

## ANEXO 7

### MEMORIA TÉCNICA DE RESULTADOS

#### **1. DATOS DESCRIPTIVOS**

- > Título del Proyecto: Valorización energética de residuos: análisis de la combustión conjunta de biogás y gases de pirólisis (piro-BIOGAS)
- > Fecha de inicio: 13 de Septiembre de 2016      Fecha fin: 30 de Noviembre de 2017
- > Nombre del Grupo de Investigación: Ingeniería Química, Ambiental y Bioprocesos
- > Subvención concedida por la Fundación HERGAR (en euros): 2000

Indicar las personas que han participado en el proyecto subvencionado, así como la entidad a la que pertenecen.

Apellidos, nombre
Sánchez Morán Marta Elena
Martínez Morán Olegario
Gómez Barrios Xiomar
Fernández Rodríguez Camino

Institución a la que pertenecen
Universidad de León

#### **1. Resumen y objetivos del proyecto**

La temática del proyecto es el aprovechamiento energético de residuos mediante el uso conjunto de procesos de digestión anaerobia y pirólisis. Para ello, se ha realizado un estudio de los rendimientos energéticos de estos procesos y las ventajas asociadas a la utilización del material digerido en una segunda etapa para la alimentación de una unidad de pirólisis. Se plantea el aprovechamiento conjunto de los gases de pirólisis y el biogás obtenido en sistemas de combustión.

En general los procesos de combustión y pirólisis se encuentran enfocados hacia sistemas de tratamiento a gran escala, presentándose una baja cobertura en aplicaciones en las que se desea el tratamiento de volúmenes relativamente pequeños de residuos. Las alternativas que ofrece el mercado en la actualidad son de alto coste, y por tanto en este proyecto se han evaluado los rendimientos energéticos de sistemas conjuntos de digestión anaerobia y pirólisis que comprendan el aprovechamiento de los combustibles gaseosos generados.

El mercado objetivo al que intenta cubrir la demanda se corresponde con instalaciones ganaderas, agro-industriales e industria alimentaria de tamaño medio y pequeño para las cuales no resulta viable en la actualidad una instalación para el tratamiento de sus residuos debido al elevado coste que presentan este tipo de sistemas.

Con este proyecto se pretende incentivar el uso de recursos renovables que en la actualidad se consideran como residuos para generar una mezcla de biogás y gases de pirólisis para la producción de energía. Con esta propuesta, se favorece la reducción de emisiones asociadas a los gases de efecto invernadero procedentes de combustibles fósiles. El desarrollo de esta propuesta también favorece la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno, dado que los gases combustibles generados presentan una menor temperatura de combustión al encontrarse enriquecidos con CO<sub>2</sub>, reduciendo por tanto la generación de NO térmico.

La propuesta de trabajo comprende el estudio de los rendimientos conjuntos de los sistemas de digestión y pirólisis, la evaluación de la estabilidad de llama de la mezcla de los gases generados bajo distintos

escenarios de composición del gas y la modificación de un motor alternativo de 4 tiempos para su operación con la mezcla gaseosa para la evaluación de la operación de dicho motor en términos del rendimiento de la combustión y las emisiones generadas.

### Objetivos (general y específicos):

El objetivo general es la evaluación del aprovechamiento energético de residuos agrícolas mediante los procesos conjuntos de digestión anaerobia y pirolisis del residuo, evaluando los fenómenos asociados a la combustión de las mezclas gaseosas: biogás – gases de pirolisis.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Evaluación de los rendimientos de producción de biogás de mezclas de residuos agrícolas y las características del biogás generado bajo diferentes condiciones de operación.
2. Evaluación de las propiedades térmicas y análisis cinético de la pirolisis del material digerido y su co-pirolisis con diferentes residuos agrícolas.
3. Evaluar el comportamiento de la mezcla biogás – gases de pirolisis en sistemas de combustión
4. Análisis de los rendimientos energéticos y evaluación económica del aprovechamiento conjunto mediante digestión anaerobia y pirolisis.

## 2. Descripción de la relación de actividades desarrolladas durante la ejecución del proyecto.

### Tarea 1. Caracterización de los materiales digeridos

Se realizó una caracterización físico-química de materiales digeridos derivados de residuos ganaderos y residuos agrícolas. También, se analizaron digeridos procedentes del tratamiento de lodos de estaciones depuradoras de agua residual (EDAR).

Para la caracterización del contenido en demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales y volátiles (ST, SV), conductividad y alcalinidad se emplearon los métodos estandarizados (APHA, 1998).

Para la determinación del análisis elemental, las muestras se secaron en estufa durante 24h y posteriormente se analizaron en un analizador CHN Carlo-Erba 1108 (EA 1108) siguiendo la norma ASTM 4239. Para el análisis inmediato (porcentaje de humedad, materia volátil y cenizas), se siguieron las normas UNE-EN 14774-168 1:2010, UNE-EN 15148:2010 y UNE-EN 14775-2010, respectivamente.

Los resultados obtenidos se encuentran resumidos en las tablas 1 y 2:

**Tabla 1.** Caracterización digeridos

Muestra	DQO (g/L)	ST (%)	SV(%)	Conductividad (mS/cm)	Alcalinidad (g/L)
Digerido Estiércol	35,7	2,5	1,6	7,6	7,7
Digerido Purín	26,8	3,8	2,1	13,3	9,5
Digerido EDAR	12,7	1,3	0,8	7,3	1,3
Digerido FORSU	28,3	2,9	2,0	-	1,7
Digerido Codigestión Lodo/Lactosuero	12,8	1,5	0,9	-	1,1
Digerido Codigestión Lodo/residuos grasa	16,5	1,7	1,1	-	1,9

Tabla 2. Análisis elemental e inmediato

Muestra	C(%)	H(%)	N(%)	S(%)	Cenizas(%)	Materia volátil (%)	C Fijo (%)
Digerido Estiércol	37,6	4,6	3,8	0,4	26,0	64,0	10,0
Digerido Purín	41,2	5,5	3,4	0,5	33,4	61,7	4,9
Digerido EDAR	38,2	5,3	4,7	0,8	38,4	54,5	7,1
Digerido FORSU	46,2	6,0	1,6	0,2	17,1	68,9	14,0
Digerido Codigestión Lodo/Lactosuero	28,2	4,1	4,1	1,1	43,8	48,8	7,4
Digerido Codigestión Lodo/Residuos grasa	32,7	4,6	4,2	1,0	36,7	54,4	8,9

## Referencias

A.P.H.A. (1998), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., American Public Health Association, Washington, DC, USA, 1998.

## Tarea 2. Evaluación de las propiedades térmicas

Se realizó un análisis termogravimétrico a muestras de purín fresco, recogido en una granja ubicada en las proximidades de León, y a muestras de digerido obtenido tras un tratamiento de digestión anaerobia en condiciones mesofílicas (Temperatura de operación 35 °C).

Para la preparación de las muestras antes de la realización del análisis, éstas fueron secadas y a continuación sometidas a un pretratamiento de molienda en un molino de bolas 200 MM de Retch para conseguir un material homogéneo, con tamaño de partícula inferior a 1 mm.

El análisis termogravimétrico se realizó en un equipo TA SDT2960. Se aplicó una velocidad de calentamiento de 10 °C/min hasta una temperatura de 700 °C, y se empleó como gas nitrógeno con un caudal de 100 mL/min.

Los resultados obtenidos en las pruebas se corresponden con los termogramas representados en las figura 1.

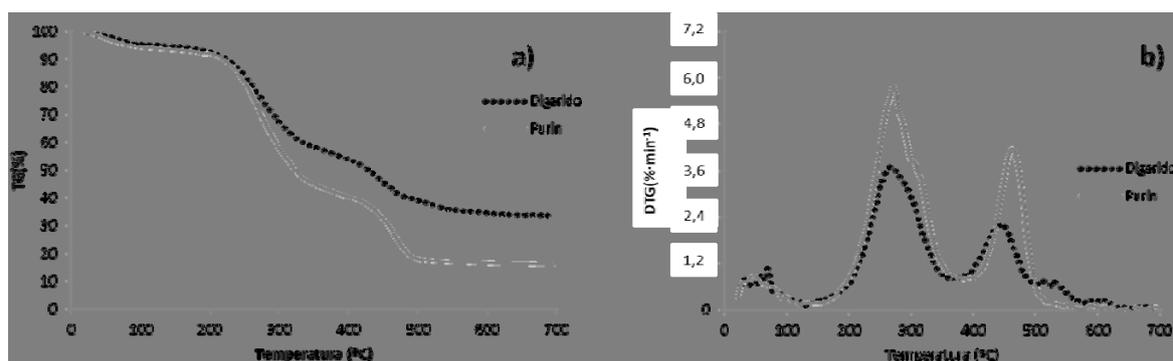


Figura 1. a) Curvas TG de la pirolisis de las muestras de purín y de digerido anaerobio. b) Curvas DTG de la pirolisis de las muestras de purín y de digerido anaerobio.

### Tarea 3. Evaluación de análisis cinético de residuos y sus mezclas

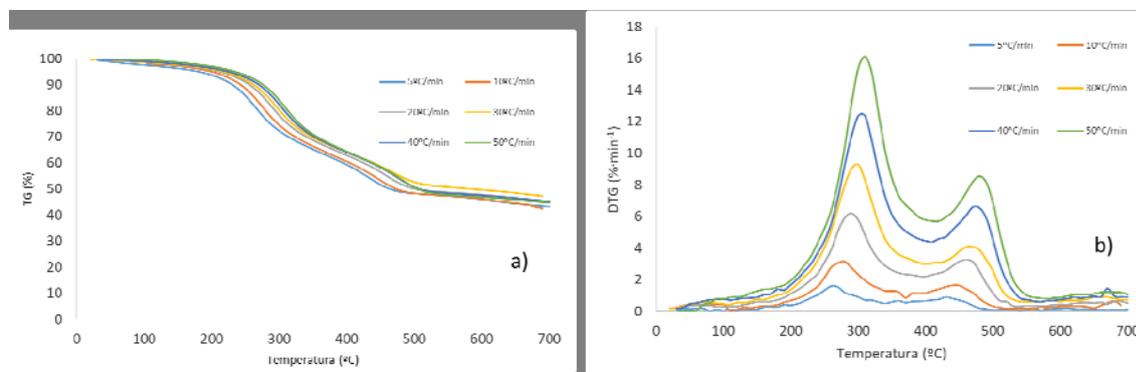
Se evaluó la co-pirólisis de mezclas de digerido procedente de experimentos de digestión anaerobia de purín con material lignocelulósico. Se probaron tres mezclas con diferentes proporciones en peso seco de digerido-material lignocelulósico (25:75, 50:50 y 75:25). Además, se evaluó el comportamiento de cada uno de los materiales por separado.

El análisis termogravimétrico en una atmósfera de  $N_2$  se realizó utilizando una termobalanza de Texas Instruments, modelo SDT Q600, que permite registrar simultáneamente medidas de pérdida de masa (TG) y velocidad de pérdida de masa (DTG). Las diferentes muestras fueron calentadas hasta temperaturas de 700 °C, aplicando diferentes velocidades de calentamiento (5, 10, 20, 30, 40 y 50 °C  $min^{-1}$ ).

Se realizó un tratamiento de los resultados experimentales empleando los modelos matemáticos isoconversionales de Ozawa-Flynn-Wall (OFW) y Vyazovkin. Mediante esta metodología es posible obtener diferentes ecuaciones que permiten estimar algunos de los principales parámetros cinéticos de interés. Se estimaron las energías de activación de los materiales por separado y de cada una de las mezclas. Para intentar predecir posibles efectos sinérgicos en el desarrollo de la pirólisis de estas mezclas, los valores experimentales fueron comparados con los valores teóricos estimados de acuerdo a la composición de cada mezcla.

En la Figura 2, se muestran los perfiles TG de pérdida de masa en función de la temperatura. En todas las condiciones evaluadas, se observó que un aumento de la velocidad de calentamiento, estuvo asociado a una temperatura más elevada para alcanzar una determinada pérdida de masa.

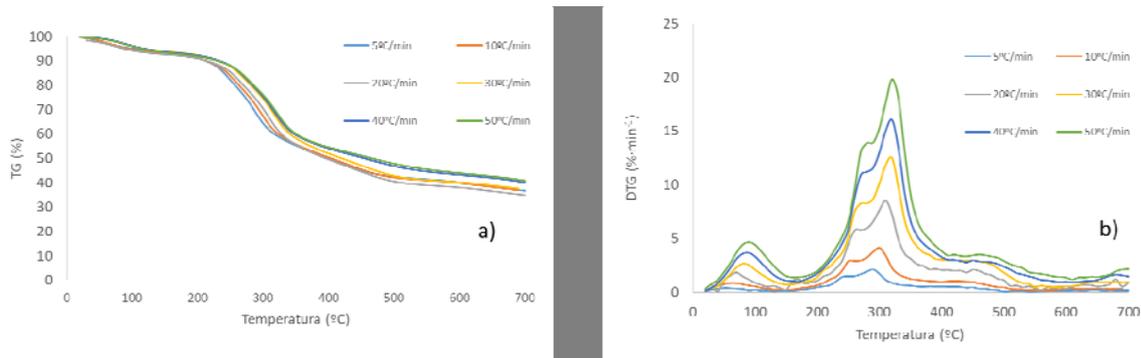
En la representación TG, este efecto se corresponde con un desplazamiento lateral de las curvas. Esta variación, se puede asociar a los efectos combinados de la transferencia de calor a diferentes velocidades de calentamiento que suponen un retardo sobre la cinética de la descomposición.



**Figura 2.** a) Curvas TG de la pirólisis de las muestras de digerido anaerobio a diferentes velocidades de calentamiento. b) Curvas DTG de la pirólisis de las muestras de digerido anaerobio a diferentes velocidades de calentamiento.

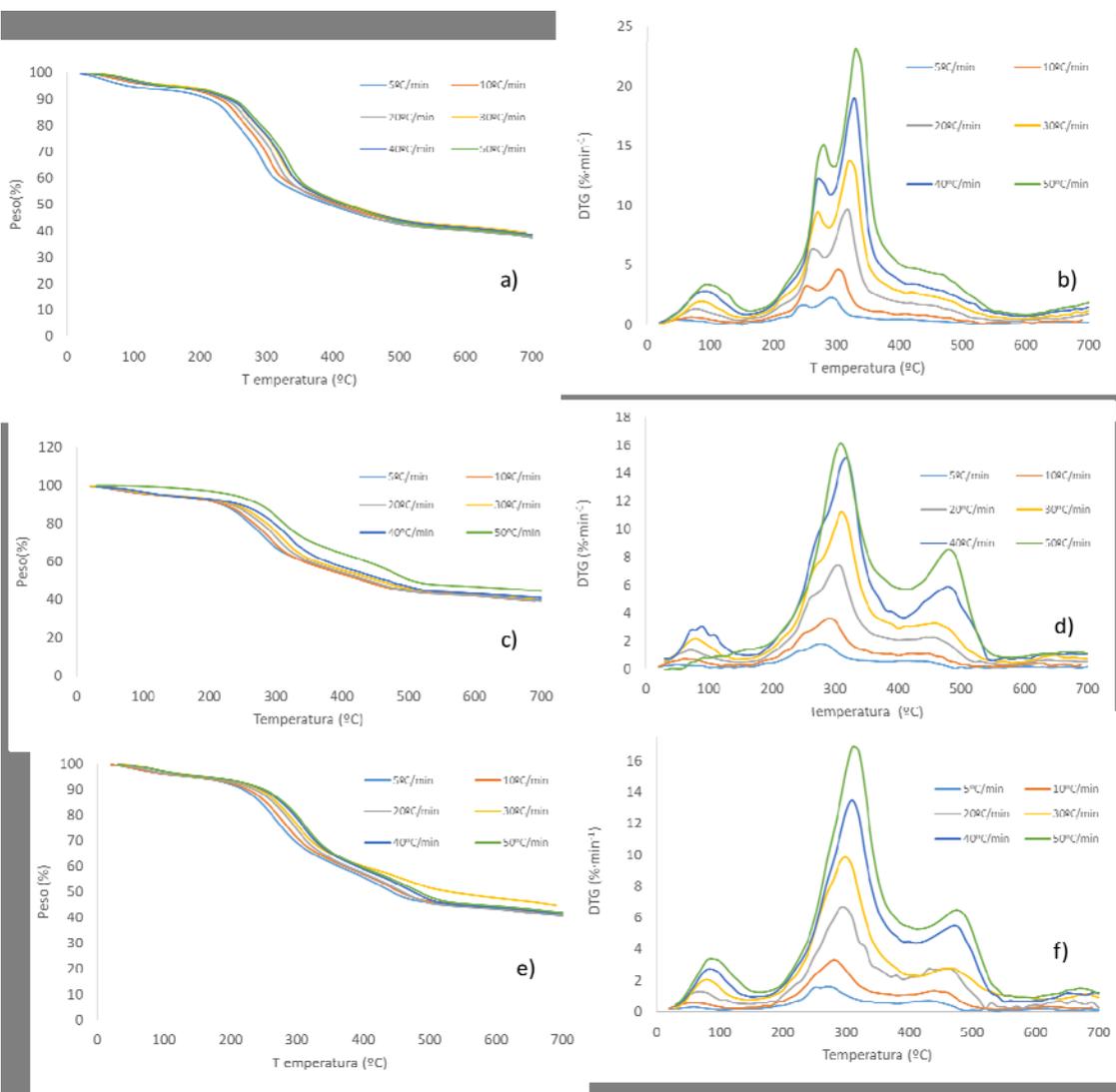
En los termogramas DTG se pudieron diferenciar 2 picos característicos que se corresponden, el primero de ellos en un rango de temperatura 200-400 °C, con la descomposición del material de origen celulósico y hemicelulósico. A continuación, a temperaturas superiores, se produce la descomposición de la lignina que se caracteriza por una velocidad más lenta.

Los termogramas del material lignocelulósico se caracterizaron por un perfil diferente. A pesar del pretratamiento de secado de las muestras, en todos los ensayos se pudo diferenciar una fase entre 50-180 °C que se asocia con la pérdida de masa debida al contenido de humedad, probablemente adquirido durante la fase de almacenamiento. Únicamente, se pudo diferenciar un pico entre 180-550 °C, característico de la descomposición de materia orgánica, incluyendo las fracciones de celulosa, hemicelulosa y lignina. Este pico presenta un pequeño hombro, comprendido entre 220 y 280 °C, asociado a la amplia variedad de compuestos que se pueden descomponer en este rango de temperaturas.



**Figura 3.** a) Curvas TG de la pirolisis de las muestras de material lignocelulósico a diferentes velocidades de calentamiento. b) Curvas DTG de la pirolisis de las muestras de material lignocelulósico a diferentes velocidades de calentamiento.

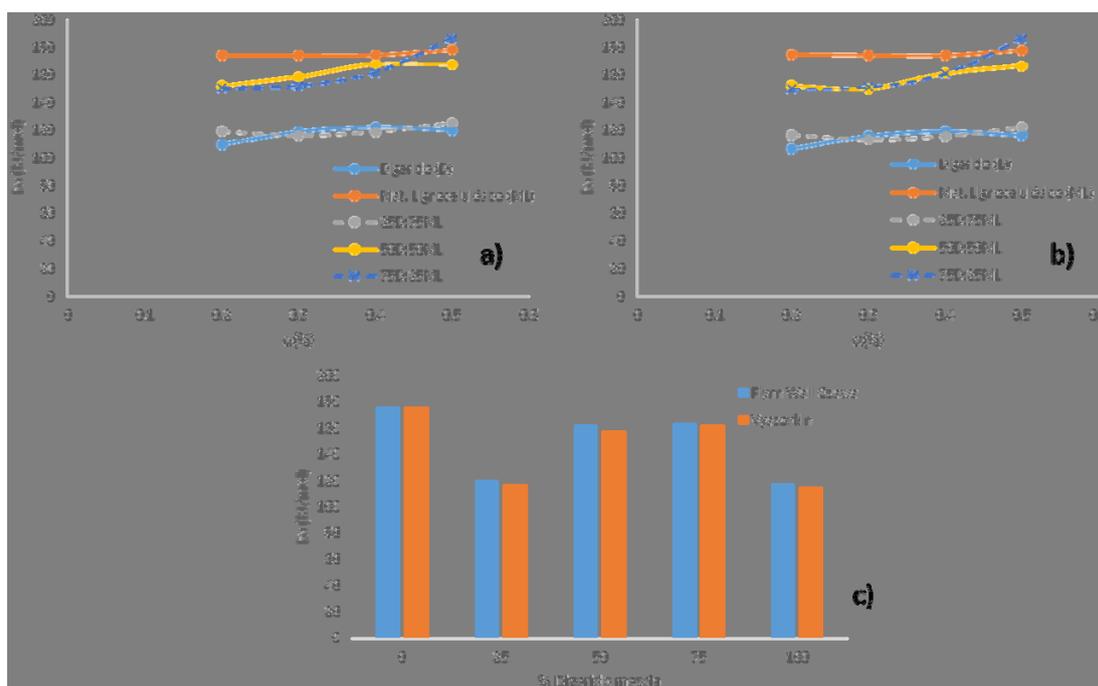
A continuación, se evaluó la pirolisis de las mezclas con diferentes fracciones de digerido y material lignocelulósico (Figura 4).



**Figura 4.** Curvas TG y DTG de la pirolisis de las muestras de mezcla digerido anaerobio y material lignocelulósico a diferentes velocidades de calentamiento. a) y b) mezcla 25 digerido: 75 material lignocelulósico. c) y d) mezcla 50 digerido: 50 material lignocelulósico. e) y f) mezcla 75 digerido: 25 material lignocelulósico.

En las muestras evaluadas se pudo observar que tanto el perfil de los termogramas como las velocidades máximas de pérdida de masa por volatilización, se asemejaron a los resultados correspondientes al componente mayoritario en cada mezcla, que fueron obtenidos durante las pruebas individuales.

El tratamiento matemático de los resultados experimentales se realizó mediante los métodos isoconversionales de Vyazovkin y Flynn Wall Ozawa (Ounas et al.2011). Los valores de energía de activación en función del grado de conversión estimados se muestran en la figura 5.



**Figura 5.** a) Resultados de Ea en función de la conversión obtenidos a partir del método de Flynn Wall Ozawa. b) Resultados de Ea en función de la conversión obtenidos a partir del método de Vyazovkin. c) Comparación de los resultados de Ea media de la pirolisis de muestras individuales y mezclas estimados mediante los métodos de Flynn Wall Ozawa y Vyazovkin

No se apreciaron diferencias significativas en los resultados obtenidos aplicando cualquiera de los dos métodos. Para el caso de la pirolisis de digerido de purín y la mezcla preparada con un 25% de digerido, se observaron los valores inferiores de Ea, con resultados en torno a 120,0 kJ/mol. Una reducción de la Ea, puede sugerir un posible efecto catalizador de dicha mezcla, que podría favorecer las condiciones del desarrollo del tratamiento térmico.

## Referencias

Ounas, A., Aboukhas, A., El harfi, K., Bacaoui, A. Yaacoubi, A. [2011]: "Pyrolysis of olive residue and sugar cane bagasse: Non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis" *Bioresource Technology*, 102 (24), 11234-11238

## Tarea 4. Evaluación de los rendimientos de pirolisis y digestión anaerobia

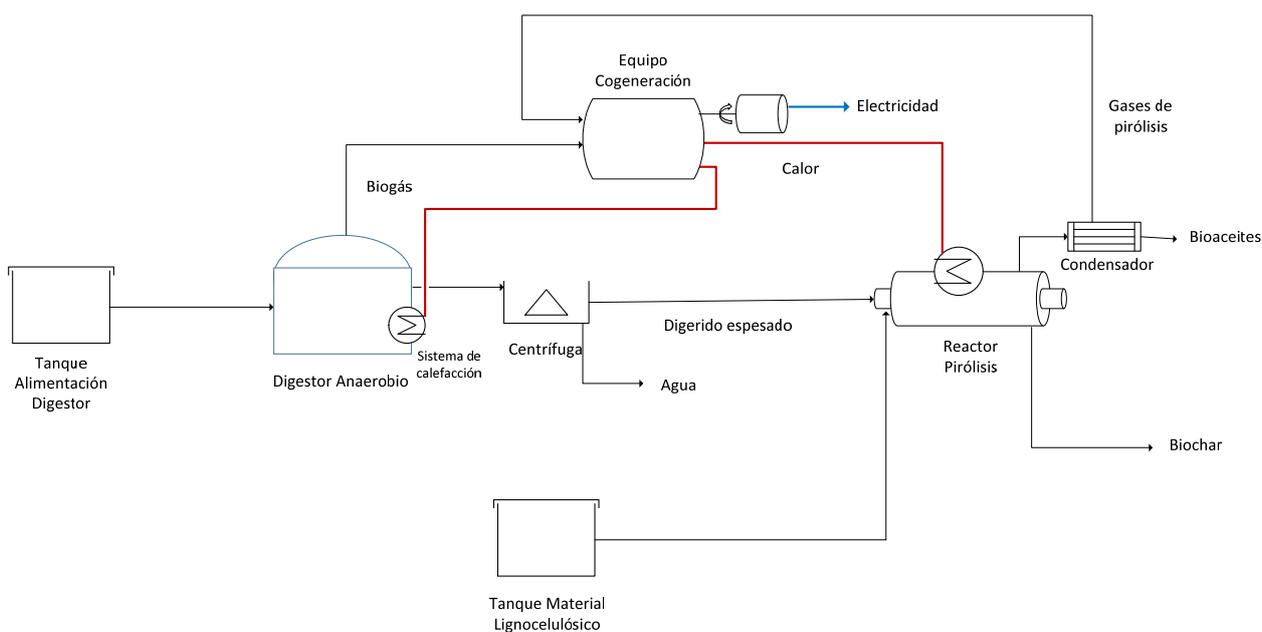
Utilizando datos de producción de biogás de sistemas de digestión anaerobia de purín y los resultados de caracterización cinética de la pirolisis de dichos digeridos, se evaluaron los rendimientos de pirolisis y digestión anaerobia. Considerando una base de cálculo de 100 kg de alimentación en peso seco.

Se evaluaron los siguientes sistemas:

- Escenario 1 Digestión anaerobia de estiércol y pirolisis del digerido
- Escenario 2 Digestión anaerobia de purín y pirolisis del digerido
- Escenario 3 Digestión anaerobia de purín y pirolisis del digerido mezclado con material lignocelulósico.
- Escenario 4 Digestión anaerobia de lodo EDAR y pirolisis del digerido
- Escenario 5 Co-digestión anaerobia de lodo EDAR con lactosuero y pirolisis del digerido
- Escenario 6 Co-digestión anaerobia de lodo EDAR con grasas y pirolisis del digerido

Un esquema de la planta evaluada se representa en la figura 6. Los elementos principales son:

- Tanque almacenamiento alimentación
- Digestor anaerobio
- Unidad de espesado del digerido. Centrífuga
- Reactor de pirolisis
- Equipo de cogeneración. Combustión de gases de pirolisis y biogás
- Condensador para recuperación de la fracción de gases condensables, bioaceite.



**Figura 6.** Esquema de la planta combinada de digestión anaerobia y pirólisis

Para estimar la demanda calorífica del digestor se supuso una temperatura de alimentación promedio de 15 ° C, asumiendo una disminución máxima de la temperatura de 0,56 ° C por día [Perti et al. 2010]. Para los cálculos, se emplearon las propiedades del agua, debido al alto contenido de agua en el sustrato. Los principales datos utilizados en la simulación se resumen en la tabla adjunta.

Durante la pirólisis de digeridos anaerobios, uno de los principales consumos de energía se debe al calor que se consume debido a la evaporación del agua. Por este motivo, se reduce el contenido de humedad hasta un 78% mediante un tratamiento previo de separación mecánica en centrífugas.

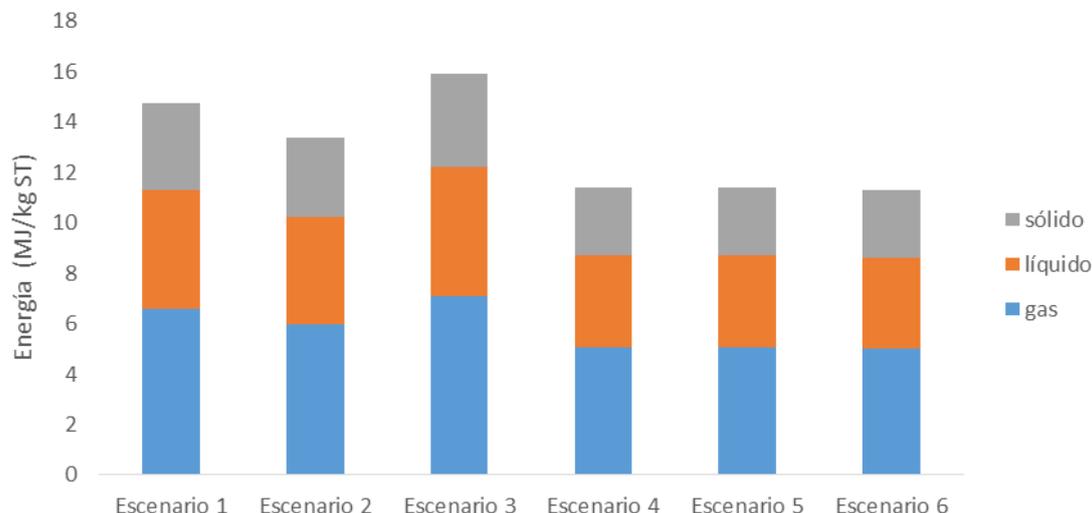
**Tabla 3.** Resumen de las características de los procesos considerados

Alimentación	Purín	Estiércol	Mezcla Digerido Purín-mat. ligno celulósico
<b>Caracterización</b>			
Contenido ST(%)	5,7	3,7	5,7
SV (% ST)	79,0	76,2	79,0
<b>Caracterización Digerido/Alimentación</b>			
<b>pirólisis</b>			
Contenido ST (%)	3,8	2,6	3,8
SV (%ST)	55,3	65,4	55,3
Humedad (%)	96,2	96,3	96,2
<b>Alimentación (kg ST/d)</b>			
Producción específica biogás (L CH <sub>4</sub> /kg SV)	100	100	100
CH <sub>4</sub> (%)	180	234	180
CH <sub>4</sub> (%)	62	60	62
Poder calorífico del CH <sub>4</sub> (MJ/kg)	35,6	35,6	35,6
Temperatura de operación del digestor (°C)	35	35	35
<b>Distribución de productos (500 °C)</b> [Sánchez et al. 2007]			
Biochar (%)	39	39	39
Líquidos de pirólisis (%)	34	34	34
Gas sintético (%)	27	27	27
HHV biochar (MJ/kg)	12,2	12,2	12,2
HHV líquidos pirólisis (MJ/kg)	24	24	24
HHV gas sintético (MJ/m <sup>3</sup> )	24,2	24,2	24,2

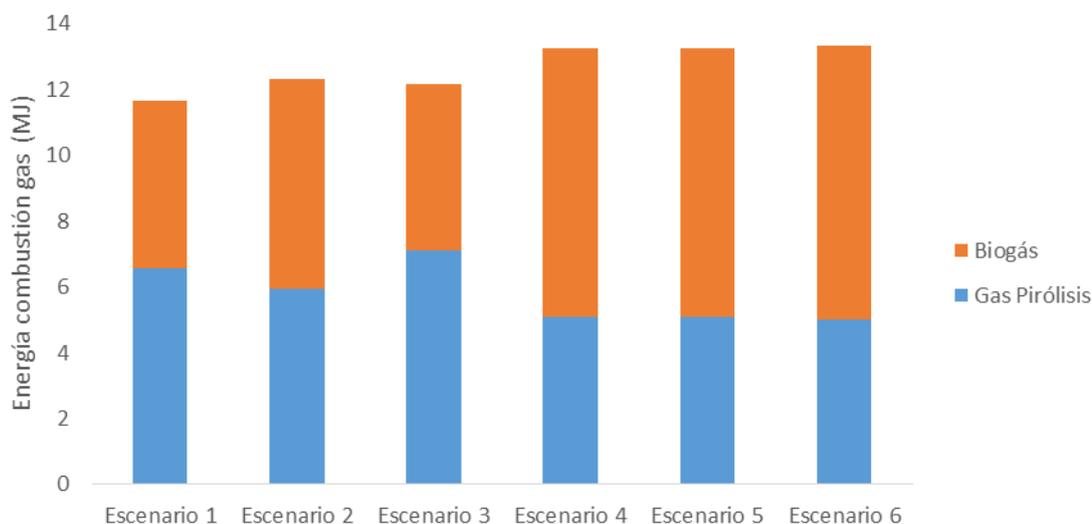
	Lodo EDAR	Codigestión Lodo-Lactosuero	Codigestión Lodo-Grasa
<b>Caracterización</b>			
Contenido ST(%)	1,9	2,3	2,4
SV (% ST)	74,9	83,7	79,4
<b>Caracterización Digerido</b>			
Contenido ST (%)	1,3	1,4	1,7
SV (%ST)	61,5	1,02	64,7
Humedad (%)	98,7	98,6	98,3
<b>Alimentación (kg ST/d)</b>			
Producción específica biogás (L CH <sub>4</sub> /kg SV)	100	100	100
CH <sub>4</sub> (%)	306	274	293
CH <sub>4</sub> (%)	60	60	62
Poder calorífico del biogás (MJ/kg)	35,6	35,6	35,6
Temperatura de operación del digestor (°C)	35	35	35
<b>Distribución de productos (500 °C)</b> [Sánchez et al. 2007]			
Biochar (%)	39	39	39
Líquidos de pirólisis (%)	34	34	34
Gas sintético	27	27	27
HHV biochar (MJ/kg)	12,2	12,2	12,2
HHV líquidos pirólisis (MJ/kg)	24	24	24
HHV gas sintético (MJ/m <sup>3</sup> )	24,2	24,2	24,2

En la figura 7, se muestran los resultados de la distribución de producción de energía en los diferentes productos de pirólisis. La fracción de productos líquidos y gaseosos se caracteriza por un potencial energético superior.



**Figura 7.** Generación energética asociada a cada fracción de productos de pirólisis

El sistema en el que se trata digerido anaerobio de purín mezclado con material lignocelulósico, permite un ligero aumento de la producción energética (Figura 8).

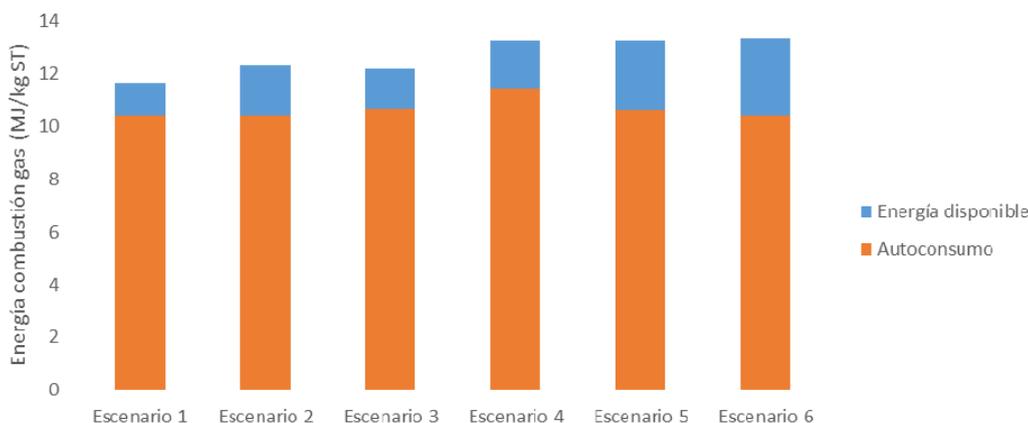


**Figura 8.** Generación energética de la combustión del biogás y los gases de pirólisis

Los sistemas de tratamiento lodos EDAR y sus variaciones de co-digestión con diferentes residuos agroindustriales, se caracterizaron por una producción energética superior asociada a la generación de biogás. Sin embargo, en el caso de los residuos ganaderos, la generación de energía en el proceso de pirólisis tiene mayor importancia, por lo que se puede considerar una opción recomendable la instalación de plantas combinadas para este tipo de residuos

Se evaluó si los sistemas eran auto-sostenibles energéticamente determinando la energía de la fracción gaseosa de pirólisis y del biogás para así evaluar su uso en el propio proceso. La figura 9, recoge los resultados de energía de autoconsumo, requerida para cubrir las necesidades de calefacción del digestor y el proceso de pirólisis. Como se puede observar, en todos los escenarios la energía producida es

suficientemente grande y se dispone de un excedente o energía disponible que se puede destinar a cubrir otro tipo de necesidades térmicas de la instalación.



**Figura 9.** Distribución de la energía disponible y la energía destinada a autoconsumo de la instalación

## Referencias

Pertl, A., Mostbauer, P., Obersteiner, G. [2010] : "Climate balance of biogas upgrading system" *Waste Management*, 30, 92-99

Ibarrola, R., Shackley, S., Hammond, J.. [2012] "Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: a life cycle carbon assessment" *Waste Management*, 32, 859-868

Nicole L. Hammer, Akwasi A. Boateng, Charles A. Mullen, M. Clayton Wheeler. [2013] " Aspen Plus® and economic modeling of equine waste utilization for localized hot water heating via fast pyrolysis" *Journal of Environmental Management*, 128 (15), 594-601

## Tarea 5. Estudio de la estabilidad de llama

Se evaluó el proceso de combustión evaluando las propiedades de los gases y la temperatura alcanzada en la combustión. Para ello, se determinó la temperatura adiabática de llama para diferentes mezclas de combustible, variando la cantidad de aire, al emplear diferentes valores de dosado ( $\phi$ ). Esta determinación, se realizó mediante el planteamiento de un balance entálpico a reactivos y productos, considerando una reacción de combustión completa.

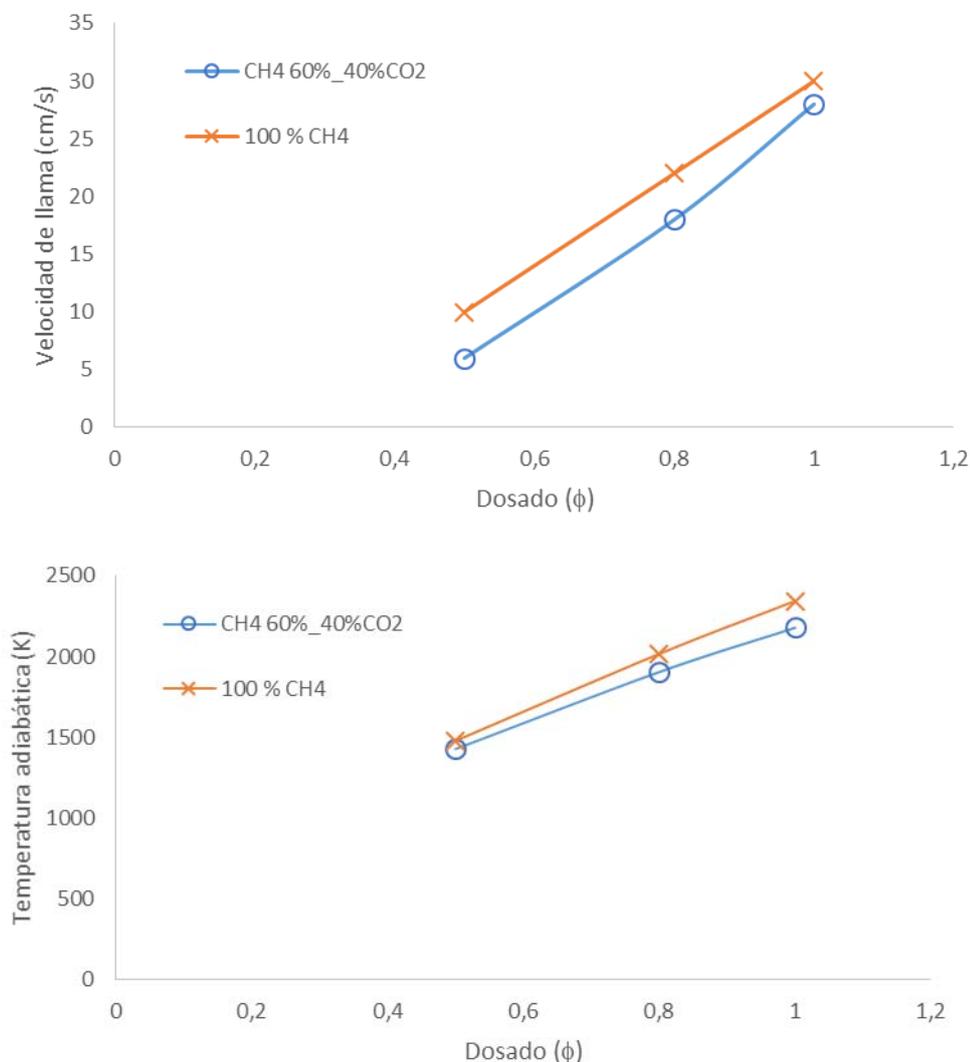


Para la evaluación de la estabilidad de llama se utilizó un equipo PA Hilton provisto de rotámetro de gases, válvula de seguridad, mezclador aire combustible y quemadores.

De forma experimental solo fue posible evaluar el análisis de estabilidad de llamas de combustión de CH<sub>4</sub> y mezclas de biogás CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>.

Para comparar los resultados obtenidos con los de otras posibles mezclas se realizó una búsqueda bibliográfica de trabajos de combustión empleando diferentes mezclas gaseosas.

En las mezclas de CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>, al aumentar el contenido de CO<sub>2</sub> se produjo un descenso de la velocidad de propagación de la llama y un descenso de la temperatura adiabática y consecuentemente, una disminución de la velocidad de reacción y de propagación de la llama.

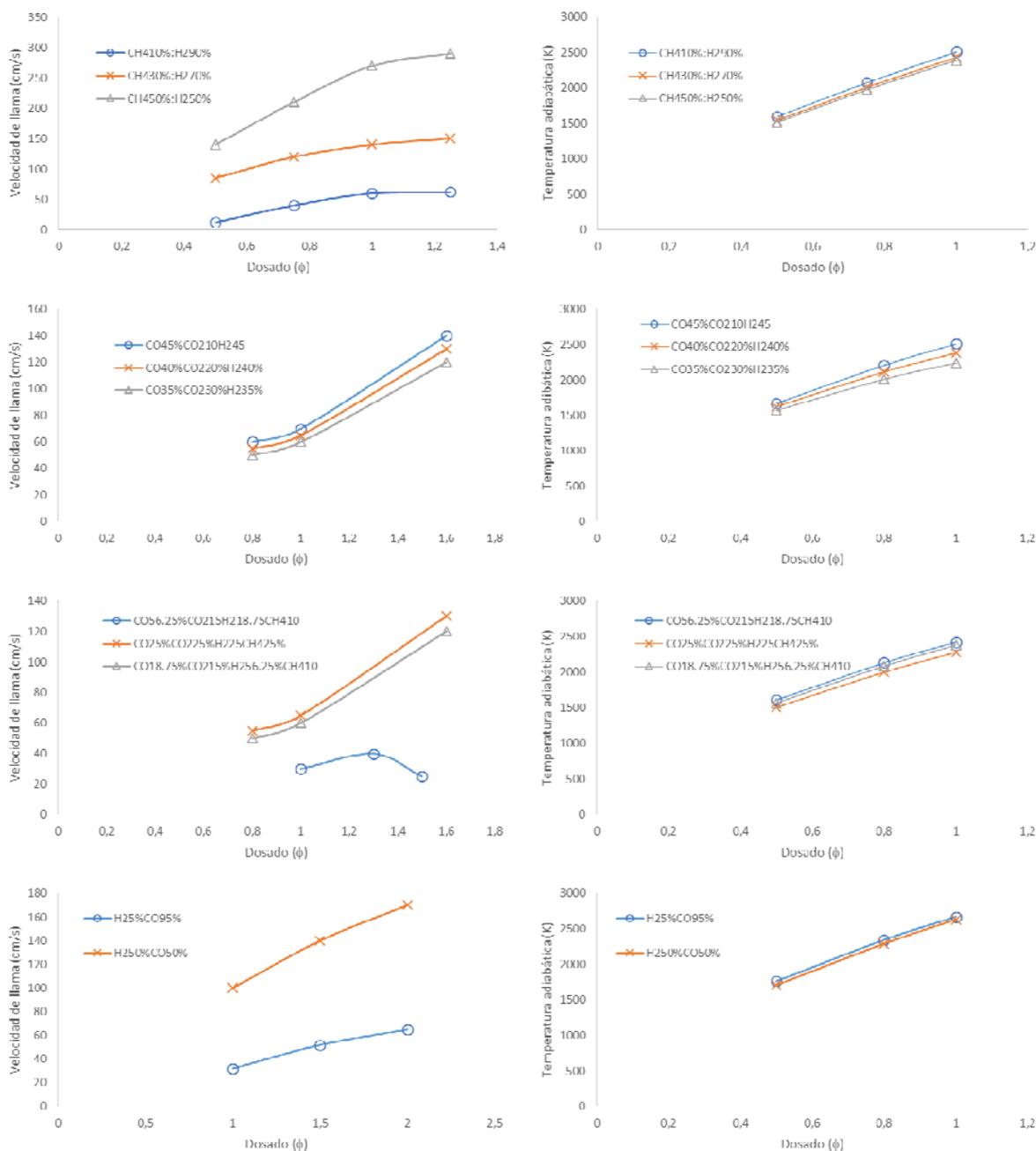


**Figura 10.** Velocidad de llama y temperatura adiabática para CH<sub>4</sub> y una mezcla 60% CH<sub>4</sub>\_40% CO<sub>2</sub>

Al evaluar los datos disponibles en fuentes bibliográficas, correspondientes a estudios de combustión de mezclas de CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, CO/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>, CO/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>/CO, se observa que un aumento del contenido de H<sub>2</sub> supone un aumento de la velocidad de llama y de la temperatura adiabática. Sin embargo, un aumento del contenido de CO<sub>2</sub> supone el efecto contrario (Figura 11).

El aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la mezcla de reactivos, supone una dilución de los gases combustibles y un aumento del calor específico de la mezcla que provoca un descenso de la temperatura adiabática.

Estos resultados sugieren que la mezcla del biogás con gas de pirolisis compuesto principalmente por H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y otro tipo de hidrocarburos de cadena superior puede mejorar las propiedades de la combustión.



**Figura 11.** Velocidad de llama para diferentes mezclas de combustibles (Lee et al.2017; Lapalme et al.2014) y temperatura adiabática de llama en función del dosado.

## Referencias

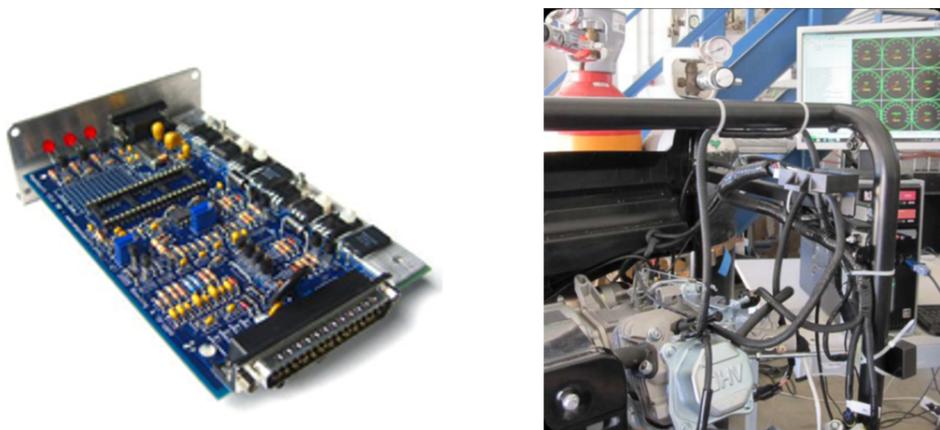
Lee , H. C., Mohamad ,A.A., Jiang L.Y. [2017]: "A detailed chemical kinetics for the combustion of H<sub>2</sub>/CO/CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> fuel mixtures" Fuel, 193, 294–307

Lapalme, D., Seers P. [2014]: "Influence of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and initial temperature on H<sub>2</sub>/CO laminar flame speed" International Journal of Hydrogen Energy, 39, 3477-3486

## Tarea 6. Evaluación de la combustión en un motor alternativo

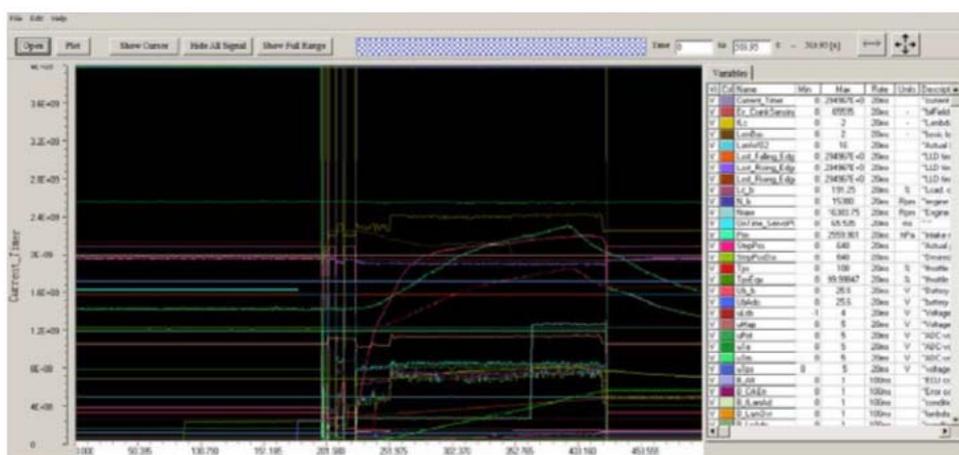
Para la evaluación de la combustión de la mezcla de biogás y gas de pirólisis como combustible en un motor alternativo de baja potencia resultó necesario ajustar tanto el ángulo y tiempo de inyección como el ángulo de ignición para de esta manera adaptarse a las diferentes condiciones de combustión de la mezcla de gases combustibles (estequiometría aire-combustible y velocidad de propagación de llama, principalmente).

Para ello, se utilizó una unidad de control electrónico MegaSquirt (Figura 12) basada en los microcontroladores Motorola MC68HC908GP32. Este tipo de unidades ECU (Engine Control Unit) basadas en lenguaje de programación ensamblador permiten controlar el funcionamiento de un motor alternativo actuando como una unidad de inyección de combustible programable que controla no solo la inyección del combustible sino también el sistema de ignición CDI (Capacitive Discharge Ignition).



**Figura 12.** Sistema de control MegaSquirt y ensayos de sintonización de los parámetros del motor para su operación con combustibles gaseosos

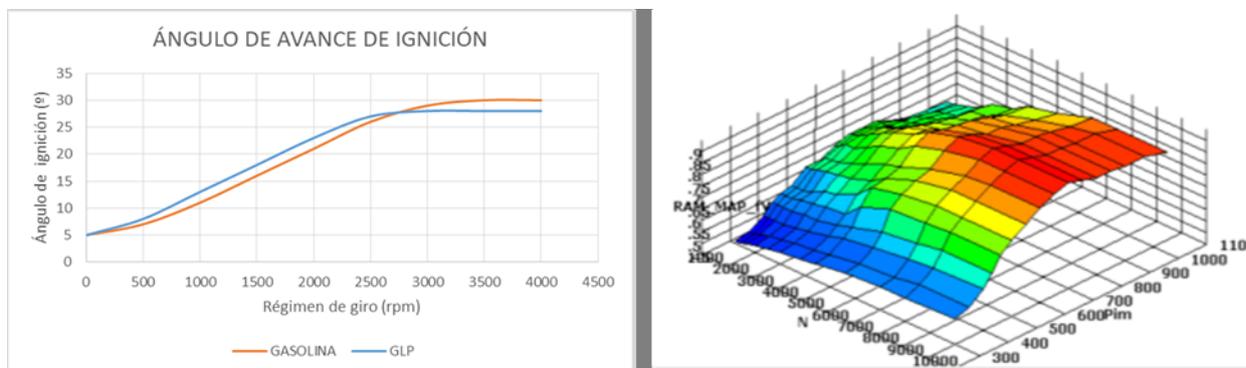
La configuración de estos parámetros se llevó a cabo a través de un software implementado (Figura 13) de tal forma que no solo permite la sintonización de los parámetros de control, sino que también permite visualizar otros parámetros de funcionamiento del motor en tiempo real como el régimen de revoluciones o el consumo de combustible instantáneo.



**Figura 13.** Software de control representando la evolución de diferentes parámetros del motor

La realización de estos ensayos de sintonización de los parámetros de funcionamiento del motor permitió construir diferentes mapeos de inyección para las distintas mezclas de combustibles empleadas (Figura 14),

así como las curvas de variación del ángulo de ignición dependientes de la velocidad de propagación de llama de la mezcla.



**Figura 14.** Curvas de variación del ángulo de ignición a diferentes revoluciones para varios combustibles y mapeo de inyección

Se analizó la composición de los gases del tubo de escape mediante un analizador de gases TESTO 350, con capacidad de medición en línea de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>.

**Tabla 4.** Análisis de los gases de escape durante los ensayos

Componente	concentración
O <sub>2</sub>	18,41 %
CO	1730 ppm
CO <sub>2</sub>	1,41 %
H <sub>2</sub>	28 ppm
SO <sub>2</sub>	3 ppm
NO <sub>x</sub>	9,8 ppm
NO <sub>2</sub>	9,8 ppm

### Tarea 7. Estudio de viabilidad técnica y económica

La evaluación económica ha sido realizada considerando una planta de biogás estándar dedicada al tratamiento de purines. Para ello se ha establecido como base de cálculo granjas de cerdos para consumo de carne. Las características asociadas a este tipo de instalación se resumen en la tabla 5.

**Tabla 5.** Características de la instalación tipo evaluada

Parámetro	
Número de unidades (cerdos)	1000
Peso del animal (kg)	110
Producción de purines (kg/día Udd)	15
Producción de purín al año (kg/año Udd)	5475
Producción anual de purín (t/año)	5500
Número de granjas consideradas para el estudio económico	6

Las características del purín utilizado para el estudio se presentan en la siguiente tabla. Se considera la mezcla del purín recogido tras las operaciones de lavado de la planta. Se asume que el purín debe ser recogido y transportado desde las granjas de ganado hasta la instalación centralizada para el tratamiento, de modo que los costes de operación de la planta deben considerar una partida importante para el traslado de dicho material y a su vez para el transporte del material lignocelulósico.

**Tabla 6.** Características del purín

<i>Características químicas físicas purín</i>	
Cantidad tratada en la planta de digestión (t/año)	30000
Contenido en sólidos totales (g ST/L)	100
Contenido en sólidos volátiles (%)	85
Contenido en N (%)	3.2
<i>Características Biogás</i>	
Producción específica de metano (L CH <sub>4</sub> /kg SV)	180
PCI CH <sub>4</sub> (MJ/m <sup>3</sup> )	35.6

Para la planta de digestión se ha considerado la construcción de dos digestores, cada uno con capacidad de 2600 m<sup>3</sup> de volumen, con almacenamiento de gas en cabeza y desulfuración del biogás en el interior del mismo mediante la inyección de una cantidad mínima de aire en cabeza del digestor. Por tanto, no se considera una unidad adicional de desulfuración del biogás

**Tabla 7.** Resumen de las características del sistema de digestión

<i>Características de la planta de digestión</i>	
Volumen total (m <sup>3</sup> )	5300
Tiempo de retención hidráulica (d)	50
Flujo de alimentación (m <sup>3</sup> /d)	82
Destrucción de sólidos volátiles (%)	65
Rendimiento eléctrico de la unidad de co-generación (%)	30
Necesidades eléctricas de la instalación (% de la energía producida)	25
Energía contenida en el biogás producido (MJ/d)	44850
Distancia media recorrida en el transporte/viaje (km/viaje)	30



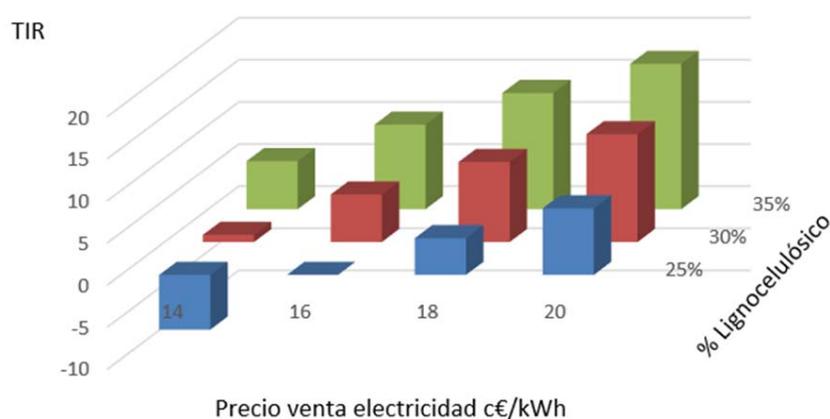
**Figura 14.** Digestor anaerobio y planta de pirolisis

Para la planta de pirolisis se considera la utilización de material lignocelulósico realizando una evaluación del efecto de la cantidad de este material a tratar sobre la rentabilidad de la inversión conjunta. Como distancia máxima de recorrido se consideran 50 Km. La evaluación se realiza considerando que el gas y el bio-aceite de pirolisis se valoriza en la misma planta para la producción de electricidad.

**Tabla 8.** Características de la planta de pirolisis

Características de la planta y rendimientos del proceso	
Material lignocelulósico alimentado (% respecto a la cantidad de purín)	25
Rendimiento del procesos de pirolisis	
Gas (% , PCI 19 MJ/m3)	38.7
Líquido (% , PCI 21.35 MJ/kg)	36
Char (%)	25.2
Energía contenida en gas y bio-aceite (MJ/d)	290000
Necesidades energéticas de la planta (% respecto a la energía producida)	40

Los resultados obtenidos evaluando diferentes precios de venta de la electricidad desde 14 hasta 20 céntimos de euro por kWh entregan un valor positivo de la tasa interna de retorno (TIR) a partir de la utilización de una proporción del 30% de material lignocelulósico con respecto a la cantidad total de purín tratado por la planta de digestión. Si se compara con el tratamiento convencional de purines, se obtiene que dicha planta no sería rentable a menos que se contara con una subvención del 50% de los costes de instalación y un precio de venta de la electricidad de al menos 30 c€/kWh. La rentabilidad de este tipo de plantas escasamente consigue valores positivos de TIR si se dispone de un uso eficiente del calor generado en la co-generación eléctrica.



**Figura 15.** Análisis de sensibilidad considerando la variación del precio de electricidad y cantidad de material lignocelulósico en la mezcla de pirolisis.

En la siguiente tabla se detallan las características de la instalación considerada para el proceso conjunto de digestión anaerobia y pirolisis. La producción térmica de la planta es suficiente para cubrir las necesidades de calentamiento del digestor y del automantenimiento de la unidad de pirolisis. El excedente de calor se utiliza para el secado del digerido. Una ventaja adicional que presenta esta configuración conjunta es que no se requieren terrenos para la disposición del digerido dado que el mismo se transforma en la unidad de pirolisis convirtiéndose en Char de alta calidad

**Tabla 9.** Características planta conjunta de digestión y pirolisis

Evaluación económica : características de la inversión	(€)
Instalación planta de digestión	1 800 000
Instalación planta pirolisis	1 700 000
Costes Directos	
Compra de terrenos, evaluación inicial, impuestos, tasas, etc	42 000
Adecuación de terrenos, excavación, construcción de carreteras, urbanización del lugar, cavado de zanjas para servicios	63 000
Construcción de edificios, naves, almacenes, laboratorios, cafeterías, adecuación de los mismos	245 000
Instalación de equipos, sistemas de control, tuberías, cableado, aislamientos	2 170 000
Costes indirectos	
Ingeniería y diseño de la instalación, control de gastos	175 000
Construcción y supervisión, servicios temporales, herramientas	420 000
Imprevistos	175 000

A pesar de que la planta de configuración conjunta presenta unos costes de funcionamiento más altos debido a la existencia de la unidad de pirolisis, el escenario evaluado resulta rentable para un coste de venta de electricidad baja, simplemente aumentando la cantidad de biomasa lignocelulósica a tratar. Adicionalmente, si se consideran ingresos por la venta de fósforo obtenido como estruvita a un precio medio de 260 €/t y por la venta de char a un precio de 200 €/t, la planta resultaría rentable para el escenario de mínimos evaluado, es decir a un precio de la electricidad de 14 c€/kWh y una fracción de biomasa lignocelulósica de 25%. Para estas condiciones se consigue un valor de TIR de 10% con un valor del VAN del 956 280 € para una tasa de descuento del 7%. La principal ventaja que presentan los escenarios evaluados es que contrario al tratamiento de purines convencional no se requiere una subvención pública para rentabilizar el proceso.



3. Acciones de difusión y sostenibilidad del proyecto.

- Visita a la Feria Expobioenergía (26-29 Septiembre 2017, Valladolid)
- Artículo revista Tecnología, Ciencia y Educación (CEF-UDIMA)

4. Indicar si se ha seguido la metodología de trabajo propuesta o ha habido alguna variación.

Debido a la reducción de la ayuda económica concedida, no se ha podido realizar la adquisición del sensor para atmósferas explosivas, propuesto en la memoria inicial y se ha tenido que reducir el número de pruebas experimentales con el motor y el analizador de estabilidad de llama.

No fue posible realizar la estimación experimental de la temperatura adiabática a través de un sistema de intercambio de calor.

5. Órganos de evaluación y seguimiento para la consecución de los objetivos fijados. Periodicidad prevista para el seguimiento e indicadores.

Durante el desarrollo del proyecto se han realizado 3 reuniones del grupo de investigación para el seguimiento y coordinación de las actividades. Han permitido la revisión del trabajo realizado y de los principales resultados obtenidos hasta el momento de realización de dicha reunión.

6. Nuevas necesidades para alcanzar los objetivos del proyecto.

Se podría completar el estudio de la estabilidad de llama de las mezclas de combustión con equipos avanzados.

7. Remisión de un artículo científico en el que se exponga su proyecto de investigación y resultados para su posterior publicación en las Revistas Científicas del Grupo CEF & UDIMA.

Se ha elaborado un manuscrito para ser considerado como publicación en la Revista Tecnología, Ciencia y Educación del grupo CEF & UDIMA.

León, 30 de Noviembre de 2017

  
universidad de león  
Grupo Ingeniería Química,  
Ambiental y Bioprocesos  
  
Fdo. Camino Fernández Rodríguez  
(Investigadora Principal)