

Marta Elena Sánchez Morán<sup>1</sup>, Olegario Martínez Morán<sup>2</sup>,  
Xiomar Gómez Barrios<sup>3</sup> y Camino Fernández Rodríguez<sup>4</sup>

# Valorización energética de residuos: análisis de la combustión conjunta de biogás y gases de pirólisis (piro-BIOGÁS)

## Extracto:

En el proyecto piro-BIOGÁS se ha planteado el estudio del aprovechamiento energético de los gases combustibles generados en un proceso conjunto de digestión anaerobia y pirólisis del material digerido. Con esta propuesta se pretende incentivar el uso de recursos renovables, que en la actualidad se consideran residuos, para la producción de energía.

Con la finalidad de cumplir los objetivos propuestos, se han evaluado los rendimientos de producción de biogás de diferentes residuos, junto con las propiedades térmicas y cinéticas de la pirólisis del material digerido.

A partir de los datos obtenidos, se ha planteado el balance energético y el estudio de viabilidad económica en una planta de digestión anaerobia para el tratamiento de purín, integrando una unidad de pirólisis para el digerido, mezclado con material lignocelulósico. Por otro lado, también se ha estudiado el comportamiento durante la combustión de diferentes mezclas biogás-gas pirólisis.

Mediante el análisis de los rendimientos energéticos y la evaluación económica, se observó que el uso combinado del biogás y de los gases de pirólisis permite plantear instalaciones autosostenibles energéticamente, con un excedente de energía que puede cubrir otro tipo de necesidades térmicas en la planta. Se ha comprobado que el comportamiento de la combustión de las mezclas biogás-gas pirólisis está condicionado por el contenido de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, afectando tanto a la velocidad de propagación como a la temperatura de la llama.

**Palabras clave:** pirólisis, biogás, digerido, energía, combustión, lignocelulósico, purines.

## Sumario

1. Introducción
2. Planta combinada de digestión anaerobia y pirólisis
3. Conclusiones y propuestas de trabajo futuro
4. Bibliografía

Fecha de entrada: 01-12-2017

Fecha de aceptación: 17-01-2018

Fecha de revisión: 21-02-2018

<sup>1</sup> M. E. Sánchez Morán, miembro del Grupo de Ingeniería Química, Ambiental y Bioprocesos (IQUIMAB), Instituto de Recursos Naturales de la Universidad de León (España).

<sup>2</sup> O. Martínez Morán, miembro del Grupo de Ingeniería Química, Ambiental y Bioprocesos (IQUIMAB), Instituto de Recursos Naturales de la Universidad de León (España).

<sup>3</sup> X. Gómez Barrios, miembro del Grupo de Ingeniería Química, Ambiental y Bioprocesos (IQUIMAB), Instituto de Recursos Naturales de la Universidad de León (España).

<sup>4</sup> C. Fernández Rodríguez, miembro del Grupo de Ingeniería Química, Ambiental y Bioprocesos (IQUIMAB), Instituto de Recursos Naturales de la Universidad de León (España).

Este artículo se enmarca dentro de la Convocatoria de Ayudas a Proyectos de I+D+i 2016 de la Fundación Hergar (categoría: Investigación aplicada y tecnológica en ingenierías). Los autores agradecen a dicha fundación la ayuda concedida.

# Energy production from wastes: study of biogas and pyrolysis gas combined combustion (piro-BIOGÁS)

## Abstract:

Pyro-BIOGÁS is a project that proposes combined waste management applying anaerobic digestion and pyrolysis processes for recovering energy. This project aims to encourage the use of renewable resources that are currently considered as waste for energy production.

In order to attain the main objectives proposed, it was performed an evaluation of biogas production yields of different waste materials, along with the analysis of thermal and kinetic properties during pyrolysis of digested material.

With this information, energy efficiency and economic feasibility of a combined process of anaerobic digestion of swine manure and pyrolysis of the digestate with lignocellulosic material was studied. On the other hand, burning characteristics of the gas thus obtained were evaluated.

Through the combined use of biogas and pyrolysis gases, self-sufficient systems can be achieved, with extra energy production to be used for other purposes in the installation. It was observed, that burning characteristics, such as flame speed and temperature were affected by  $H_2$  and  $CO_2$  content.

**Keywords:** pyrolysis, biogas, digestate, energy, combustion, lignocellulosic, swine manure.



## 1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta el concepto básico de «biorrefinería», la generación de energías renovables mediante la digestión anaerobia surge como uno de los pilares básicos para conseguir la reducción en el uso de combustibles fósiles y mitigar los impactos asociados al cambio climático. Generalmente, el uso de residuos ofrece muchas oportunidades rentables de valorización, dado su bajo coste y la reducida competencia con otras alternativas.

La digestión anaerobia es un proceso biológico que se desarrolla en condiciones de ausencia de oxígeno. A través de la acción de un consorcio de bacterias anaerobias facultativas y estrictas, se produce la descomposición de la materia orgánica, produciéndose una mezcla de gases y un producto digerido, sólido o líquido.

La mezcla gaseosa es conocida como biogás y está compuesta, principalmente, por metano, dióxido de carbono, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y pequeñas proporciones de otros compuestos gaseosos (Ward, Hobbs, Holliman y Jones, 2008). El biogás presenta unas propiedades que permiten que pueda utilizarse como combustible en calderas, motores o turbinas para generación de calor o electricidad. Por otro lado, el digerido puede caracterizarse por un contenido en materia orgánica que en algunos casos puede superar el 45 % en peso (Cao y Pawlowski, 2013).

**El biogás presenta unas propiedades que permiten que pueda utilizarse como combustible en calderas, motores o turbinas para generación de calor o electricidad**

Tradicionalmente, el digerido obtenido del proceso se suele emplear como enmienda orgánica. Sin embargo, este uso requiere, muchas veces, de su almacenamiento prolongado, el cual, si se lleva a cabo en tanques sin cubierta protectora, repercute en la emisión de gases de efecto invernadero con un impacto superior al que genera el CO<sub>2</sub>. Adicionalmente, deben tenerse en cuenta aspectos como la logística del almacenamiento y el transporte del digerido al sitio de disposición final, las emisiones asociadas a dicho transporte y los límites de aplicación al terreno según los niveles de amonio presentes en dicho material.

Debido a las desventajas citadas, recientemente, se ha optado por evaluar usos alternativos a la aplicación agrícola del material digerido. Estos usos comprenden la valorización energética mediante la combustión, la gasificación y la pirólisis (Kratzeisen, Starcevic, Martinov, Maurer y Muller, 2010; Funke, Mumme, Koon y Diakite, 2013; Monlau, Sambusiti, Antoniou, Barakat y Zabaniotou, 2015). Estas alternativas utilizan calor excedente que se produce en el aprovechamiento energético del biogás para reducir el contenido en humedad del material digerido. El proceso de pirólisis comprende la conversión termoquímica de la materia orgánica a elevadas temperaturas en ausencia de oxígeno para producir gas de pirólisis, bioaceites y biochar. Debido al alto poder calorífico de los gases de pirólisis, el gas obtenido representa una fuente localizada muy importante de producción de energía mediante el uso de motores de combustión interna. El bioaceite también puede ser utilizado como aditivo en los motores diésel convencionales para reducir la emisión de partículas debido a su elevado contenido en compuestos oxigenados. Finalmente, el biochar ha demostrado ser un producto con un alto interés en aplicación agrícola gracias a su capacidad de reducción de la lixiviación y a la pérdida de fertilizantes solubles.

Por otra parte, los sistemas de microgeneración de energía presentan pocas aplicaciones a pesar de la alta demanda expresada por diferentes sectores productivos. El tamaño de muchas explotaciones agrícolas y ganaderas es demasiado pequeño para la instalación rentable de un sistema de digestión que contemple el aprovechamiento del biogás. En la actualidad, los motores destinados a la microgeneración eléctrica presentan costes muy elevados. Debe sumarse también el hecho de que el funcionamiento de motores de com-

**En este proyecto, se planteó un aprovechamiento energético de los gases combustibles generados por un sistema conjunto de digestión anaerobia de residuos y pirólisis del material digerido**

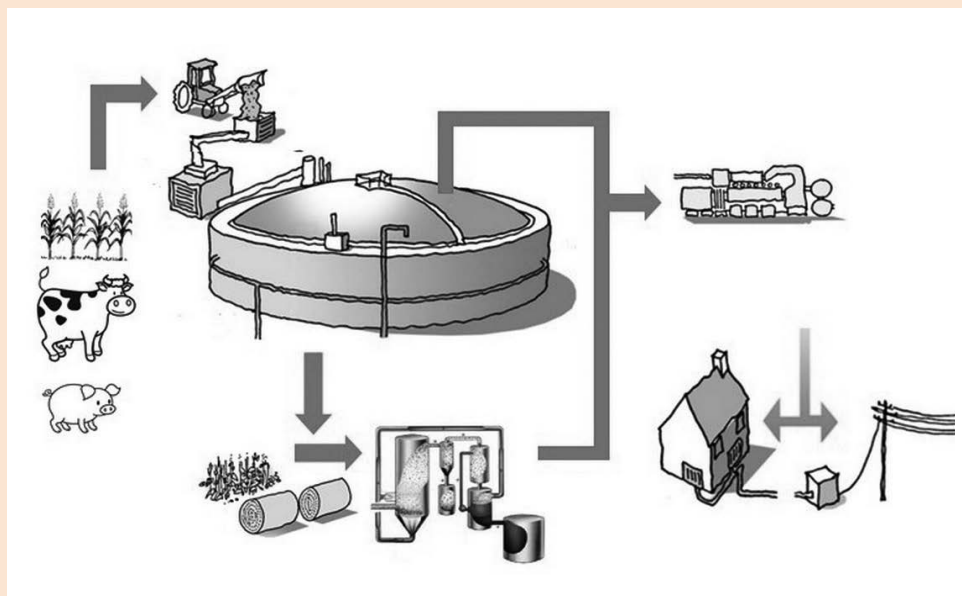
bustión interna operados con biogás ha demostrado presentar dificultades asociadas a la variación del contenido en metano y a la estabilidad de la combustión. En algunos casos, el contenido en metano puede no ser suficiente y, por lo tanto, no generarse la combustión. Los sistemas de almacenamiento de biogás permiten amortiguar dichas variaciones, pero no pueden ejercer un efecto positivo adicional para incrementar la riqueza del gas. La operación de sistemas de combustión que utilicen biogás de forma exclusiva puede ver enormemente incrementada la estabilidad de la combustión gracias al uso conjunto con gases de pirólisis, dado que permitiría aumentar el poder calorífico del gas y, por tanto, reducir las inestabilidades.

En este proyecto, se planteó un aprovechamiento energético de los gases combustibles generados por un sistema conjunto de digestión anaerobia de residuos y pirólisis del material digerido conforme al esquema representado en la figura 1.

En este tipo de instalación, los residuos agrícolas o ganaderos son tratados inicialmente en un digestor anaerobio. A continuación, el digerido es conducido a una unidad de pirólisis donde puede ser tratado de forma individual o en combinación con material ligno-

**El proceso de pirólisis comprende la conversión termoquímica de la materia orgánica a elevadas temperaturas en ausencia de oxígeno para producir gas de pirólisis, bioaceites y biochar**

Figura 1. Esquema de una instalación con tratamiento conjunto de biogás y gases de pirólisis



Fuente: elaboración propia.

lulósico, que presenta compuestos difícilmente biodegradables que dificultan su aplicación en tratamientos de digestión anaerobia. El gas de pirólisis y el biogás se aprovechan como combustibles gaseosos, y la fracción sólida o biochar se puede recuperar y aplicar como combustible sólido o como enmienda orgánica para mejorar la calidad del suelo.

Los objetivos principales que se plantearon en el proyecto fueron:

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

## 2. PLANTA COMBINADA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA Y PIRÓLISIS

A continuación, se presentan los principales resultados correspondientes al estudio de la propuesta de una planta combinada de digestión anaerobia y pirólisis de una mezcla de digerido con material lignocelulósico.

Tras caracterizar los diferentes sustratos, se realizó un estudio termogravimétrico de la copirólisis de mezclas de digerido procedente de experimentos de digestión anaerobia de purín con material lignocelulósico. Se probaron mezclas con diferentes proporciones en peso 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

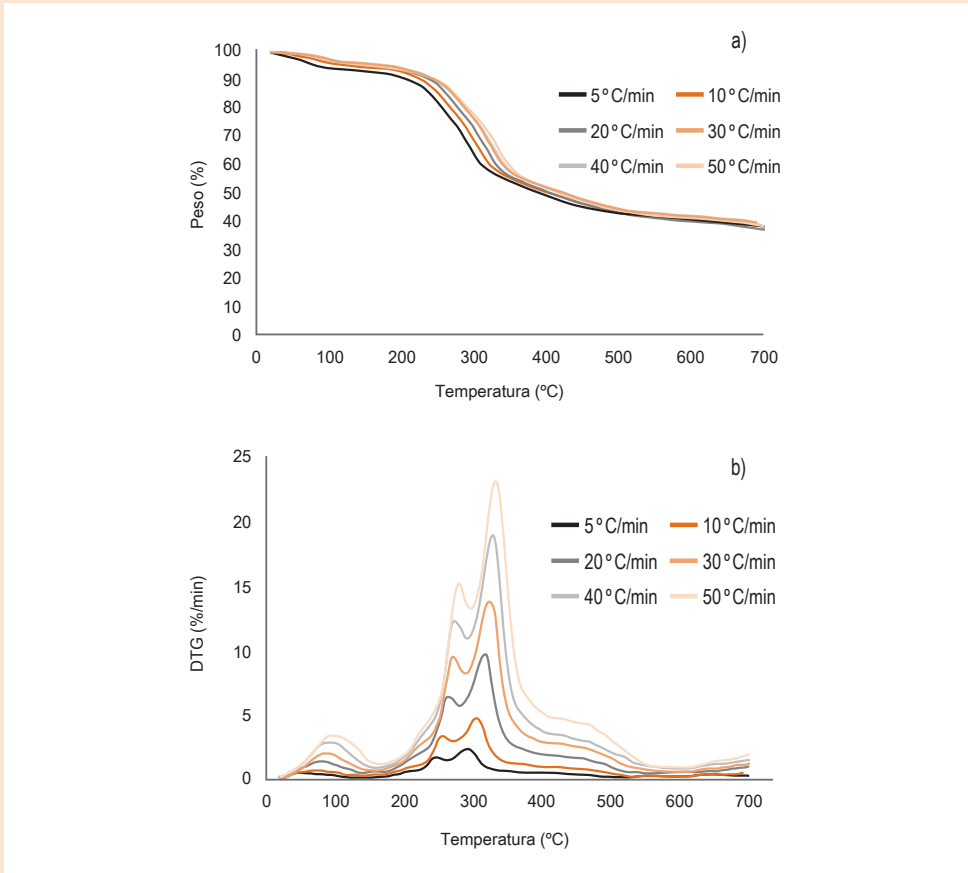
fueron calentadas hasta temperaturas de 700 °C, aplicando diferentes velocidades de calentamiento (5, 10, 20, 30, 40 y 50 °C/min).

Se realizó un tratamiento de los resultados experimentales empleando los modelos matemáticos de Ozawa-Flynn-Wall (OFW) y Vyazovkin (Ounas, Aboulkas, El Harfi, Bacaoui y Yaacoubi, 2011). 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. 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. Curvas TG (gráfico a) y DTG (gráfico b) de la pirólisis de las muestras de mezcla digerido anaerobio y material lignocelulósico a diferentes velocidades de calentamiento



Fuente: elaboración propia.

Los modelos matemáticos de Vyazovkin y Flynn Wall Ozawa (Ounas *et al.*, 2011) permiten estimar los valores de energía de activación ( $E_a$ ) en función del grado de conversión. No se apreciaron diferencias significativas en los resultados obtenidos aplicando cualquiera de los dos métodos. Para el caso de la pirólisis de digerido de purín y de la pirólisis de la mezcla preparada con un 25 % de digerido, se observaron los menores valores de  $E_a$ , con resultados en torno a 120,0 kJ/mol. Una reducción de la  $E_a$  puede sugerir un posible efecto catalizador de dicha mezcla, que podría favorecer las condiciones del desarrollo del tratamiento térmico.

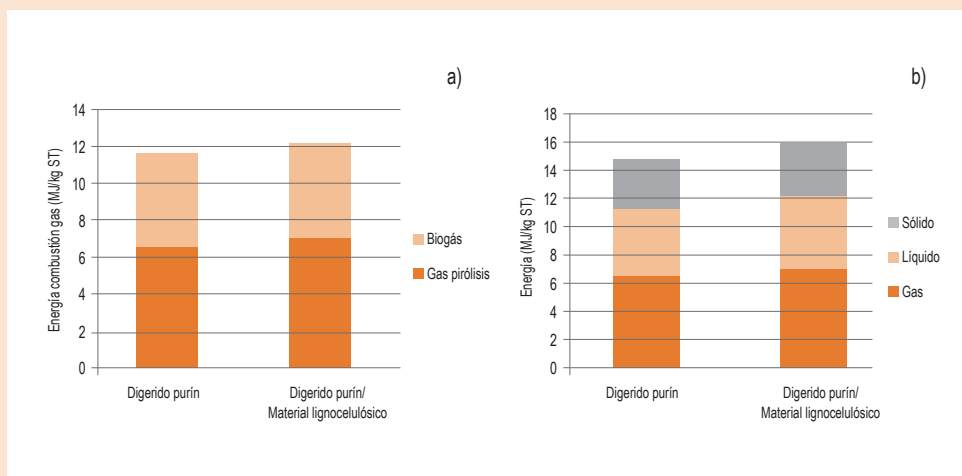
Se realizó una simulación de funcionamiento de una planta de tratamiento combinado de digestión anaerobia y pirólisis para estimar los rendimientos de producción energética. Se utilizaron los datos de producción específica de biogás obtenidos en un sistema de digestión anaerobia mesofílico (a una temperatura de 35 °C) considerando el purín como residuo a tratar (producción específica de metano estimada en 180 L  $CH_4$ /kg SV) junto con los resultados de caracterización cinética de la pirólisis de dichos digeridos. Se aplicó una base de cálculo de 100 kg de alimentación en peso seco. Se consideró una distribución de productos de pirólisis conforme a los resultados obteni-

dos con purines en el trabajo de Sánchez, Martínez, Gómez y Morán (2007). En la planta, se contempló la instalación de una unidad de separación mecánica con centrifugas para reducir el contenido de humedad. Esto es necesario debido a que durante la pirólisis uno de los principales consumos energéticos está relacionado con la evaporación del agua presente en la alimentación.

La energía producida a partir del biogás y del gas de pirólisis, junto con la distribución de energía producida a partir de las distintas fracciones de productos de pirólisis, se representa en la figura 3.

Se evaluó si los sistemas eran autosostenibles energéticamente, determinando la energía de la fracción gaseosa de pirólisis y del biogás para así considerar su posible uso en el propio proceso. La figura 4 recoge los resultados de la energía de autoconsumo requerida para cubrir las necesidades de calefacción del digester 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 3. Generación energética de la combustión del biogás y de los gases de pirólisis (gráfico a). Generación energética asociada a cada fracción de productos de pirólisis (gráfico b)



Fuente: elaboración propia.

**[...] 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**

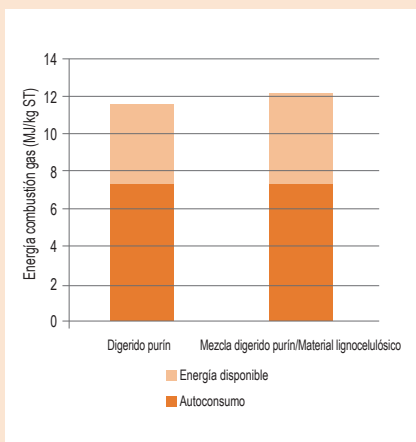
Se planteó la evaluación económica de una instalación con una planta de digestión anaerobia para el tratamiento del purín generado en granjas de cría de cerdos para consumo cármico. Asimismo, se propuso la incorporación de una unidad de pirólisis para el tratamiento del digerido producido, mezclado con diferentes cantidades de material lignocelulósico. En este caso, se planteó una valorización del gas y del bioaceite de pirólisis para la producción de electricidad.

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% del material lignocelulósico con respecto a la cantidad total de purín tratado por la planta de digestión.

El estudio del proceso de combustión se centró en la evaluación de las propiedades de los gases y en la temperatura alcanzada en la combustión de  $\text{CH}_4$  y mezclas de biogás  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ . 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 ( $\phi$ ). Se realizaron pruebas para la evaluación de la estabilidad de llama utilizando un equipo PA Hilton provisto de rotámetro de gases, válvula de seguridad, mezclador de aire combustible y quemadores.

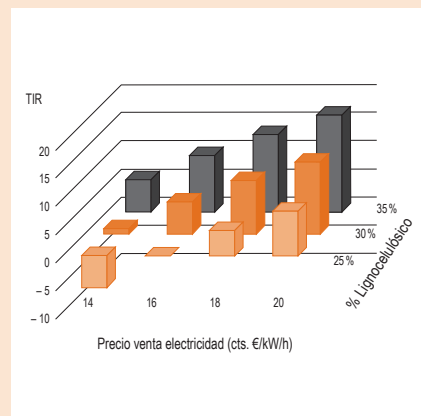
En las mezclas de  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ , al aumentar el contenido de  $\text{CO}_2$ , se produjo un descenso de la velocidad de propagación de la llama y un descenso de la temperatura adiabática y, consecuentemente, una disminución de la velocidad de reacción y de propagación de la llama. El aumento en la concentración de  $\text{CO}_2$  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. Si los resultados obtenidos se comparan con datos publicados de mezclas  $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2/\text{CH}_4$  (Lee, Mohamad y Jian, 2017), se comprueba que un aumento del contenido de  $\text{H}_2$  supone un incremento de la velocidad de la llama y de la temperatura adiabática. Sin embargo, un aumento del contenido de  $\text{CO}_2$  supone el efecto contrario.

Figura 4. Distribución de la energía disponible y de la energía destinada a autoconsumo de la instalación



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Análisis de sensibilidad, considerando la variación del precio de la electricidad y la cantidad de material lignocelulósico en la mezcla de pirólisis



Fuente: elaboración propia.

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 el 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. Para ello, se utilizó una unidad de control electrónico MegaSquirt 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*).

### 3. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE TRABAJO FUTURO

La instalación de plantas combinadas de digestión anaerobia y pirólisis del digerido se plantea como una alternativa viable para el tratamiento de residuos ganaderos y agrícolas. El estudio de los rendimientos de producción de biogás, las propiedades térmicas y el análisis cinético permitió obtener información sobre las fases de desarrollo del proceso de pirólisis y estimar los datos necesarios que se emplearon en el estudio de evaluación energética y de viabilidad económica. El comportamiento de la combustión de las mezclas biogás-gas pirólisis está condicionado por el contenido de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$  de dicha mezcla, modificando la velocidad de

propagación de la llama o la temperatura adiabática. Mediante el uso combinado del biogás y los gases de pirólisis se pueden plantear instalaciones autosostenibles energéticamente, con un excedente de energía que se puede destinar a cubrir otro tipo de necesidades térmicas de la instalación.

Uno de los trabajos futuros que se puede proponer es un estudio avanzado de las características de la combustión de estas mezclas que permita obtener información relacionada con el comportamiento de la llama y de las emisiones generadas para mejorar las unidades de aprovechamiento térmico y eléctrico.

### 4. BIBLIOGRAFÍA

Cao, Y. C. y Pawlowski A. (2013). Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems: evaluating energy and greenhouse gas emissions implications. *Bioresource Technology*, 127, 81-91.

Funke A., Mumme, J., Koon, M. y Diakite, M. (2013). Cascaded production of biogas and hydrochar from wheat straw: energetic potential and recovery of carbon and plant nutrients. *Biomass and Bioenergy*, 58, 229-237.

Kratzisen, M., Starcevic, N., Martinov, M., Maurer, C. y Muller, J. (2010). Applicability of biogas digestate as solid fuel. *Fuel*, 89, 2.544-2.548.

Lee, H. C., Mohamad, A. A. y Jiang, L. Y. (2017). A detailed chemical kinetics for the combustion of  $\text{H}_2/\text{CO}/\text{CH}_4/\text{CO}_2$  fuel mixtures. *Fuel*, 193, 294-307.

Monlau, F., Sambusiti, C., Antoniou, N., Barakat, A. y Zabanitout, A. (2015). A new concept for enhancing

energy recovery from agricultural residues by coupling anaerobic digestion and pyrolysis process. *Applied Energy*, 148, 32-38.

Ounas, A., Aboulkas, 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, 11.234-11.238.

Sánchez, M. E., Martínez, O., Gómez, X. y Morán, A. (2007). Pyrolysis of mixtures of sewage sludge and manure: a comparison of the results obtained in the laboratory (semi-pilot) and in a pilot plant. *Waste Management*, 27, 1.328-1.334.

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J. y Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99, 7.928-7.940.