

68  
Abril  
2022

# CUA DER NOS *DE ENERGÍA*



# Investigación y Desarrollo en Biocombustibles Avanzados para la Transición Energética

## **Marta Bregua de la Sotilla**

Investigadora del Departamento de Excelencia Operacional del Centro de Investigación de Cepsa

## **María Ángeles Romero Vázquez**

Investigadora Sénior del Departamento de Excelencia Operacional del Centro de Investigación de Cepsa

## **Carlos A. Prieto Velasco**

Coordinador del Departamento de Excelencia Operacional del Centro de Investigación de Cepsa

En el contexto de la era de la bomba atómica, el descubrimiento del ADN y los inicios de la informática, Thomas S. Kuhn escribió *La estructura de las revoluciones científicas* en 1962 [1]. En esta obra clave, Kuhn estableció una explicación sobre cómo surgen y se consolidan los grandes cambios en la teoría y prácticas de la Ciencia. La obra analizaba el comportamiento de las comunidades científicas encargadas de seleccionar el modo más apto de practicar la ciencia futura. Kuhn postuló varios conceptos fundamentales que son habituales hoy en día: paradigma, comunidad científica y ciencia normal. Por paradigma científico entendemos el conjunto de teorías compartidas por la comunidad científica. En nuestra concepción, una Revolución científica consiste en la transición hacia un nuevo paradigma. En la noción de Kuhn, el motor del cambio es el cambio de mentalidad de la comunidad científica, que progresivamente acepta y usa los métodos y prácticas del nuevo paradigma y abandona el anterior. Esta aparición de un nuevo paradigma supone una crisis en la comunidad científica, ya que el cuerpo de las doctrinas, nomenclatura y el marco conceptual de la ciencia normal, aquella que hemos aprendido y constituye el lenguaje común de la comunidad; que-

da desbordado por los nuevos conceptos y; finalmente, queda obsoleto [2]. Además, para T.S. Kuhn, los cambios de paradigma no se dan por la acumulación progresiva típica de la ciencia normal, sino que disrupciones radicales, fenómenos no explicados y descubrimientos que no cuadran con el conocimiento previo fuerzan la implantación del nuevo paradigma, convenciendo a las nuevas generaciones de científicos.

En este sentido disruptivo, la Transición Energética hacia una economía sin emisiones de gases de efecto invernadero supone una auténtica revolución científico-técnica: desde la producción de materias primas, los procesos necesarios para transformarlas y el tipo de energía y productos químicos que se consumirán. Las bases fundamentales de la economía descarbonizada parecen enfocarse hacia la generación de electricidad sin emisiones netas, sustitución de otras fuentes de energía por la electricidad, combustibles sintéticos y biocombustibles avanzados, implantación de una red eléctrica digitalizada (*smart-grid*), eficiencia y uso de materiales inteligentes, gestión sostenible del suelo agrícola y la cabaña ganadera [3]. Los cuatro sectores clave de la economía en los que se incidi-

rán principalmente serán la generación de energía, la industria, el transporte y la construcción. Dado el peso socioeconómico de estos sectores y su impacto en los hábitos de vida de las personas, la Transición Energética supondrá cambios importantes en las tendencias de consumo y, por tanto, a largo plazo (2050) los cambios no serán superficiales, sino que alterarán de lleno la economía y hábitos de consumo en su conjunto, el sistema de oferta y demanda de productos energéticos y la producción industrial de bienes de consumo.

En el caso particular de la industria de producción de combustibles, nuevas materias primas, procesos, productos y nuevos perfiles de consumidores y clientes, esta Transición supone que el sector de Refino y Química debe transformarse por completo, desde la Logística hasta la Distribución final. Como base de esta transformación se requerirán grandes inversiones en proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación para el escalado e implementación de tecnologías todavía embrionarias. Además de las inversiones, la colaboración entre diferentes actores público-privados será clave para los nuevos desarrollos, dada la magnitud y profundidad de la Transición.

Por todo lo anterior, si bien en el pasado la principal motivación para producir y lanzar al mercado biocombustibles o productos químicos renovables de menor impacto ambiental ha sido la obligación legislativa, ahora el sector energético deberá planificar una implementación más ambiciosa de estrategias de innovación: tanto en las tecnologías como en la transformación de sus modelos de negocio. En este sentido, la eco-innovación, definida como aquellas innovaciones que generan mejoras en la gestión de los impactos ambientales de las actividades de producción y consumo, se ha mostrado como pieza clave para mitigar la tradicional dicotomía entre competitividad y sostenibilidad [4]. Estas eco-innovaciones deberán desligar del mero cumplimiento de la legalidad vigente y dar paso a nuevos procesos químico-industriales, productos y líneas de negocio alternativas. Realmente la viabilidad de una empresa en plena Transición Energética dependerá de su habilidad para crear y operar modelos de negocio sostenibles desde el punto de vista económico, pero también ecológico, donde el beneficio a corto plazo no sea el principal motor del negocio sino la creación de valor sostenida en el tiempo, con vistas a largo plazo.

### I+D+i para la Transición Energética

En el marco de esta Transición Energética y de la introducción de eco-innovaciones en los procesos industriales, desde el Centro de Investigación de Cepsa se lideran diferentes proyectos cuyo objetivo es la reducción de huella de carbono de los procesos productivos y los productos comercializados por Cepsa. Además, el Centro de Investigación participa en proyectos colaborativos de

I+D+i alineados con los objetivos clave de la Transición Energética.

Siguiendo este enfoque, el proyecto *Flexiwaste*: “Desarrollo de un proceso flexible de valorización de residuos para la producción de biocombustibles” tiene como objetivos:

- Desarrollar un nuevo esquema de procesamiento flexible que permita purificar y transformar nuevas materias primas, desde el pre-tratamiento y refinado de materias grasas hasta su transformación en biocombustibles avanzados, en línea con los requisitos de sostenibilidad marcados por la Comisión y el Parlamento Europeo en la Directiva de Energías Renovables (RED II)<sup>1</sup>.
- Definir nuevos procesos de purificación del producto final obtenido que permitan obtener una calidad del biocombustible ajustado a las especificaciones de calidad.

Por otro lado, el Proyecto *SuperBiodiesel* LIFE19CCM/ES/001189 “Production of advanced biodiesel from animal wastes using supercritical technologies” tiene como objetivo implementar un proceso catalítico novedoso y sostenible para la producción de biocombustibles a partir de materias primas residuales procedente de una industria consolidada como es la industria del curtido de pieles, mediante tecnologías supercríticas. El proyecto valorizará residuos animales de dicha industria en un concepto de biorrefinería con aprovechamiento de las diferentes fracciones del residuo, dando un valor añadido a estos productos que anteriormente se consideraban un deshecho de la industria.

Cepsa, empresa energética global propiedad de los holdings *Mubadala Investment Company* y *The Carlyle Group*, lleva años buscando e implementando nuevos proyectos que conlleven un cambio significativo en el actual modelo de producción de bienes y servicios. Actualmente este modelo se basa en las pautas de “usar-consumir-tirar”, lo cual es insostenible en el largo plazo. Es por ello, que se requiere de un gran cambio económico y social [5]. Hasta ahora este modelo lineal se ha impuesto como el patrón de desarrollo económico dominante impactando de forma importante en el medioambiente, manifestándose en la actual crisis climática y ambiental a la que nos enfrentamos. El impacto global ha llevado a demandar una búsqueda de soluciones integrales en la que debemos participar todos los sectores económicos, incluido el sector energético y de refino. Es por ello que Cepsa como compañía energética integrada continúa en la búsqueda de las mejores tecnologías que permitan convertir este modelo lineal en un modelo circular de producción y consumo, en el cual se reduzca al mínimo la generación de residuos y la dependencia de los combustibles fósiles, se logre una economía sostenible a largo plazo, eficiente en el uso de los recursos y materias primas y, por supuesto, competitiva, reforzando la economía productiva y consolidando el sistema tecno-industrial. En este contexto, Cepsa se ha marcado un compromiso con el desarrollo sostenible y el refuerzo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de Naciones Unidas, los cuales presentan un plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos, revisando y priorizando nuestra contribución a ellos [6].

<sup>1</sup> Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources

**Figura 1. Principales Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de Naciones Unidas definidos por Cepsa como estratégicos para la compañía**



Si bien Cepsa contribuye con los 17 ODS, los cuatro ODS mostrados en la Figura 1 han sido definidos como estratégicos tras analizar su vinculación con la actividad de la compañía y su relación con nuestras prioridades estratégicas:

- ODS 7. Energía asequible y no contaminante. Cepsa participa activamente en la transición energética potenciando nuevas formas de utilizar y generar energía sostenible para ponerla al servicio de personas, empresas y sociedad.
- ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico. Cepsa contribuye al crecimiento económico con empleos estables y de calidad, que favorecen el desarrollo profesional, el bienestar, la diversidad y la inclusión.
- ODS 12. Producción y consumo responsables. Cepsa trabaja por el balance responsable y sostenible entre las necesidades productivas y los recursos naturales, fomentando la economía circular.
- ODS 13. Acción por el clima. Cepsa es consciente del cambio climático y por ello se propone minimizar la huella de carbono de nuestras actividades y de sus productos.

Con estos compromisos Cepsa reforzará su papel activo en la Transición Energética y en la prevención del cambio climático, produciendo y desarrollando productos más sos-

tenibles, además de seguir contribuyendo a la recuperación del empleo inclusivo y de calidad.

Los dos proyectos que se presentan en este artículo buscan una alternativa a los combustibles fósiles minimizando la generación de efluentes contaminantes y reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub>, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y al crecimiento económico. Además, los proyectos se enmarcan en una estrategia de industria circular, dado que se reutilizan residuos de otras industrias como materias primas. En esta línea, el desarrollo del proyecto LIFE *SuperBiodiesel* contempla el escalado de un proceso innovador ligado a la industria de las tenerías y al proceso de obtención de biocombustibles y bioestimulantes bajo unas condiciones de proceso eco-eficientes que cumplan con las directivas y regulaciones vigentes.

Siguiendo estos objetivos, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico acuña el término de "economía circular" que se refiere al modelo de producción industrial y de consumo concebido a partir de un ciclo de desarrollo y transformación, que avanza optimizando el uso de los recursos, fomentando la eficiencia de los sistemas productivos, promoviendo que productos, materiales y recursos permanezcan activos el mayor tiempo posible, y, paralelamente, disminuyendo la cuantía de los residuos generados [5].

Más allá del cumplimiento estricto de la normativa en vigor, los proyectos *Flexiwaste* y *SuperBiodiesel* aspiran a la validación de materias primas residuales como alternativas a los aceites vegetales refinados usados habitualmente para la obtención de biocombustibles. Asimismo, estos proyectos tienen como objetivo el desarrollo de procesos y tecnologías específicas para dichas materias primas. Y finalmente, más allá del carácter eco-innovador de los proyectos, *Flexiwaste* y *SuperBiodiesel* se alinean con un objetivo más global de Cepsa para afrontar la Transición Energética: el desarrollo e implementación de tecnologías y modelos de negocio sostenibles basados en innovaciones de los procesos y productos de la compañía.

Tanto los proyectos *Flexiwaste* como *SuperBiodiesel* aplican los principios de economía circular en cuanto a la reintroducción de residuos en los procesos productivos industriales. Los proyectos tienen un alcance innovador, contribuyendo a la diversificación de las materias primas usadas, mejoras de rendimiento frente a los procesos convencionales, reducción de efluentes y contribución a la reducción de huella de CO<sub>2</sub> de los productos y, finalmente, aspiran al desarrollo y escalado de catalizadores, procesos y tecnologías.

Referente a los participantes de los proyectos, *Flexiwaste* y *SuperBiodiesel* son ejemplos de colaboración en consorcio con empresas de sectores diversos, colaboración con organismos públicos de investigación y soporte de la administración pública. En estos proyectos, Cepsa participa a través de su Centro de Investigación, encuadrado en la Dirección de Investigación y Desarrollo de la compañía.

*Flexiwaste* ha estado liderado por Bio-Oils Huelva S.L. empresa de referencia en el refinado de materias primas grasas y producción de biodiésel. Desde 2016, el grupo Bio-Oils forma parte del grupo Apical, uno de

los mayores productores y exportadores de aceite de palma de Indonesia. En *Flexiwaste*, Bio-Oils lidera el desarrollo de nuevos procesos de refinado, purificación y procesamiento de materias primas de origen residual al objeto de que puedan emplearse en la fabricación de biocombustibles avanzados. Clariant, el tercer socio del consorcio, es la compañía líder mundial en especialidades químicas, con sede en Muttenz (Suiza). En el presente proyecto, la línea de negocio de Catálisis y Minerales Funcionales y Clariant Ibérica han desarrollado nuevas estrategias de purificación y tratamiento de materias primas residuales alternativas a aceites y grasas convencionales mediante procesos de adsorción. Los trabajos en esta línea de refinado han contado con la participación de la Universidad de Huelva y la Universidad de Castilla La Mancha. Finalmente, el Centro de Investigación de Cepsa ha trabajado en la identificación y análisis de contaminantes o impurezas y en cuantificar los posibles impactos en los rendimientos de las unidades y catalizadores de hidrotreatmento, con el objetivo de validar el uso de las nuevas materias primas refinadas por Bio-Oils y Clariant y evaluar su futuro procesado en sus unidades industriales. El proyecto ha contado con la financiación del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) del Ministerio de Ciencia e Innovación (expediente IDI-20190570/71/72).

En cuanto a *SuperBiodiesel*, el consorcio está formado por el Instituto Tecnológico del Producto Infantil y del Ocio (AIJU), Cepsa, IMDEA Energía, Organovac, Inescop (Centro Tecnológico del Calzado), la Universidad de Murcia (UMU) y el Instituto de Tecnología Química (ITQ-UPV/CSIC). El proyecto cuenta con el apoyo financiero de la Unión Europea a través del programa LIFE<sup>2</sup>. El proyecto

parte de desarrollos previos del ITQ y AIJU en el diseño de catalizadores monolíticos y del grupo de investigación *Green Chemical Process Engineering* de la UMU en cuanto al diseño de un proceso en condiciones supercríticas. Además, el proyecto cuenta con socios que aportan la materia prima y su experiencia en acondicionamiento y tratamiento de dichas materias. En su fase actual, *SuperBiodiesel* aspira a demostrar y validar todo el proceso de valorización del residuo graso en un entorno industrial relevante, validar la calidad del biocombustible obtenido, sustituyendo a los combustibles fósiles e introduciéndolo en el mercado de automoción, estudiar la viabilidad técnico-económica del proceso y evaluar su reducción de emisiones y otros impactos ambientales respecto a tecnologías y productos tradicionales. Por consiguiente, el objetivo último del proyecto es contribuir a la mitigación del cambio climático.

El marco normativo común a ambos proyectos es la Directiva de Energías Renovables (RED II) que establece objetivos de incorporación de biocombustibles avanzados en las formulaciones de combustibles líquidos (3,5 % en 2030, expresado como contenido en bioenergía), distinguiéndolos y primándolos sobre los biocombustibles tradicionales, los cuales son producidos a partir de materias primas con un impacto ambiental relativamente significativo. Por ello, los procesos químicos actuales deben adaptarse al cambio de materias primas, buscando aquellas que además sean sostenibles en el tiempo. En particular, se debe primar la circularidad de los procesos productivos por lo que los residuos de otros procesos industriales son la prioridad a corto plazo. Esto supone importantes retos tecnológicos, dado que estas materias primas presentan

contaminantes e impurezas perjudiciales, heterogeneidad, difícil logística y distribución y, además, actualmente no existen especificaciones globales para esta nueva categoría de productos y materias primas.

La Comisión Europea propuso una revisión de la Directiva de Energías Renovables en julio de 2021, con objeto de lograr una mayor acción climática de la Unión Europea y en línea con el plan de objetivos climáticos para 2030 [7]. De acuerdo con esta Ley de Clima de la Unión Europea, la revisión de la directiva incluye objetivos ambiciosos que permitan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 55% en 2030. Para ello, aumenta el objetivo general de energías renovables (con propuesta de incrementos de hasta el 40%), así como medidas reforzadas para el transporte, calefacción o refrigeración.

Otros objetivos de la Comisión incluyen potenciar un sistema energético circular y más eficiente que permita la electrificación basada en energías renovables, así como el uso de combustibles bajos en carbono (incluido el hidrógeno) en sectores en los que actualmente no está implementado en su totalidad, como el transporte.

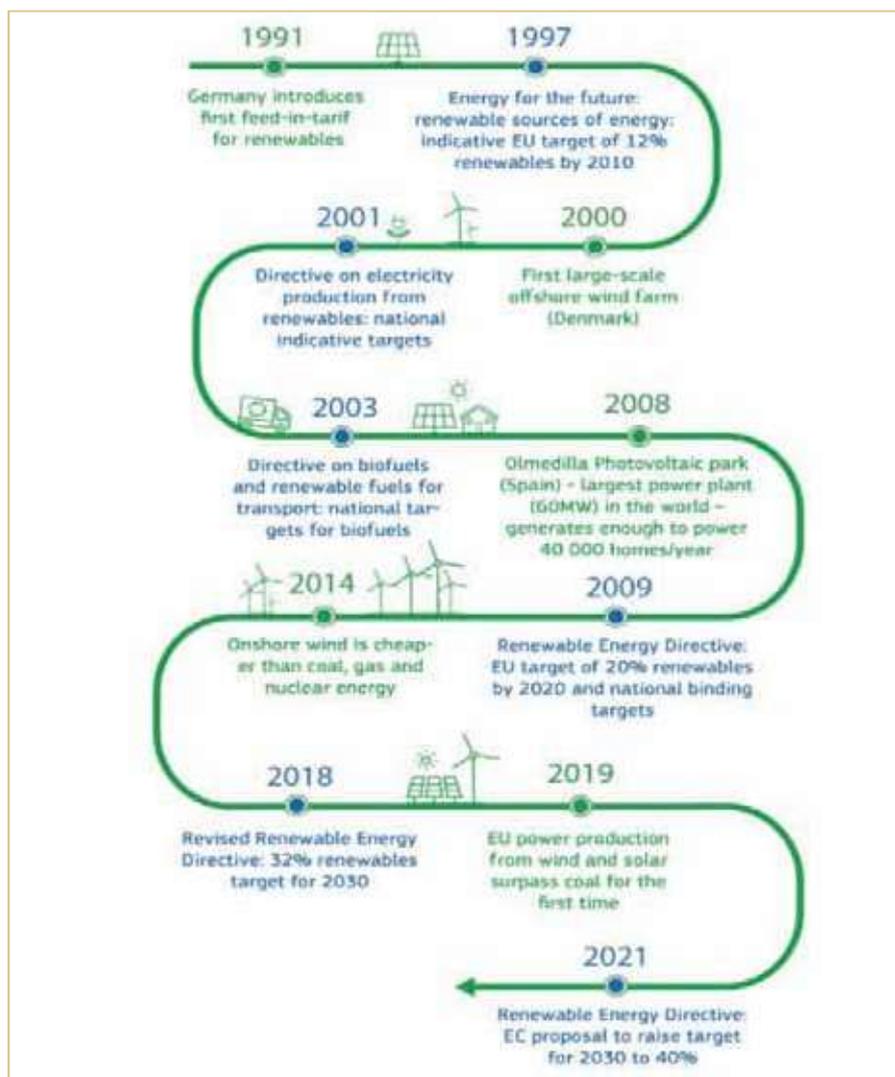
En la Figura 2 se muestra la evolución de las directivas de energías renovables en la Unión Europea.

## **Materias primas y biocombustibles avanzados**

Tomando como referencia la Directiva 2018/2001 (RED II), en el Anexo IX se detallan las materias primas válidas para la producción de biogás para el transporte y biocarburantes avanzados.

2 <https://www.lifesuperbiodiesel.eu/es/>

**Figura 2. Evolución de las Directivas de Energías Renovables en la Unión Europea [7]**



Entre dichas materias primas se encuentran los aceites de cocina usados, los cuales se conocen como UCOs por sus siglas en inglés de *Used Cooking Oil*. Su origen puede ser muy variado en función del país de origen presentándose como mezclas de los aceites vegetales más usados en cada país (oliva, soja, colza, palma, etc.). Este tipo de materia prima ha demostrado tener un potencial muy significativo como biomasa residual sostenible ya que no compite con la

producción alimentaria ni tiene un impacto importante en la agricultura, como sí sucede con los aceites vegetales crudos. Además, su reutilización reduce los problemas medioambientales asociados a su eliminación como deshecho.

Estos aceites vegetales usados son muy demandados tanto por las plantas de biodiésel de primera y segunda generación (1G y 2G), como por las refinerías para la pro-

ducción de biocombustibles. En el primero de los casos, el combustible resultante es una mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos o UCOME (*Used Cooking Oil Methyl Ester*), mientras que en el segundo de los casos se obtiene una mezcla de parafinas o aceite vegetal hidrotratado HVO (*Hydro-treated Vegetable Oil*). En ambos casos se obtiene un producto totalmente compatible con los combustibles fósiles convencionales [8]. Como los UCOs se tratan de un residuo, uno de sus puntos débiles es que no es una materia prima homogénea y con una producción de calidad estable. Debido a los contaminantes que presenta necesita un refinado más intensivo en general que el que se aplica tradicionalmente a los aceites vegetales en estos dos tipos de procesos [9].

Además de los aceites usados empleados en el proyecto *Flexiwaste*, en ambos proyectos se estudia la posibilidad de valorización de residuos de grasas animales categoría 3 (Figura 3). En el caso del *Flexiwaste* se trata de residuos de grasa animal refinada durante el proyecto con el objetivo de producir biocombustibles, mientras que en el caso del proyecto *SuperBiodiesel*, las grasas empleadas son un subproducto animal generado en las tenerías, una industria ya implantada y consolidada en el tejido industrial español y que busca la optimización de todos sus subproductos. Estas últimas se tratan de distintas fracciones de residuos de la piel del vacuno y en concreto son grasas y sebos.

En ambos proyectos, estas grasas animales se consideran productos SANDACH, según el reglamento (CE) N° 1069/2009 que constituye desde el 4 de marzo de 2011 el marco legal comunitario aplicable a los subproductos animales no destinados al consumo humano y los productos derivados de los mismos [10, 11]. Este reglamento clasifica estos productos en tres catego-

**Figura 3. Materias primas utilizadas en los dos proyectos. 1) Materia prima cruda (izq) y refinada (drcha) del proyecto *Flexiwaste*. 2) Materia prima del proyecto *SuperBiodiesel*: 2a) residuos de la industria del curtido de pieles y 2b) materia grasa separada de la fracción proteica**



rías según su riesgo y establece la forma de transformación y las condiciones para su utilización o eliminación. Estos subproductos, denominados SANDACH, se definen como: “Los cuerpos enteros o partes de animales o productos de origen animal de las tres categorías en la que se clasifican no destinados a consumo humano, incluidos óvulos, embriones y esperma”. Otros ejemplos de productos SANDACH son: cadáveres de animales, cebos de pesca, grasas animales y otros derivados de estas, harinas de carne, hueso, pescado, etc. Estos productos SANDACH pueden ser tratados en empresas especializadas para la fabricación de productos específicos, como fertilizantes, cueros, cuerdas para raquetas de tenis, reactivos de laboratorio, biogás, biodiésel, etc. Los residuos utilizados en estos proyectos pertenecen a la categoría III y aunque se trata de materias primas residuales, este tipo de grasas no se consideran de doble cómputo en la Directiva Europea de Energías Renovables para el período 2021-2030 (RED II), sin embargo, tampoco están sujetas a la limitación del 7% ya que no son consideradas primera generación (1G)

como podrían considerarse los aceites vegetales. Por ello, estas materias primas ofrecen una ventaja competitiva respecto a las tecnologías y procesos actuales [12, 13].

La Unión Europea promueve con su legislación RED II el uso de residuos domésticos, de la agricultura o forestales incluidos en el anexo IX, partes A y B. Respecto a estas materias primas bio, una de las cuestiones más importantes es su disponibilidad. Para 2030 se estima que las materias primas incluidas en este listado que estarán potencialmente disponibles, tanto para usos energéticos como no energéticos, estará en el rango de 0,98 – 1,2 mil millones de toneladas secas. Se estima que, en los próximos años, con el desarrollo de nuevas tecnologías y la maduración de las tecnologías que se encuentran en niveles de TRL (*Technology Readiness Level*) bajos se obtengan mejores rendimientos hacia los productos que demande el mercado [14].

Asimismo, según estimaciones de la Unión Europea, el volumen de UCO potencialmente susceptible de ser recogido es

aproximadamente 8L UCO/cápita/año, lo que implica que se estime que se puede recoger siete veces más que lo actualmente recogido en la Unión Europea. [15]

### ***Flexiwaste* y *SuperBiodiesel***

En el proyecto *Flexiwaste*, finalizado en el primer trimestre de 2021, los estudios se enfocaron en dos etapas: por un lado, determinación del tipo de contaminantes que están presentes en las materias primas a procesar en las refinerías y, por otro lado, la evaluación del impacto asumiendo su procesado en las unidades de refinería de hidrotatamiento. Las unidades de hidrotatamiento se seleccionaron como opción preferente dentro del concepto de biorrefinería dada la versatilidad de este tipo de unidades en la obtención de biocombustibles competitivos con un mínimo impacto en la configuración actual de las unidades [16, 17].

La caracterización de las materias primas seleccionadas se centró en los análisis de parámetros habituales en hidrocarburos en

combinación con análisis relevantes en materias primas de origen vegetal, tales como perfiles de ácidos grasos, acidez y contenido en diversos metales, entre otros.

Los estudios en planta piloto realizados en el Centro de Investigación de Cepsa se focalizaron hacia el co-procesado de la materia prima bio junto con la materia prima fósil en condiciones operativas y catalizadores comerciales similares a los empleados en las unidades industriales de las Refinerías de Cepsa. Las unidades seleccionadas han sido las unidades de hidrotreamiento de diésel, en las que Cepsa cuenta desde 2005 con amplia experiencia de desarrollo de proyectos de investigación en la producción de biocombustibles. Los productos obtenidos se han caracterizado para verificar el cumplimiento de las propiedades como gasóleo comercial de acuerdo con la norma UNE-EN 590:2014 *Combustibles para automoción. Combustibles para motor diésel (gasóleo). Requisitos y métodos de ensayo*. Algunos aspectos detectados en dichos estudios han sido los siguientes:

- Los metales presentes en estas materias primas deben ser reducidos en etapas de pretratamiento con el fin de minimizar el acortamiento del ciclo operativo industrial de la unidad de hidrotreamiento.
- El biocombustible producido presenta un mayor contenido en parafinas que el combustible de origen fósil 100%, obteniendo un índice de cetano superior en comparación con un gasóleo tradicional fósil.
- Los análisis realizados muestran que es posible obtener un biocombustible compatible (*drop-in*) con el gasóleo tradicional empleando materias primas como aceites de cocina y/o grasas.

- Dado el carácter exotérmico de las reacciones durante el co-procesado, parámetros a nivel industrial como el consumo de gas natural en hornos industriales, podría ser menor respecto al procesado de carga fósil, siendo posible reducir la temperatura en los hornos previos al reactor. Sin embargo, otros parámetros operativos como el consumo de hidrógeno durante la reacción se deben analizar de manera detallada en función de la materia prima empleada junto con el origen del crudo empleado y catalizador con el fin de optimizar el consumo energético de la unidad.

Por otra parte, el proyecto LIFE *SuperBiodiesel* está actualmente en fase de desarrollo. Para cumplir los objetivos previstos de obtención de un biodiésel avanzado que cumpla con las directivas y regulación, se está trabajando en el diseño y construcción de una planta piloto que procese 70 tn/año de materias primas residuales, obteniendo 5 tn/año de biodiésel y 4 tn/año de aminoácidos libres para su uso como bioestimulante. Los grandes retos del proyecto son la validación del proceso, respecto a los procesos convencionales, basado en la transesterificación de los glicéridos presentes en las grasas en condiciones supercríticas con catalizadores heterogéneos.

La operación en condiciones supercríticas presenta una serie de ventajas como por ejemplo el aumento de la transferencia de calor y masa proporcionando una alta conversión del proceso, una velocidad de reacción mayor y una separación más fácil de los productos. Los procesos de transesterificación convencionales suelen presentar conversiones más bajas y son energéticamente intensivos con altos costes de producción. Al mismo tiempo, la operación en supercrítico permite la presencia en la materia prima de contaminantes como el

agua y ácidos grasos libres presentes habitualmente en las materias grasas típicas de estos procesos. En los procesos convencionales de transesterificación básicos el contenido en agua y ácidos grasos libres deben estar controlados durante la reacción porque consumen el catalizador alcalino, reduciendo la disponibilidad del catalizador, causando la formación de jabones y reduciendo la eficacia global de la reacción. Además, estos factores dificultan a su vez la separación aguas abajo de los reactores, donde se deben eliminar los excesos de reactivos y subproductos como la glicerina. En las operaciones supercríticas, sin embargo, el agua no tiene ningún impacto y los ácidos grasos libres son simultáneamente esterificados aumentando el rendimiento de la reacción [18].

Otra característica de los procesos de transesterificación convencional es la producción de glicerina cruda como principal subproducto. Aproximadamente se obtiene un 10-12 % en peso respecto al aceite alimentado al proceso. Esta glicerina, además, se caracteriza por estar contaminada por el metanol del proceso lo que impide su uso comercial directo necesitando procesos de purificación que incrementan el coste operativo. En los procesos supercríticos a determinadas condiciones de operación es posible observar su reacción de esterificación con metanol, minimizando con ello la producción de este residuo. Los compuestos obtenidos, metil-éteres del glicerol, son componentes que proporcionan propiedades óptimas para los combustibles, mejorando sus propiedades en términos de viscosidad y propiedades en frío [19, 20, 21]. Verificar en qué condiciones se produce esta reacción y las propiedades y características del producto obtenido es otro de los objetivos del proyecto. Además, estos derivados de glicerina podrían incorporarse al biodiésel avanzado como aditivos oxi-

genados que contribuyen a disminuir las emisiones de NOx y partículas durante el proceso de combustión.

En este proyecto también se estudiará el uso de catalizadores heterogéneos conformados desarrollados por los socios del consorcio, que se espera que optimicen y hagan el proceso más eficiente, reduciendo el coste energético (elevado en los procesos supercríticos), y permitiendo la recuperación y reutilización de los catalizadores al final de cada proceso, prolongando el ciclo de vida útil de los mismos.

Por lo tanto, el proceso de transesterificación en condiciones supercríticas reduce o elimina los costes asociados al pretratamiento de la materia prima, permitiendo el procesamiento de aceites y grasas de bajo coste. También asienta las bases para la búsqueda de un proceso libre de glicerina que elimine el problema económico y ambiental de este residuo. Por último, *SuperBiodiesel* contempla un estudio técnico-económico para evaluar el impacto del proceso en los costes energéticos, las mejoras ambientales y la futura viabilidad industrial de la tecnología supercrítica.

Además de la relevancia del proceso *SuperBiodiesel* para la producción de biodiésel avanzado, otro de los subproductos de interés es la recuperación de la fracción proteica contenida en los residuos de la industria de curtido de pieles. En este sentido, se han incluido socios estratégicos en este campo para la optimización de la separación, pretratamiento y caracterización de la fracción proteica con el objetivo de validar su uso. Estos socios han llevado a cabo la puesta a punto del proceso de obtención de aminoácidos a partir de la fase proteica de la materia prima por medio de una hidrólisis enzimática dando como resultado un licor con alto contenido en aminoácidos libres y aminoácidos esenciales. Este producto final obtenido se ha validado como fertilizante y/o bioestimulante, y se ha comprobado que cumple con las limitaciones que vienen dadas por la normativa vigente RD 1009/2019, sobre productos fertilizantes, y verificado que cumplen con los parámetros establecidos para su comercialización. Algunos de los beneficios de este bioestimulante son el aumento de la actividad del cultivo, favoreciendo el engorde y la maduración de los frutos y la ayuda a superar condiciones climatológicas extremas.

Estos dos procesos interrelacionados, junto con la actividad de la empresa que proporciona la materia prima para ambos, sientan las bases del concepto de Biorrefinería donde se llevan a cabo todos los procesos integrados hasta la obtención de los dos productos objetivo del proyecto: bioestimulante y biodiésel. Finalmente, es especialmente importante evaluar la viabilidad del proceso desarrollado en cuanto a sus indicadores de rendimiento, consumos energéticos, producción de efluentes y, en general, su huella ambiental. Para ello, existe un grupo de trabajo perteneciente a IMDEA Energía especialmente dedicado al estudio técnico-económico-ambiental de todo el proceso.

En el proyecto, además de considerarse un primer escalado de la tecnología, se incluye un plan de comercialización y explotación de los productos de valor obtenidos en el proceso, que permitirán asegurar la continuidad del proyecto tras su finalización, con el objetivo de madurar una tecnología con grandes expectativas de ser una importante fuente de energía en la lucha contra el cambio climático. ■

## Conclusiones

La implantación de tecnologías innovadoras requiere de muchas etapas desde su concepción y pruebas en laboratorio hasta su implementación a escala industrial. Para ello, los estudios en planta piloto y plantas de demostración constituyen un paso clave para la validación de la viabilidad técnica de los nuevos procesos. Actualmente, el desarrollo de procesos eco-innovadores en la industria de los biocombustibles precisa de rapidez, dados los objetivos de la Transición Energética. Por ello, la investigación a escala piloto es clave para reducir los riesgos tecnológicos y la incertidumbre económica inherentes a todo proceso de innovación empresarial.

Con este objetivo general, *Flexiwaste* y *SuperBiodiesel* constituyen proyectos colaborativos público-privados focalizados en el desarrollo e innovaciones industriales, incluyendo actividades como:

- Implementación de un modelo eco-innovador de Investigación y Desarrollo, centrado en proyectos de reducción de la huella de carbono de Cepsa.
- Desarrollo de alternativas tecnológicas viables basadas en materias primas residuales de otras industrias y procesos.
- Obtención de biocombustibles avanzados de bajo impacto ambiental compatibles con la actual Directiva de Energías Renovables y previendo futuros desarrollos legislativos como Fit x 55.
- Minimización de efluentes contaminantes respecto a los procesos industriales actuales.

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en las actividades y el *mix* de combustibles de Cepsa.

Además, cabe destacar que los proyectos *Flexiwaste* y *SuperBiodiesel* son un claro ejemplo de alineamiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Estos proyectos contribuyen a potenciar la economía circular como eje central de todas las actividades de Cepsa, así como avanzar hacia una mayor sostenibilidad en el uso de nuestros recursos.

Finalmente, la viabilidad industrial de procesos químicos eco-innovadores no solo debe tener en cuenta aspectos científicos y técnicos de las tecnologías usadas. En el caso del escalado a escala comercial, la disponibilidad de materias primas es un aspecto vital. La creación de una cadena de suministro integral que garantice la disponibilidad de biomasa y aceites deberá ser paralela al desarrollo de las tecnologías. Por tanto, la colaboración entre empresas y organismos públicos es especialmente relevante en los proyectos de biorrefino. Por otra parte, los esquemas de biorrefino deberán combinar tecnologías completamente nuevas con el aprovechamiento de instalaciones existentes. En este punto, el fomento de inversiones público-privadas a través de proyectos de I+D+i tendrá un importante papel al objeto de potenciar el desarrollo industrial, primando tecnologías de menor impacto sobre el medio ambiente y fomentando el uso responsable de los recursos energéticos. ■

## Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación concedida por el Programa de Investigación y Desarrollo (PID) de CDTI para el proyecto con expediente IDI-20190570/71/72 y el programa europeo LIFE para el proyecto LIFE19 CCM/ES/001189.

## Bibliografía

- [1] T. S. Kuhn, La estructura de las revoluciones científicas (Breviarios núm. 213), 2ª Edición en libro electrónico ed., México D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2018.
- [2] M. Teich, The Scientific Revolution revisited., Cambridge, UK: Open Book Publishers, 2015.
- [3] Various Authors, Roadmap to 2050. A manual for Nations to decarbonize by Mid-Century, Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), 2019.

- [4] Carrillo-Hermosilla, J., Del Río, P. y Könnola, Y., «Diversity of eco-innovations: reflections from selected case-studies,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, nº 10, pp. 1073-1083, 2010.
- [5] «Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. España Circular 2030. Estrategia Española. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia/>.
- [6] «ONU, Organización de las Naciones Unidas. Objetivos de Desarrollo Sostenible,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>.
- [7] «European Commission. Renewable Energy Directive. 2021 revision of the Directive 2018/2001/EU,» 2021. [En línea]. Available: [https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en).
- [8] S. Bezergianni, A. Dimitriadis y L. Chrysikou, «Quality and sustainability comparison of one- vs. Two-step catalytic hydroprocessing of waste cooking oil,» *Fuel*, vol. 118, p. 300–307, 2014.
- [9] «UCO Trading,» [En línea]. Available: <https://ucotrading.com/reciclaje-aceite-vegetal-cocina-usado/>.
- [10] Unión Europea, «Subproductos animales no destinados al consumo humano,» 2009. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/LSU/?uri=celex%3A32009R1069>.
- [11] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Gobierno de España, «Subproducto de Origen Animal No Destinado al Consumo Humano,» [En línea]. Available: <https://servicio.mapama.gob.es/sandach/Publico/default.aspx>.
- [12] «Libro Blanco SANDACH. Caracterización de los SANDACH,» [En línea]. Available: <https://www.lloppiserviciosambientales.es/wp-content/uploads/2017/03/Libro-Blanco-SANDACH-grupollopis-residuos.pdf>.
- [13] «IDAE Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía. DIRECTIVA EUROPEA DE ENERGÍAS RENOVABLES,» [En línea]. Available: <https://www.idae.es/directiva-europea-de-energias-renovables>.
- [14] «Concawe. Environmental Science for European Refining. Sustainable biomass availability in the EU, to 2050,» 24 August 2021. [En línea]. Available: <https://www.concawe.eu/publication/sustainable-biomass-availability-in-the-eu-to-2050/>.
- [15] European Biomass Industry Association. [En línea]. Available: <https://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/biomass-resources/challenges-related-to-biomass/used-cooking-oil-recycling/>.
- [16] «SusChem-España, Plataforma Tecnológica Española de Química Sostenible; BioPlat, Plataforma Tecnológica Española de la Biomasa; Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. Manual sobre las Biorrefinerías en España,» Febrero 2017. [En línea]. Available: [https://www.suschem-es.org/docum/pb/2017/publicaciones/Manual\\_de\\_Biorrefinerias\\_en\\_Espana\\_feb\\_2017.pdf](https://www.suschem-es.org/docum/pb/2017/publicaciones/Manual_de_Biorrefinerias_en_Espana_feb_2017.pdf).
- [17] J. Saral, R. Ajmal and P. Ranganathan, "Chapter 13. Bioeconomy of hydrocarbon biorefinery processes," in *Hydrocarbon Biorefinery. Sustainable Processing of Biomass for Hydrocarbon Biofuels*, Sunil Maity, Kalyan Gayen, Tridib Bhowmick, 2021, pp. 355-385.
- [18] D. Wen, H. Jiang and K. Zhang, "Supercritical fluids technology for clean biofuel production," *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 273-284, 2009.
- [19] P. Andreo-Martínez, N. García-Martínez, M. d. M. Durán-del-Amor y J. Quesada-Medina, «Advances on kinetics and thermodynamics of non-catalytic supercritical methanol transesterification of some vegetable oils to biodiesel,» *Energy Conversion and Management*, vol. 173, pp. 187-196, 2018.
- [20] V. F. Marulanda, G. Anitescu y L. L. Tavlarides, «Investigations on supercritical transesterification of chicken fat for biodiesel production from low-cost lipid feedstocks,» *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 54, nº 1, pp. 53-60, 2010.
- [21] V. F. Marulanda, «Biodiesel production by supercritical methanol transesterification: process simulation and potential environmental impact assessment,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 33, pp. 109-116, 2012.
- [22] Fundación FEDNA, «Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal - Grasas de origen animal,» Noviembre 2015. [En línea]. Available: [http://www.fundacionfedna.org/ingredientes\\_para\\_piensos/grasas-de-origen-animal-actualizado-nov-2015](http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/grasas-de-origen-animal-actualizado-nov-2015).
- [23] "Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources".