustrato del digestor (Wolf *et al.*, 2009). Dichos análisis realizados con regularidad han resultado ser eficientes, caracterizando el proceso con precisión. A continuación se realiza una revisión bibliográfica del control los parámetros anteriormente mencionados así como los umbrales dentro de los cuales se considera que el proceso de digestión sigue una pauta normal de funcionamiento.

### 1.8.1 Sustrato de entrada.

El sustrato de entrada junto con el biogás producido nos permite medir el rendimiento del proceso, expresado en metros cúbicos de gas por tonelada de materia utilizada ( $m^3/t$ ). Como se ha indicado con anterioridad cada sustrato tiene un potencial de producción de biogás. En el caso de la co-digestión este varía ampliamente dependiendo de las materias primas utilizadas, así como de la proporción de cada componente en la mezcla; por ejemplo la producción de biogás por co-digestión de residuos ganaderos y cultivos energéticos puede ser de hasta  $222 m^3$  de biogás/t mezcla de 44% de residuo ganadero y 56% de silo de maíz (PROBIOGAS, 2009). En la siguiente tabla se muestran algunos ejemplos de co-digestión entre diferentes mezclas y los valores de biogás producido por tonelada de materia prima (MP):

Planta	Sustrato	Co-sustrato	$m^3$ biogás/t MP
<b>Miralcamp (España)</b>	Purín de cerdo	Residuos hortofrutícolas: aceite de soja, residuos de mermelada y de patata	40
<b>Emilia Romagna (Italia)</b>	Purín de vacuno	Resido agroindustrial: cebolla, remolacha, patatas, maíz	100,7
<b>Hodsager (Dinamarca)</b>	Purines de cerdo y vacuno	Residuos de matadero y residuos grasos de la industria de procesado de pescado	40
<b>Juneda (España)</b>	Purín de cerdo	Lodos de depuradora de matadero	20-25
<b>Hegndal (Dinamarca)</b>	Purín de cerdo	Residuos pesqueros	67,6
<b>Biovakka (Finlandia)</b>	Purines de cerdo y vacuno	Lodos industriales y los EDAR	4,7

**Tabla 1.4:** Resumen de plantas de co-digestión anaerobia y su producción de biogás por tonelada de materia empleada (Fuente: Probiogas, 2009).

### 1.8.2 pH

El pH es un parámetro normalmente fácil de medir ya sea en laboratorio o en tiempo real mediante electrodos (Vanrolleghem, 1994). Sin embargo, se trata de un parámetro relativamente insensible, debido a que si el sistema tiene una alta capacidad tampón los cambios en el pH se producirán días después de que tanto la alcalinidad como los ácidos grasos volátiles (AGV) hayan cambiado (Clemens, 2007). En reactores con una capacidad tampón baja el pH será un indicador del proceso efectivo (Boe, 2006).

Todos los trabajos actualmente publicados coinciden en que el pH en la digestión anaerobia debe tener valores próximos a la neutralidad, aunque los valores límite varían entre autores. El pH óptimo para las bacterias metanogénicas oscila entre 6,7 y 7,5 (Deublein *et al.*, 2008). El “Instituto Alemán para la Energía y el Medio Ambiente” sugiere unos valores óptimos para la digestión anaerobia en plantas agrícolas de biogás entre 6,8 y 7,5 (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e., 2004). La empresa Bioreact ha publicado un estudio estadístico definiendo valores para el proceso estable en la digestión de residuos animales y cultivos energéticos que determina el rango del pH entre 7,4 y 8 (Hölker, 2010). Burke (2001) establece el pH óptimo en sistemas de digestión anaerobia de residuos lecheros entre 6,8 y 8,5. La frecuencia con la que esta prueba debe realizarse debe ser al menos de una vez al día, tomando como muestra el sustrato de digester (digestato) (Gerardi, 2003).

### 1.8.3 Alcalinidad. Relación FOS/TAC.

La alcalinidad es una medida de la capacidad tampón del medio, y supone una alternativa mejor que el pH para detectar la acumulación de AGV en el reactor (Boe, 2006; Campos Pozuelo, 2001). Esta puede ser determinada en laboratorio mediante una valoración de la muestra a pH 4.4 (Boe, 2006) y para asegurar la estabilidad del digester debe mantenerse por encima de 2.500 mg/L (Campos Pozuelo, 2001). La alcalinidad parcial o alcalinidad del bicarbonato guarda una correlación empírica con los AGV.

Para determinar dicha relación el “Centro Alemán de Investigación Agrícola” desarrolló el denominado análisis de FOS/TAC, el cual responde a las siglas *Flüchtige Organische Säuren*, es decir, ácidos orgánicos volátiles medidos en mg ácido acético/L, y *Totales Anorganisches Carbonat*, esto es, carbonato inorgánico total medido en mg

CaCO<sub>3</sub>/L. Dicho análisis determina el cociente de la concentración ácida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación (Lossie *et al.*, 2008). Una relación inaceptable FOS/TAC es normalmente la primera alerta de un fallo en el proceso. Gerardi (2003) establece una relación aceptable FOS/TAC entre 0,1 y 0,5, siendo óptima con valores entre 0,1 y 0,2. Iza en 1995 recomienda no sobrepasar un valor de 0,3-0,4 para evitar la acidificación del reactor. Otros autores indican que la relación FOS/TAC debe estar en un rango entre 0,1 y 0,35, para un digestor estable (Switzenbaum *et al.*, 1990). Por último, la empresa alemana DEULA-Nienburg proporciona los siguientes valores empíricos y reglas para la evaluación de las relaciones FOS/TAC recogidos en la Tabla 1.5.

Valor de la relación FOS/TAC	Antecedentes	Medida
>0,6	Excesiva sobrealimentación de biomasa	Interrumpir la adición de biomasa
0,5-0,6	Excesiva entrada de biomasa	Agregar menos biomasa
0,4-0,5	La planta está muy cargada	Vigilar la planta más estrechamente
0,3-0,4	La producción de biogás es máxima	Mantener constante la entrada de biomasa
0,2-0,3	La entrada de biomasa es muy baja	Aumentar lentamente la entrada de biomasa
<0,2	La entrada de biomasa es bajísima	Aumentar rápidamente la entrada de biomasa

**Tabla 1.5:** Valores empíricos y reglas para la evaluación de las relaciones FOS/TAC (fuente: DEULA-Nienburg)

La frecuencia con la que esta prueba debe realizarse debe ser al menos de una vez a la semana, tomando como muestra el digestato (Gerardi, 2003).

#### 1.8.4 Ácidos grasos volátiles.

Los ácidos grasos volátiles (AGV) son los principales intermediarios de la digestión anaerobia, siendo el acetato el mayor precursor de la producción de metano en el digestor anaerobio (Gerardi, 2003). Su acumulación se asocia a la inestabilidad del sistema y el balance entre productores y consumidores (Switzenbaum *et al.*, 1990). Los AGV pueden ser determinados en su conjunto mediante valorización o componente a

componente mediante cromatografía de gas o cromatografía líquida a alta presión (en inglés, *High Pressure Liquid Chromatography* (HPLC)). Este último método determina el ácido acético, ácido propionico, ácido butírico, ácido iso-butírico, ácido valérico y ácido iso-valérico, aportando por tanto mayor información (Clemens, 2007). El rango de valores aceptable para los AGV puede medirse como la relación entre ácido acético y ácido propionico, siendo esta 2:1 o como la acumulación de ácido acético, con un valor máximo aceptable de 1.600 mg/l (Hölker, 2010). Ahring *et al.* en 1995 establecieron que la concentración de ácido acético por debajo de 3.000 mg/l no produce disminución en la producción de metano, mientras que otros autores afirman concentraciones de ácido acético por encima de 1.000 mg/l para pH inferior a 7 resultan perjudiciales para la síntesis de metano (Deublein *et al.*, 2008). La frecuencia con la que esta prueba debe realizarse debe ser de una o dos veces a la semana, tomando como muestra el digestato (Gerardi, 2003).

### 1.8.5 Nitrógeno amoniacal.

Los residuos ganaderos contienen altas concentraciones de compuestos nitrogenados que producen formas amoniacales al hidrolizarse durante la digestión anaerobia. El nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) es un elemento importante en la producción de metano por parte de los microorganismos, sin embargo, una excesiva concentración puede limitar su crecimiento (Campos Pozuelo, 2001). La inhibición aumenta con el aumento del pH y varía con la temperatura del proceso, siendo mayor a altas temperaturas (proceso termófilo) (Deublein *et al.*, 2008). Para su determinación se utiliza el “Método *Kjeldahl*”, consistente en la mineralización de la muestra formando sulfato amónico, el cual produce la liberación del amonio, que se destila y determina mediante una valoración (APHA, 1998). Sin embargo, de acuerdo a la norma de la Unión Europea UNE EN 25663 se puede modificar por determinación directa del ion amonio en el mineralizado por espectrofotometría a 655nm, debido a su laboriosidad (UNE EN 25663, 1994).

El rango de valores para un digestor estable en condiciones termófilas es de 1.500 a 3.000 mg/l de amonio (Hölker, 2010). Para otros autores la inhibición comienza cuando la concentración es superior a 1.500 mg/l, siendo tóxica al alcanzar a 30.000 mg/l (Deublein *et al.*, 2008). Gerardi (2003) establece los siguientes efectos según el rango de nitrógeno amoniacal en digestores anaerobios (Tabla 1.6).

Concentración NH <sub>4</sub> -N	Efecto
50-200 mg/l	Beneficioso
200-1000 mg/l	No efectos adversos
1500-3000 mg/l	Inhibidor a pH>7

**Tabla 1.6:** Efectos del rango de nitrógeno amoniacal en digestores anaerobios.

### 1.8.6 Sólidos totales (TS) y sólidos orgánicos totales (oTS).

La composición del sustrato de entrada en el digestor no solo influye en la producción de biogás, debido a la diferente tasa de producción de biogás de cada sustrato, sino que también es un parámetro útil para medir la eficacia del proceso (Clemens, 2007). Por ello es importante conocer la materia seca o sólidos totales (TS) y los sólidos orgánicos totales (oTS) o sólidos volátiles (SV) (Campos Pozuelo, 2001). Estos se determinan en laboratorio semanalmente mediante la desecación del sustrato del digestor.

El rango de valores para un digestor estable en un proceso de digestión húmeda es TS inferior al 10% y oTS inferior al 8% (Hölker, 2010). El Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León sugiere un valor óptimo de TS entre 7 y 9% (Cófreces, 2004). El “Institute for Agrobiotechnology Tulln” de la Universidad de Viena establece el óptimo entre el 6 y el 10% (Steffen *et al.*, 1998). Por último, el “Agri-Food and Biosciences Institute” (AFBI) establece el óptimo de TS en el 6% (Frost *et al.*, 2010).

### 1.8.7 Temperatura.

La temperatura debe ser controlada en continuo, ya que sus variaciones afectan significativamente a la actividad microbiana y a la cantidad y calidad del gas obtenido (Gerardi, 2003). Como se ha explicado con anterioridad el proceso se suele desarrollar a dos rangos de temperaturas: mesófilo entre 25 y 45°C, y termófilo entre 45 y 65°C. Para medir la temperatura se instalan sensores en el interior de digestor, almacenando y visualizando los datos mediante un programa informático (Imagen A2.1 del Anejo II) o

mediante termómetros instalados en la parte exterior del digestor (Imagen A2.2 del Anejo II).

### 1.8.8 Cantidad y calidad del biogás.

La calidad del biogás debe ser medida en continuo mediante analizadores de biogás por infrarrojos que determinan la composición en metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Otros medidores de gas pueden analizar simultáneamente tanto el metano y dióxido de carbono, como ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), oxígeno y amoníaco (NH<sub>3</sub>). Los valores aceptables de metano en el biogás son habitualmente superiores al 50%, ya que este valor garantiza un funcionamiento continuo y eficiente de las unidades de cogeneración (Wolf *et al.*, 2009). La cantidad de biogás producido es una medida inmediata de cambios en el proceso biológico. Puede ser medido mediante medidores de gas, medidores ultrasónicos de flujo o medidores de flujo oscilatorio (Vanrolleghem, 1994).

A modo de resumen se muestran los valores límite de cada parámetro para cada autor en la Tabla 1.7.

	pH	FOS/TAC	AGV (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	TS (%)				
Deublein & <i>et al.</i> , (2008)	6,7-7,5	Switzen -baum, (1990)	0,1-0,35	Deublein & <i>et al.</i> , (2008)	1.000	Deublein & <i>et al.</i> , (2008)	<1.500	Hölker, (2010)	10
FNR, (2009)	6,8-7,5	Iza, (1995)	0,3-0,4	Hölker, (2010)	1.600	Hölker, (2010)	1.500-3.000	Cófreces, (2004)	7-9
Hölker, (2010)	7,4-8,0	Gerardi, (2003)	0,1-0,5	Ahring & <i>et al.</i> , (1995)	3.000	Gerardi, (2003)	<1.500	Steffen & <i>et al.</i> , (1998)	6-10
Burke, (2001)	6,8-8,5	DEULA Nienbur	0,3-0,4					Frost & <i>et al.</i> , (2010)	6

**Tabla 1.7:** Revisión bibliográfica de los valores límite de cada parámetro monitorizado.