

FLEXBY: how the carbon contained in biomass residues gives rise to the fuels and materials of the future through microwave pyrolysis

FLEXBY: Cómo del carbono contenido en los residuos de biomasa nacen los combustibles y materiales del futuro mediante pirólisis por microondas

B. Ruiz¹, L. Taboada-Ruiz^{1,2}, E. Ciurcina^{1,2}, N. Ferrera-Lorenzo³, Michael Hepworth⁴, P. Álvarez¹, M. Díaz-Somoano¹

¹ Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR), CSIC. C/ Francisco Pintado Fe 26, 33011, Oviedo, España.

² Programa de Doctorado en Ingeniería de los Recursos Naturales (DIRENA), Universidad de Oviedo, Campus Universitario de Mieres, 33600 Mieres, Asturias, Spain.

³ IDENER Chemistry Division, Torre Sevilla, Planta 11, C/ Gonzalo Jiménez de Quesada, 2 - 41092 Sevilla, España.

⁴ KNEIA S.L, C/Aribau 168(1:1), 08036 Barcelona, España.

begorb@incar.csic.es

Abstract:

Liquid transport fuels derived from biomass have been proposed as part of the solution to mitigate climate change. However, most current biofuels are produced from food crops, which has a negative impact on food production. FLEXBY aims to produce advanced biofuels using an innovative and cost-effective process that will reach a Technology Readiness Level (TRL) of 5. In FLEXBY, biofuels will be produced from biogenic waste derived from microalgae cultivated in domestic wastewater, as well as from sewage sludge originating from the food industry. This waste biomass will undergo microwave pyrolysis to yield three distinct fractions: bioliquid, gas and biochar. The liquid fraction will be converted into biofuels for aviation, diesel and marine use via a versatile and innovative hydrogen-free hydrodeoxygenation process. The gaseous fraction will be converted into biohydrogen via a combined process of steam reforming, water gas shift (WGS) reaction and preferential CO oxidation (PrOx). FLEXBY promotes the circular economy by recycling biomass waste and all by-products generated during the project.

Resumen

Los combustibles líquidos para el transporte derivados de la biomasa se han propuesto como parte de la solución para mitigar el cambio climático. Sin embargo, la mayoría de los biocombustibles actuales se producen a partir de cultivos alimentarios, lo que tiene un impacto negativo en la producción de alimentos. FLEXBY tiene como objetivo la producción de biocombustibles avanzados a través de un proceso innovador y rentable que alcanzará un Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) de 5. En FLEXBY, se producirán biocombustible utilizando residuos biogénicos derivados de microalgas cultivadas en aguas residuales domésticas, así como lodos de depuradora de industrias alimentarias. Esta biomasa residual se someterá a pirólisis por microondas para obtener tres fracciones distintas: biolíquido, gas y biocarbón. La fracción líquida se convertirá en

biocombustibles para aviación, diésel y uso marítimo mediante un proceso de hidródesoxigenación versátil e innovador sin hidrógeno. La fracción gaseosa se convertirá en biohidrógeno mediante un proceso combinado de reformado con vapor, reacción de desplazamiento del gas de agua (WGS) y oxidación preferencial de CO (PrOx). FLEXBY promueve la economía circular mediante el reciclaje de los residuos de biomasa y de todos los subproductos generados durante el proyecto.

Introducción

Es otoño en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR-CSIC). Sobre un césped aún verde, que resiste a unas temperaturas inusualmente elevadas para esta época del año en Asturias, las hojas comienzan a cubrir los jardines de la entrada al centro. Repartidos por las zonas verdes, aparecen pequeños montones de ramas y restos de poda que esperan su retirada tras las labores de mantenimiento del arbolado. Para la mayoría de quienes pasan junto a ellos, estos materiales son una consecuencia natural del cambio de estación. Para quienes investigamos la valorización de recursos carbonosos, ofrecen una perspectiva muy distinta.

Cada resto vegetal acumulado representa una alternativa natural para almacenar el carbono capturado previamente de la atmósfera mediante la fotosíntesis. Pero para ojos expertos representa también una materia prima renovable con potencial para transformarse en energía, combustibles sostenibles o materiales carbonosos avanzados. La cuestión es tan sencilla como trascendente: ¿qué podemos hacer con todo ese carbono?

En realidad, la idea de transformar biomasa en un material más rico en carbono es casi tan antigua como el ser humano e incluso no es difícil imaginar que haya nacido de forma casual en los primeros homínidos descubriendo el potencial del fuego. Más adelante, aun mucho antes del desarrollo de la química reciente, diversas culturas aprendieron a producir carbón vegetal calentando madera en

condiciones de déficit de oxígeno, en lo que podría definirse como una forma primitiva de pirólisis. El uso de carbón vegetal permitió además alcanzar temperaturas superiores a las alcanzadas con procesos de combustión directa de la madera. No es de extrañar que tenga un papel destacado en el desarrollo de la metalurgia y facilitó, la obtención de cobre, bronce e incluso hierro, contribuyendo al desarrollo de la humanidad durante milenios. Nació así una de las primeras formas de modificación deliberada de un material rico en carbono.

Con el paso de los siglos, ese conocimiento empírico de aquellos carboneros y metalúrgicos dio paso a un entendimiento científico de todos los procesos en ellos involucrados. Hoy en día, la pirólisis, es una herramienta de ingeniería sofisticada y evolucionada para conseguir algo bastante parecido a los objetivos de antaño: aprovechar de la forma más eficiente posible el carbono contenido en la biomasa.

Fundamentos de la pirólisis de biomasa

En términos científicos, la pirólisis consiste en la descomposición termoquímica de la fracción orgánica de un material mediante la aplicación de calor y en ausencia o déficit de oxígeno, lo que da lugar a procesos extraordinariamente complejos de ruptura, reorganización y condensación molecular que transforman profundamente la estructura original del material. Como resultado de estas transformaciones se generan tres corrientes principales: sólido, líquido y gas.

La fracción sólida, conocida generalmente como char, está constituida por un residuo rico en carbono que puede contener proporciones variables de

cenizas y otros componentes inorgánicos, en función de la naturaleza y composición de la materia prima utilizada. En el caso de la pirólisis de biomasa, este material puede denominarse biocarbón (biochar). La fracción líquida, obtenida mediante la condensación de los vapores generados durante el proceso, está compuesta por agua y una mezcla compleja de compuestos orgánicos condensables, cuya naturaleza y composición dependen del material procesado. Por su parte, la fracción gaseosa está formada por los compuestos no condensables, entre los que pueden encontrarse hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono, metano y otros hidrocarburos ligeros. La proporción relativa de cada una de estas fracciones, así como su composición, depende de numerosos parámetros operativos, entre ellos la temperatura final alcanzada, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia de los vapores en el reactor y, especialmente, las características de la materia prima utilizada.

Por ello, la pirólisis no debe entenderse únicamente como una tecnología de conversión energética, sino también como una herramienta capaz de dirigir la transformación del carbono hacia productos con propiedades específicas.

La búsqueda de nuevos métodos para optimizar estas transformaciones ha impulsado el desarrollo de tecnologías innovadoras de calentamiento. Entre ellas, la pirólisis asistida por microondas se ha consolidado como una de las alternativas más prometedoras, al ofrecer una forma radicalmente distinta de suministrar energía al sistema y abrir nuevas posibilidades para el control de los procesos de conversión.

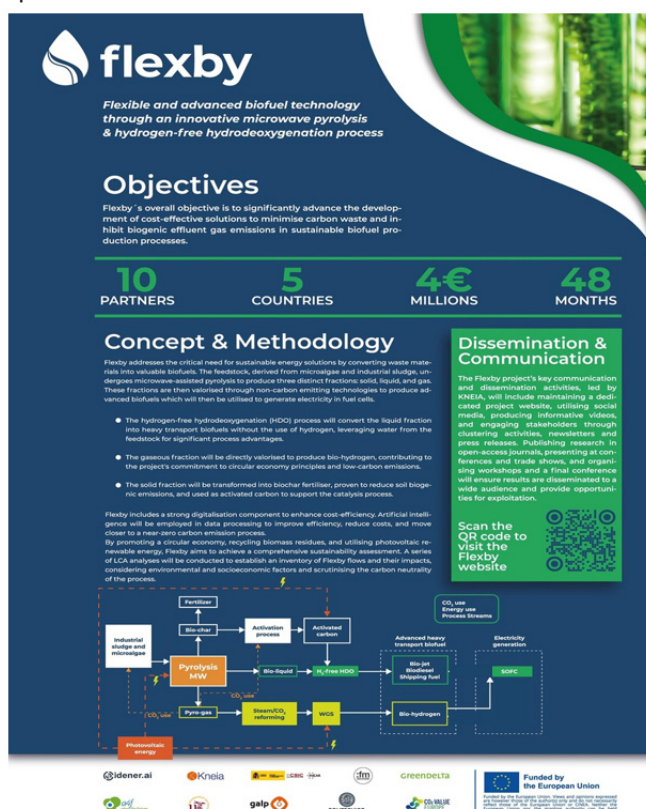


Figura 1. Cartel resumen del proyecto FLEXBY.

Figure 1. Summary poster of the FLEXBY project.

FLEXBY: una nueva generación de procesos de valorización

FLEXBY (*Flexible and Advanced Biofuel Technology through an Innovative Microwave Pyrolysis and Hydrogen-Free Hydrodeoxygenation Process*) es un proyecto de cuatro años iniciado en 2024 y financiado por el programa Horizonte Europa, con un presupuesto cercano a los cuatro millones de euros (figura 1).

El **Objetivo** es desarrollar y demostrar una plataforma tecnológica flexible para la producción de biocombustibles avanzados a partir de residuos orgánicos mediante la integración de pirólisis asistida por microondas, hidrodesoxigenación sin aporte externo de hidrógeno, valorización integral de coproductos y herramientas avanzadas de digitalización.

Uno de los **objetivos científicos** más ambiciosos del proyecto es impulsar la tecnología de pirólisis por microondas (figura 2) hacia niveles de madurez tecnológica más elevados, mediante el desarrollo de un demostrador capaz de procesar materias primas complejas, como biomasa microalgal y lodos industriales procedentes de empresas alimentarias, en condiciones representativas de operación. Entre los retos abordados se encuentran la comprensión de los mecanismos de interacción entre la radiación electromagnética y las materias primas, el control de los perfiles térmicos durante la reacción y la optimización de la distribución de productos obtenidos. Esta línea de investigación se desarrolla en el INCAR-CSIC, donde la doctora Begoña Ruiz Bobes, responsable del Grupo de Biocarbono, Circularidad y Sostenibilidad, lidera las actividades relacionadas con la pirólisis por microondas, su comparación con el calentamiento convencional y la validación de los materiales carbonosos obtenidos.

El proyecto **FLEXBY** está integrado por diez socios procedentes de países como España, Alemania, Italia, Portugal y Bélgica, cada uno de los cuales desempeña un papel específico en la cadena de desarrollo tecnológico: **IDENER** coordina el proyecto y trabaja en la modelización, optimización y demostración del proceso; **Fricke & Mallah** desarrolla la tecnología de pirólisis por microondas; **CSIC-INCAR** investiga y valida la pirólisis y caracteriza el biochar; la **Universidad de Sevilla** desarrolla los catalizadores y los procesos de producción de biocombustibles y biohidrógeno; **Politecnico di Milano** se encarga de la optimización y el escalado de las tecnologías; **A4F** trabaja en el cultivo y caracterización de microalgas; **Galp** evalúa la calidad y aplicabilidad de los biocombustibles obtenidos; **GreenDelta** analiza la sostenibilidad ambiental, económica y social; **KNEIA** lidera la comunicación, difusión y explotación de resultados; y **CO₂ Value Europe** facilita la colaboración y el clustering con otras iniciativas europeas. En conjunto, los socios aportan capacidades complementarias que permiten desarrollar, validar y evaluar la viabilidad de la tecnología FLEXBY desde la materia prima hasta la producción y aplicación del biocombustible.

La **principal innovación de FLEXBY** reside en su concepción como una biorrefinería integrada, donde cada una de las corrientes generadas durante la pirólisis se convierte en una fuente de productos de valor añadido, maximizando el aprovechamiento del carbono contenido en los residuos. La tecnología de pirólisis con el proyecto FLEXBY parte de una validación en laboratorio a una escala de integrador semi-piloto.

La **fracción líquida**, constituida por bioaceites ricos en compuestos oxigenados, se somete a una innovadora etapa de hidrodesoxigenación libre de hidrógeno externo. Este enfoque busca superar una



Figura 2. Representación genérica mediante IA de un sistema experimental de pirólisis asistida por MW.

Figure 2. AI-generated generic representation of an experimental MW-assisted pyrolysis system.

de las principales limitaciones de las tecnologías actuales de upgrading de bioaceites, reduciendo significativamente la dependencia de hidrógeno renovable y mejorando la viabilidad técnico-económica de la producción de combustibles avanzados para transporte pesado. La **fracción gaseosa**, formada por hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros gases ligeros, se valoriza para la producción de biohidrógeno y su posterior utilización en sistemas de generación eléctrica basados en pilas de combustible. Esta estrategia permite aumentar el rendimiento energético global del proceso y avanzar hacia esquemas de aprovechamiento prácticamente integral de la biomasa. La **fracción sólida**, reteniendo una parte significativa del carbono original de la materia prima, constituye una fuente especialmente interesante de biochar y materiales carbonosos avanzados. FLEXBY contempla su transformación en carbones activados y materiales funcionales con potencial aplicación en procesos de adsorción, catálisis, almacenamiento electroquímico de energía y tecnologías ambientales. Además, la estabilización del carbono biogénico en esta fracción abre nuevas oportunidades para la reducción de emisiones y el secuestro de carbono a largo plazo.

Finalmente, el proyecto incorpora herramientas de simulación avanzada, inteligencia artificial, gemelos digitales y análisis de ciclo de vida con el fin de optimizar el funcionamiento de la instalación, mejorar la eficiencia operativa y evaluar de forma integral los beneficios ambientales, energéticos y socioeconómicos de la tecnología desarrollada. La combinación de estos elementos sitúa a FLEXBY como un ejemplo representativo de las futuras biorrefinerías circulares basadas en la valorización integral del carbono contenido en los residuos.

Más allá del laboratorio: compartir conocimiento para un futuro más sostenible

La innovación científica alcanza todo su potencial cuando el conocimiento trasciende los límites del laboratorio e inspira nuevas ideas, colaboraciones y aplicaciones. Por ello, comunicar y difundir la investigación de FLEXBY constituye una parte esencial de la misión del proyecto. A través de actualizaciones sobre sus avances, vídeos, páginas web de los socios, cobertura mediática y publicaciones científicas, FLEXBY da a conocer su trabajo en materia de biocombustibles avanzados y valorización de residuos a investigadores, representantes de la industria, responsables políticos y al público en general. Los socios del proyecto han presentado sus resultados en congresos internacionales, compartido resultados técnicos mediante artículos científicos y pósteres, y contribuido a los debates sobre combustibles sostenibles y tecnologías circulares.

El proyecto también fomenta activamente las conexiones con iniciativas europeas complementarias mediante su participación en seminarios web conjuntos, simposios y actividades de colaboración entre proyectos (*clustering*), que promueven el intercambio de conocimientos y la cooperación. Estas

iniciativas contribuyen a dar visibilidad al potencial de la pirólisis por microondas y la valorización integrada de residuos, al tiempo que generan oportunidades para aprovechar los resultados de la investigación y favorecer su futura aplicación.

De este modo, el impacto de FLEXBY va más allá del desarrollo de nuevas tecnologías y contribuye a un debate más amplio sobre cómo la ciencia y la innovación pueden ayudar a construir un futuro más circular, sostenible y eficiente en el uso de los recursos.

El papel de INCAR-CSIC: ciencia y tecnología de la pirólisis

Dentro de FLEXBY, el papel del Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono es especialmente relevante. La participación del instituto se sustenta en una extensa trayectoria investigadora en el ámbito de la transformación termoquímica de materiales ricos en carbono, incluyendo carbones, biomasas y residuos orgánicos. Durante décadas, los grupos de investigación del INCAR-CSIC involucrados en el proyecto FLEXBY, el grupo de Biocarbono, Circularidad y Sostenibilidad y el grupo de Materiales Compuestos, han contribuido al conocimiento de procesos de pirólisis, gasificación, activación y valorización carbonosa, estudiando tanto los mecanismos de reacción como las propiedades de los materiales obtenidos. Esta experiencia proporciona una base científica sólida para afrontar los desafíos planteados por la conversión de corrientes residuales complejas mediante calentamiento por microondas.

Los primeros trabajos desarrollados en FLEXBY han permitido evaluar diferentes residuos y seleccionar aquellas corrientes con mejores perspectivas de valorización. Destacan las microalgas cultivadas en aguas residuales y determinados lodos industriales, caracterizados por su potencial energético y por su capacidad para interactuar eficazmente con el calentamiento por microondas.

La **Tabla 1** recoge algunos de los resultados de la caracterización química de las materias primas utilizadas en el proyecto FLEXBY, publicados previamente en el entregable D2.1, "Physicochemical Sheet for the Biomass Feedstock".

Esta línea de investigación se encuentra en plena expansión y se apoya en el amplio conocimiento adquirido en estudios de pirólisis convencional y flash, que han permitido analizar el comportamiento de distintos residuos en un amplio intervalo de temperaturas y condiciones de operación. Esta experiencia constituye una base científica de gran valor para abordar ahora su transformación mediante tecnologías asistidas por microondas. En este contexto, comunicaciones recientes del grupo han puesto de manifiesto el potencial de la pirólisis para valorizar microalgas cultivadas en aguas residuales, lodos industriales procedentes de la industria láctea y lodos de la industria del agar-agar, transformándolos en tres productos principales: biochar, bioaceite y gas.

Tabla 1. Análisis inmediato y elemental de las materias primas del proyecto FLEXBY.

Table 1. Proximate and ultimate analysis of the raw materials of the FLEXBY project.

Muestra de Biomasa	MV (%) ^a	Cenizas (%) ^a	C (%) ^a	H (%) ^a	N (%) ^a	S (%) ^a	O (%) ^{a, b}
Materia prima 1	62,7	24,43	40,56	5,80	5,79	0,35	23,07
Materia prima 2		22,26	41,73	6,19	4,10	0,25	25,47
Materia prima 3	36,19	60,22	18,78	2,36	3,58	1,06	14,00
Materia prima 4	51,25	41,07	28,58	3,72	5,47	1,00	20,16
Materia prima 5	72,29	22,56	44,20	6,18	5,50	0,55	21,01
Materia prima 6	79,80	13,35	54,31	8,45	5,88	0,38	17,63

^a Base seca

^b Calculado por diferencia

Esta línea de investigación se encuentra en plena expansión y se apoya en el amplio conocimiento adquirido en estudios de pirólisis convencional y flash, que han permitido analizar el comportamiento de distintos residuos en un amplio intervalo de temperaturas y condiciones de operación. Esta experiencia constituye una base científica de gran valor para abordar ahora su transformación mediante tecnologías asistidas por microondas. En este contexto, comunicaciones recientes del grupo han puesto de manifiesto el potencial de la pirólisis para valorizar microalgas cultivadas en aguas residuales, lodos industriales procedentes de la industria láctea y lodos de la industria del agar-agar, transformándolos en tres productos principales: biochar, bioaceite y gas.

Estas corrientes presentan interesantes posibilidades de aprovechamiento energético y ambiental, así como de obtención de materiales carbonosos de valor añadido. Estos estudios ponen de manifiesto la importancia de la composición de las materias primas y de las condiciones de procesado para optimizar las propiedades de los productos. La combinación del conocimiento acumulado y de estas nuevas vías de investigación abre oportunidades para convertir corrientes residuales en recursos de valor añadido, reduciendo al mismo tiempo su impacto ambiental.

La actividad científica que se está desarrollando ha dado lugar a diversas comunicaciones presentadas en congresos especializados, cuya relación se presenta a continuación:

- Maximising bio-oil yield from industrial dairy sludge: a paradigm on pyrolysis temperature and heating rate in the context of the EU FLEXBY project. *L. Taboada-Ruiz et al. (ORAL)*
- The potential of microalgae biomass from urban wastewater treatment for biofuel production by pyrolysis: flash versus conventional processes in the EU FLEXBY project. *R. Pardo et al. (ORAL)*
- Balancing quality and yield of biofuel and biochar in the pyrolysis of industrial macroalgae sludge: future perspectives with a circular economy approach in the EU FLEXBY project. *E. Ciurcina et al. (POSTER)*

- Equilibrio entre calidad y rendimiento de biocombustibles y biocarbón en la pirólisis de lodos industriales de macroalgas: perspectivas futuras desde una economía circular. *E. Ciurcina et al. (ORAL)*
- Maximización del rendimiento de bioaceite a partir de lodos de industrias Lácteas: un paradigma en la influencia de la temperatura de pirólisis y la velocidad de calentamiento. *L. Taboada-Ruiz et al. (ORAL)*
- Potencial del cultivo de microalgas en aguas residuales para la producción de biocombustibles mediante pirólisis: comparación entre procesos convencional y flash. *R. Pardo et al. (ORAL)*
- Heating Rate-Driven Control of Dairy Sludge Pyrolysis for Tailored Biofuel Production. *L. Taboada-Ruiz et al. (ORAL)*
- From Waste to Resource: Controlling Residence Time in Macroalgae Sludge Pyrolysis to Maximize Valorization. *E. Ciurcina, et al. (POSTER)*



Para una institución como el INCAR-CSIC, cuya actividad investigadora gira en torno al carbono y sus transformaciones. FLEXBY representa además una oportunidad para trasladar décadas de experiencia acumulada hacia uno de los ámbitos con mayor potencial de crecimiento dentro de la bioeconomía circular.

Conclusiones: Mirando al futuro

Hace miles de años, la pirólisis permitió a la humanidad fabricar el carbón vegetal que impulsó el desarrollo de la metalurgia y transformó las primeras civilizaciones. Hoy, en pleno siglo XXI, la misma idea fundamental sigue vigente, aunque con herramientas mucho más sofisticadas. Allí donde otros ven residuos, la investigación ve recursos; donde antes había un problema de gestión, hoy aparecen combustibles renovables, hidrógeno y materiales carbonosos avanzados.

Esa es, en esencia, la filosofía que inspira a FLEXBY: demostrar que el carbono contenido en los residuos no marca el final de una historia, sino el comienzo de una nueva. Una historia en la que la ciencia, la tecnología y la innovación permiten transformar aquello que desechamos, en parte de la solución a algunos de los grandes desafíos energéticos y ambientales de nuestro tiempo.

Y quizá todo comience, como en esta mañana de otoño frente al INCAR-CSIC, observando algo tan cotidiano como un montón de hojas y ramas acumuladas en un jardín. Porque en cada uno de esos restos vegetales sigue existiendo un recurso extraordinariamente valioso: el carbono. El mismo elemento que dio nombre a nuestro instituto y que continúa siendo protagonista de algunas de las soluciones más prometedoras para construir una sociedad más sostenible.

Referencias

FLEXBY- Flexible and advanced Biofuel technology through an innovative microwave pYrolysis & hydrogen-free hydrodeoxygenation process.

<https://cordis.europa.eu/project/id/101144144>

12th International Conference on Sustainable Solid Waste Management. (2025). Conference proceedings. Paphos, Cyprus, 25–28 June 2025.

<https://cyprus2025.uest.gr/proceedings/>

XVII Reunión del Grupo Español del Carbón (GEC 2025) — Zaragoza, 19-22 octubre 2025.

https://digital.csic.es/bitstream/10261/424456/1/MoS2_Carbon_Nanotube.pdf

4th International Conference on Green Energy and Environmental Technology (GEET-26) Abstract E-book: <https://zenodo.org/records/22309365>

B. Ruiz. D2.1 Physicochemical Sheet for the Biomass Feedstock, (2024).

Agradecimientos

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or CINEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them. The work described in this publication was subsidised by Horizon Europe (HORIZON) framework through the Grant Agreement Number 101144144.