

**DESARROLLO DE PROCESOS ENERGÉTICOS Y DISPOSITIVOS
PARA EL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE RECURSOS:
EL PAPEL DEL INSTITUTO DE CARBOQUÍMICA**

Tomás García Martínez

Director del Instituto de Carboquímica-CSIC

Silvia Robert Rubio

Responsable de comunicación del ICQ

RESUMEN

En el presente artículo se desarrolla una visión estructural del *Instituto de Carboquímica*, del CSIC. Se realiza por una parte un análisis descriptivo de los distintos ejes de investigación que se desarrollan actualmente en esta institución, con referencia a los proyectos europeos más destacados en estas materias. También se hace referencia a los distintos grupos de investigación del ICB, así como a las patentes y transferencias de tecnología. Igualmente se exponen las distintas Unidades en las que se organizan las distintas actividades y proyectos de investigación, así como el papel de este instituto en el Espacio Europeo de Investigación.

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto de Carboquímica (ICB), ubicado en el campus universitario Río Ebro de Zaragoza, desarrolla su actividad científica en el área de Global Materia del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y desarrolla su actividad investigadora fundamentalmente en las líneas de energía y medio ambiente y los procesos químicos y materiales relacionados.

El ICB se encuentra en la vanguardia europea en líneas de investigación que suscitan gran sensibilidad social (captura de CO₂/cambio climático, contaminación atmosférica, valorización de residuos), en líneas que suponen nuevos retos tecnológicos (producción de hidrógeno y combustibles renovables) y en aplicaciones más vanguardistas (nanociencia y nanotecnología, desarrollo de nuevos sensores, pilas de combustible, baterías, supercondensadores, etc.).

Contamos con recursos humanos especializados y con instalaciones punteras para desarrollar la investigación en las diferentes líneas de trabajo. El ICB se compone de seis grupos de investigación, todos ellos reconocidos por el Gobierno de Aragón: Grupo de Combustión y Gasificación, Grupo de Conversión de Combustibles, Grupo de Nanoestructuras de Carbono y Nanotecnología, Grupo de Ingeniería de Dispositivos Electroquímicos y Fluidodinámica, Grupo de Investigaciones Medioambientales, Grupo de Procesos Químicos Avanzados, Grupo de Separación y Detección. Además, cuenta con servicios de apoyo a la investigación (Gerencia, Administración, Mantenimiento, Servicios de análisis y Biblioteca), así como posibilidades propias de incorporar personal científico, tanto con becas como con contratos, ya sea a nivel postgrado, o pre- /postdoctorales.

El Servicio de Análisis y Caracterización se ocupa de cubrir las necesidades analíticas de los investigadores del propio centro para el desarrollo de sus proyectos de investigación, así como de ofrecer el mismo servicio a investigadores de otros OPIS y universidades, a empresas y a particulares.

Las investigaciones desarrolladas se financian a través de proyectos regionales, nacionales y europeos, así como con contratos de investigación con empresas de todo el mundo.

2. HISTORIA DEL ICB

Los orígenes del Instituto de Carboquímica (ICB) se remontan a 1940, año en que se fundó el “Instituto del Combustible”, integrado en el recién constituido Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Su primer director fue Luis Bermejo Vida y, tras su fallecimiento, la sede de Madrid se trasladó en 1942 a Zaragoza, por iniciativa de su entonces nuevo director Vicente Gómez Aranda, catedrático de Química Orgánica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza.

En 1946, el centro pasó a denominarse “Instituto Nacional del Combustible”, donde el laboratorio de Zaragoza era una sección. En 1965, cambió su nombre a “Instituto Nacional del Carbón y sus Derivados”, con sede en Oviedo y departamentos en Zaragoza y León. En 1975, por acuerdo del CSIC, el Departamento de Zaragoza fue elevado a la categoría de instituto con el nombre de “Instituto de Carboquímica”, que estuvo inicialmente situado en el edificio del Paraninfo. No fue hasta 1994 que el ICB se trasladó a su actual sede en el Campus Tecnológico Río Ebro.

3. ¿QUÉ INVESTIGAMOS?

La trayectoria científica del ICB en la última década ha estado centrada en el desarrollo tecnológico de procesos energéticos y dispositivos para el aprovechamiento sostenible de recursos, especialmente de materias primas renovables. Este objetivo se concreta en el impulso de cuatro ejes que consideramos fundamentales para poder llegar a ser una sociedad totalmente descarbonizada en el año 2050 (así como a alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, concretamente, el número siete al respecto de garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y limpia para todo el mundo).

Estos cuatro ejes son:

1. Desarrollo de procesos tecnológicos para el aprovechamiento sostenible de residuos y biomasa en la producción de energía y combustibles avanzados de origen no fósil.
2. Desarrollo de tecnologías del hidrógeno para su producción sostenible y usos:
3. Desarrollo de dispositivos para el almacenamiento eficiente de energía renovable.
4. Desarrollo tecnológico de la descarbonización de procesos energéticos.

Además, el impulso a estos ejes fundamentales se ha apoyado en el desarrollo de varias líneas transversales como son la economía circular, las tecnologías analíticas y la nanotecnología. En conjunto, el desarrollo de todas estas líneas de investigación nos ha permitido dar soluciones innovadoras a retos científicos en el ámbito de la transición energética verde y nos ha llevado a ser un centro de investigación aragonés de referencia a nivel nacional e internacional, en nuestra principal área de trabajo, la energía. Un aspecto diferenciador del ICB es la singularidad de nuestra investigación, centrándose en el desarrollo de aquellas tecnologías prometedoras desde el nivel de ciencia básica hasta el TRL intermedio hasta el TRL5, preparando el terreno para la demostración de TRL alto en un entorno industrialmente relevante fuera de las instalaciones del ICB.

4. PROYECTOS EUROPEOS DESTACADOS

- *Bio Methanol Production via Chemical Looping Gasification Coupled with Membrane Reactors ([BIO-MEGAFUEL](#))*. Las tareas en las que participamos se centran en el desarrollo del proceso de Chemical Looping Gasification:

- Demostrar la idoneidad de diferentes materias primas biogénicas (al menos 5, una de ellas microalgas) para determinar la ventana operativa de cada una de ellas con el fin de minimizar el riesgo de problemas operativos a mayor escala.

- Determinar los parámetros cinéticos de materias primas seleccionadas para su uso en modelos teóricos.
 - Desarrollo de un modelo 1.5 para el proceso CLG, que junto con la cinética de gasificación determinada previamente en la Tarea 2.6 y tras la validación con los resultados obtenidos en la unidad CLG de 1 MW, se utilizará para optimizar el diseño de este tipo de unidades CLG.
- *Flexible chemical looping combustion for combined heat and power production from biogenic residues with negative emission ([BIO-FLEXCLC](#))*. Principalmente, la participación del instituto en el Proyecto se centra en la investigación del comportamiento, tanto en la Chemical Looping Combustion como en la combustión normal en lecho fluidizado circulante, de diversas biomásas en la planta piloto de 20 kW, que se ha adaptado utilizando una amplia gama de condiciones experimentales.
- *A novel multi-stage steam gasification and syngas purification demonstration plant for waste to hydrogen conversion ([HYIELD](#))*. El Instituto de Carboquímica aporta sus décadas de experiencia en tecnologías de pirogasificación para probar la configuración de gasificación del proyecto en su laboratorio, donde se encuentra un gasificador de lecho fluidizado a pequeña escala (10 kWth).
- *Pyrolysis of biomass by concentrated Solar power ([PYSOLO](#))*. Debido a la amplia experiencia del ICB en el campo de la pirólisis nos encargamos del diseño, mediante software especializado en diseño 3D “AutoCAD Mechanical”, de los componentes periféricos como la unidad de alimentación, el transporte de partículas y la separación de partículas/aire para su fabricación e instalación en el reactor de una planta piloto TRL4 basada en la tecnología de lecho fluidizado.
- *Heroes in southern Europe to decarbonize industry with CCUS ([HERCCULES](#))*. Las tareas en las que participamos dentro del proyecto son:
- Demostración en TRL7-8 y optimización del piloto de Calcium Looping en una planta de energía procedente de residuos" mediante el análisis de las condiciones de combustión del calcinador en la actuación del CaLa CE ha desarrollado una serie de programas de investigación y desarrollo para el sector de la biotecnología, que se han desarrollado en colaboración con los países de la OCDE.
 - Coordinación con el LEAP y EUCORE en las actividades necesarias para la gestión de proyectos y control de calidad.
 - Colaboración con el equipo de trabajo para crear una estrategia de compromiso y diálogos sobre la preocupación pública en relación con el CCUS.
 - Contribuir a la difusión de los resultados del proyecto a través de diferentes canales de comunicación.
- *For the circular economy of tyre domain: recycling end of life tyres into new tyres ([BLACKCYCLE](#))*. La contribución del equipo del ICB en este proyecto ha sido clave, ya que se han podido optimizar los procesos de pirólisis y destilación a una escala TRL5, maximizando la producción de materias primas secundarias con la composición apropiada para la fabricación de nuevos neumáticos, tales como negro de carbón sostenible, resinas y plastificantes.
- *Glycerol to aviation and Marine products with sustainable recycling ([Glamour](#))*. El papel que hemos desempeñado dentro del proyecto es, por un lado, liderar la evaluación de la posible ruta de purificación para el refinado del glicerol crudo. Además, participamos también en la síntesis, caracterización y ensayo de materiales funcionales a diferentes niveles de TRL; y en la modelación a nivel de partículas de las diversas reacciones que intervienen en el proceso. Por otro lado, nos dedicamos a la producción de materiales funcionales para su prueba en el TRL-5.
- *Advanced carbon capture for steel industries integrated in CCUS clusters ([C4U](#))*.

- *Demostración del proceso de Chemical Looping Gasification a escala de 1 MW para el desarrollo de combustibles de aviación a partir de biomasa (CLARA)*. La participación del ICB se ha centrado en la selección del transportador de oxígeno. Así, los resultados obtenidos a escala de 20 kW en el instituto permitieron seleccionar la ilmenita como material idóneo para el proceso. Además, se demostró la posibilidad de utilizar un nuevo método para el control del oxígeno que presentaba ventajas muy relevantes para el proceso.
- *Flexible dimethyl ether production from biomass gasification with sorption enhanced processes (FLEDGED)*. Junto al 'Instituto de Catálisis y Petroleoquímica' (ICP-CSIC), nuestra aportación se enfoca en las actividades dedicadas a la investigación básica del proceso de gasificación mejorada por sorción y la producción mejorada de DME:
 - Enfoque experimental de ambos procesos, utilizando las plantas piloto existentes (TRL 4 y a escala de laboratorio).
 - Análisis de las materias primas utilizadas en el proyecto.
 - Modelización del proceso: desarrollo y validación de un modelo simple para simular el reactor de lecho fluidizado burbujeante con los resultados experimentales que se producirán al principio del proyecto.
 - Caracterización físico-química de los catalizadores utilizados.

5. ¿QUIÉN INVESTIGA?

Los grupos de investigación del ICB se agrupan en dos grandes departamentos:

- *Departamento de Energía y Medio Ambiente*: “Buscamos generar energía sostenible minimizando el impacto sobre el medioambiente”
- *Departamento de Procesos Químicos y Nanotecnología*: “Investigamos en tecnologías relacionadas con los procesos energéticos, así como en Nanociencia y Nanotecnología”

Los/las investigadores de nuestro centro de investigación han publicado en la última década casi 800 artículos en revistas científicas, donde más de un 75% se ha publicado en revistas del primer cuartil de su área de conocimiento, siendo alrededor de un 50% publicados en revistas recogidas en el primer decil y ocupando muchas de ellas los primeros puestos.

Dentro del equipo de investigación, nueve investigadores/as han aparecido en el año 2023 en la lista Stanford de los científicos más relevantes a nivel global por sus trayectorias científicas. Y cinco de ellos/as han sido reconocidos/as entre los “Highly Cited Researchers” (Clarivate Analytics) durante cuatro años consecutivos (2015-2018), debido a su posición entre el 1% de los investigadores más citados a nivel mundial en el área de Ingeniería.

6. RECONOMICENTOS RECIBIDOS

Dentro de los galardones que el Instituto de Carboquímica ha recibido en los últimos años, destacan el reciente Premio Aragón Investiga a Entidades Públicas ‘Fidel Pagés’, otorgado por el Gobierno de Aragón. El pasado año recibimos el Premio en el "I Hackathon nacional del CSIC en 2023 al proyecto "Vanaflow" para la búsqueda de soluciones científicas para la sociedad". Por último, consideramos remarcable el 2º Premio al mejor Plan de CALIDAD de los Institutos del CSIC 2018-2021 otorgado por la Organización Central en el año 2019.

7. PATENTES Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

En la última década, se suele producir una media de dos/tres patentes licenciadas por año, de las cuales nos gustaría destacar las siguientes por estar licenciadas para su explotación:

- *Archent Nanotechnologies, S.L.* fue creada en 2018 como spin-off del CSIC, la Universidad de Zaragoza y la Universidad de Surrey. Esta empresa de base tecnológica se constituyó para la explotación de la patente licenciada “Material que comprende tectómeros de oligoglicina y nanohilos” (WO2017103317) y contó con una financiación de 120.000 euros.

La actividad de la empresa se centra en la fabricación de electrodos flexibles de nanohilos de plata con recubrimiento de tectómero sobre soportes de PET. La innovación que presentan estos dispositivos consiste en que se obtienen valores de conductividad eléctrica y transparencia superiores a la obtenida en electrodos transparentes y flexibles comerciales. Además, los recubrimientos de tectómeros proporcionan protección anti-corrosión frente a agentes ambientales -principalmente humedad y sulfuros-, que degradan la estructura de los nanohilos de plata con facilidad y, por tanto, limitan la vida útil de los electrodos.

Los electrodos con nanohilos de plata son de gran interés actual en componentes de células solares, OLEDs, en pantalla táctiles, en dispositivos electrónicos flexibles y wearables y en, general, en sensores para aplicaciones en dispositivos de almacenamiento de energía. De este modo, estos dispositivos permitirán mejorar las prestaciones de muchos dispositivos, incrementando su vida útil y, por tanto, reduciendo la necesidad de recursos y el impacto medioambiental.

- *Vanaflow Energy Systems S.L.* es una empresa de base tecnológica centrada en el diseño, fabricación y comercialización de baterías de flujo redox de vanadio (BFRV). Estos dispositivos son sistemas de almacenamiento de energía a gran escala, en especial la generada mediante fuentes renovables, los cuales son claves para la transición energética.

Esta empresa es el resultado de los desarrollos tecnológicos y conocimientos adquiridos por investigadores del ICB junto a otros institutos del CSIC, que han permitido desarrollar prototipos de BFRV de diversas potencias y energías. Como rasgo distintivo, *Vanaflow* dispone de tecnología propia para fabricar todos estos productos.

Para proteger sus desarrollos, los investigadores promotores ya han solicitado dos patentes sobre los métodos de fabricación de los stacks (ES1641.1961-PRIO: Batería de flujo redox estanca y método de montaje de la misma y ES1641.1962-PRIO: Batería de flujo redox con distribuidores de electrolitos con canales integrados y método de fabricación de la misma), y también tienen protegido el sistema de monitorización y control (BMS) de los stacks a través de una Red BLOCKCHAIN de Signeblock (Ref.: 103628Z). De forma destacable, en estos momentos se dispone de un prototipo de 50 kW para demostrar la tecnología desarrollada.

Nuestro centro también se ha implicado en la transferencia de conocimiento a través de contratos de I+D con empresas, tanto nacionales (CEPSA, SERTEGO SERVICIOS MEDIOAMBIENTALES, S.L.U., SENER INGENIERIA Y SISTEMAS, SA, Grupo ANTOLÍN S.A.U, BSH Electrodomésticos España S.A., GREENVAL TECHNOLOGIES S.L., KALFRISA, entre otras) como internacionales (SENAI/PETROBRAS (Brasil), MANUFACTURE FRANÇAISE DES PNEUMATIQUES MICHELIN, HYCAMITE, ACCIONA, ARKEMA, DOW CHEMICALS, ELANOVA, entre otras).

En esta línea, el ICB ha realizado transferencia de tecnología para la explotación de una tecnología disruptiva para la producción de combustibles no fósiles a partir de residuos poliméricos. Nuestro centro es cotitular de una patente de un modelo de reactor para llevar a cabo la pirólisis de caucho procedente de neumáticos fuera de uso y otros materiales poliméricos.

En esta patente se describe un modelo de reactor que tiene la particularidad de maximizar la producción de líquido pirolítico a la vez que mantiene un mínimo contenido en material volátil en el producto sólido también generado. La patente que recoge este diseño es copropiedad del CSIC y de la empresa Greenval Technologies S.L., si bien los derechos de explotación se transfirieron en su totalidad a ésta última.

Para demostrar la idoneidad de este diseño de reactor, la empresa Greenval Technologies S.L. construyó una planta industrial de pirólisis en la que se están procesando de forma continua aproximadamente 3.000 Tm/año de neumáticos fuera de uso. En la actualidad, la empresa está tramitando las licencias y permisos para construir otras plantas de mayor tamaño en las que se replicará el diseño recogido en la patente.

8. COLABORACIONES E INTERCAMBIOS

El Instituto de Carboquímica ha sido reconocido como un instituto de investigación atractivo para la formación y desarrollo profesional de investigadores jóvenes, participando activamente en distintas iniciativas internacionales y obteniendo el reconocimiento a esta tarea formadora por distintas instituciones nacionales e internacionales.

Por un lado, destacamos nuestra participación en cinco redes internacionales de formación de personal investigador: *Enabling Excellence, Graphene-based materials for technologies; Comprehension, Commerce and Communication (ENEX); Plasma catalysis for CO2 recycling and green chemistry (PIONEER); Bimetallic catalyst knowledge-based development for energy applications (BIKE); Innovative eutectogels for emerging applications.*

También es destacable el hecho de ser una entidad de acogida de varios investigadores postdoctorales internacionales Marie Curie en los últimos años, así como de numerosos investigadores postdoctorales financiados por los programas Juan de la Cierva y Ramón y Cajal de la AEI o investigadores de excelencia ARAID.

Es un orgullo para nuestra entidad que muchos de nuestros/as doctorandos/as (que se titulan a razón de unas 5 tesis doctorales anuales) ocupen actualmente puestos relevantes dentro del sistema de I+D nacional e internacional, tanto a nivel académico como a nivel industrial.

9. UNIDAD DE DIVULGACIÓN Y COMUNICACIÓN CIENTÍFICA

Tras largo tiempo desarrollando una intensa y prolífica actividad en el ámbito de la divulgación científica, paralela a toda su actividad investigadora, el ICB materializó en 2024 la consolidación de una unidad específica para coordinar, abordar y gestionar estas actividades. La Unidad de Divulgación y Comunicación científica (UDICI) del ICB nació con el objetivo de promover líneas de actuación específicas que hagan crecer al instituto y aumentar su visibilidad, y plantear una estrategia de actuación a medio plazo con objetivos, indicadores e impacto medibles. La UDICI adquiere por tanto competencias fundamentales siguientes:

Actividades de Divulgación y Comunicación de la Ciencia

Esta línea de actuación se centra en seguir llevando a cabo el consolidado recorrido, tanto de oferta de actividades a nivel local como de colaboraciones en otros foros e instituciones, acorde a un programa anual. Dichas actividades incluyen, entre otras, visitas guiadas de estudiantes preuniversitarios, organización de eventos relacionados con el 11F u 8M, o participación en actividades de Delegación regional / CSIC central (Semana de la Ciencia) y externas (*Pint of Science*, Noche Europea de Investigadores, Carreras por la Ciencia, una Ingeniera en cada cole, etc.). También se abordan cuestiones relacionadas con la planificación y ejecución de la comunicación científica, tanto a nivel interno del ICB (Boletín mensual, página web, redes sociales) como a nivel interinstitucional e informativo (notas de prensa, medios audiovisuales).

Ciencia en Abierto

Con esta línea de actuación se trata de seguir abordando y reforzar todos aquellos aspectos relativos a la facilitación del acceso de los resultados de investigación generados en el ICB a todo el

público, ya sea especializado o general, mediante herramientas de acceso abierto, repositorios digitales, etc.

Ciencia Ciudadana

A este respecto, aún no abordado por el personal del ICB, se trata de iniciar al propio instituto en actividades e iniciativas que impliquen la participación del público general en actividades de investigación científica dentro de las líneas existentes del ICB, fomentando que la ciudadanía contribuya activamente a la ciencia, ya sea con su esfuerzo intelectual, sus conocimientos locales o con sus herramientas y recursos.

Para todos los aspectos anteriormente mencionados, la UDICI traza distintos planes de actuación y programas anuales, fruto de reuniones periódicas entre sus miembros constituyentes. Dichos planes incluyen una programación de actividades, la coordinación y asesoramiento de actividades e iniciativas individuales en materia de divulgación y comunicación científica de todo el personal del ICB, así como una estrategia de formación de todas las personas directamente involucradas en la UDICI, para la adquisición y mejora de competencias.

En contacto directo con la UDICI y operando paralelamente con fines de divulgación científica inclusiva, el ICB cuenta con la iniciativa “Incluciencia” (incluciencia.csic.es), creada en 2017 por el científico coordinador de la UDICI, que aporta actividades y materiales para generar impacto en grupos de estudiantes adolescentes con alto riesgo de exclusión académica, fracaso/abandono escolar o exclusión social. Recientemente, el ICB a través de la UDICI e INCLUCIENCIA ha conseguido establecer una colaboración con la entidad social O.N.C.E., con quien ya se han realizado actividades conjuntas, y también tiene representación en el grupo de trabajo de Ciencia Inclusiva dentro de la Vicepresidencia Adjunta de Cultura Científica del CSIC.

10. UNIDAD DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA

La Unidad de Vigilancia Tecnológica (UVT) del Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC), fue creada en 2024 en el marco del Proyecto MaX-CSIC, una iniciativa que promueve la excelencia científica dentro de la institución. La creación de esta unidad pretende fortalecer todas las actividades de transferencia llevadas a cabo desde el instituto. Una de sus primeras actuaciones ha consistido en la elaboración de un Catálogo de Prestaciones Tecnológicas. Las instalaciones más relevantes incluidas en dicho catálogo son instalaciones para el desarrollo e investigación de procesos de pirólisis, combustión y gasificación, en un nivel de desarrollo tecnológico intermedio (*Technology Readiness Level (TRL) 4-5*). Varias de estas instalaciones están basadas en la tecnología de lechos fluidizados. Existen sistemas con lechos fluidizados interconectados para el desarrollo de tecnologías de captura de CO₂ basadas en transportadores de oxígeno. Otras instalaciones están dedicadas a procesos de separación, como es el caso de varias columnas de destilación, también a escala *TRL 4-5*. También se dispone de bancos de ensayo para pilas de combustible de hasta 50 kW, de ensayo de electrolizadores hasta 5 kW y de baterías de flujo para dispositivos en el rango de mW hasta 10 kW.

11. INSTALACIONES DESTACADAS

Planta piloto TRL-4/5 de lecho fluidizado burbujeante (BFB)

El reactor de lecho fluidizado burbujeante (BFB, según sus siglas en inglés) consta de un recipiente de acero inoxidable de 3 m de altura y una zona de fondo densa de 0,6 m. Dos corrientes sólidas diferentes pueden alimentarse por separado en el fondo del reactor por medio de dos alimentadores de tornillo independientes, que permiten alcanzar caudales másicos que van



de 2 a 10 kg/h. Un flujo continuo de sólidos convertidos se recoge en una tolva que puede descargarse periódicamente durante el funcionamiento. Dos ciclones de alta eficiencia separan los sólidos arrastrados del gas antes de ser enviados a los reactores de acondicionamiento. Hay cuatro reactores de lecho fijo colocados aguas abajo del reactor BFB, diseñados específicamente para la eliminación de impurezas presentes en el gas y/o la síntesis de un producto específico.

Esta instalación BFB se ha utilizado para demostrar la viabilidad de la gasificación mejorada por sorción de diferentes materias primas y residuos de biomasa con el objetivo de producir gas de síntesis a medida (contenidos específicos de H_2 , CO y CO_2) e hidrógeno. Además, en esta instalación se han ensayado otras tecnologías de gasificación (gasificación por aire y O_2 /vapor) utilizando materias primas diversas. En esta planta también se han realizado ensayos de combustión y campañas de calcinación de piedra caliza, enfocados a complementar las investigaciones anteriores. En esta planta piloto de BFB se han llevado a cabo diferentes proyectos de la UE (H2020), proyectos nacionales y contratos de empresas privadas.

Reactor Auger TRL-5 planta piloto

La planta de pirólisis TRL5 ha sido diseñada para procesar una variedad de materias primas, desde biomasa hasta diferentes residuos plásticos, con una capacidad nominal de aproximadamente 10 kg/h. El reactor de pirólisis es de tipo barrena, con un tornillo interno que transporta el material de un extremo al otro. Cuatro resistencias eléctricas independientes rodean la parte exterior del reactor, suministrando la energía necesaria para el proceso de pirólisis. Esta configuración permite la creación de diferentes perfiles de temperatura en función de los objetivos específicos del proceso. El sistema de alimentación incluye dos tolvas agitadas independientes, cada una capaz de contener aproximadamente 20 kg de material. Cada tolva está equipada con un tornillo de alimentación que tiene un convertidor de frecuencia, lo que permite que el sistema maneje varios caudales másicos. La materia prima se alimenta en el lado de la transmisión y el producto convertido se descarga continuamente desde el extremo opuesto. El gas pirolítico producido durante el proceso se enfría en un condensador, que lo condensa en aceite pirolítico. El gas no condensado sale del sistema y se dirige a una antorcha donde se quema. Las entradas estratégicas para el gas inerte (N_2) se colocan en puntos clave del reactor para minimizar la intrusión de aire y facilitar la circulación del gas al condensador. La planta piloto también está dotada de un sistema de control y adquisición de datos para regular las variables clave y monitorizar la presión y la temperatura en los puntos críticos.



A través de este proceso, se pueden recuperar fracciones renovables valiosas, como el bioaceite y el biocarbón, al procesar la biomasa. Además, el sistema es lo suficientemente versátil como para procesar diversos residuos plásticos, recuperando fracciones valiosas que pueden reintegrarse a la producción de nuevos productos, apoyando así la economía circular. Por ejemplo, se puede recuperar una fracción sólida (negro de humo recuperado en bruto, RRCB) y una fracción líquida del procesamiento de neumáticos al final de su vida útil, que se pueden reutilizar en la fabricación de neumáticos nuevos. Del mismo modo, los líquidos con altas concentraciones de estireno o metacrilato de metilo (MMA) pueden obtenerse a partir de residuos de poliestireno o PMMA, respectivamente, y purificarse para producir nuevos polímeros. Estos procesos son vitales para abordar los desafíos de la transición energética en curso.

Columna de destilación TRL-5 de lecho empacado

La unidad de destilación a escala piloto es una sola columna empaquetada de 3,5 m de altura de empaque y 4 m de altura total. La columna de destilación considera ocho etapas mínimas de equilibrio teórico, lo que da como resultado una altura equivalente a una placa teórica de 0,5 m. La columna tiene un diámetro interno de 11 cm y utiliza anillos de palio de acero inoxidable dispuestos al azar de 1 pulgada como empaque, en los que las aberturas se hacen doblando tiras de la superficie en el anillo. Esta característica aumenta el área libre y mejora las condiciones de distribución del líquido dentro de la columna para la transferencia de masa entre las fases líquida y gaseosa. La densidad y superficie de estos Anillos Féricos son de 481 kg/m^3 y $210 \text{ m}^2/\text{m}^3$, respectivamente. La columna empaquetada funciona en modo continuo y es capaz de procesar hasta 20 kg/h de aceite de pirólisis de neumáticos (TPO), lo que coloca a la planta dentro del quinto nivel de preparación tecnológica (TRL-5).



La materia prima a destilar se almacena y se bombea hacia la columna mediante el uso de una bomba peristáltica. La materia prima se puede alimentar a la columna desde tres puntos diferentes a lo largo de la columna, siendo el más común el centro de la columna. La sección por debajo de este punto de alimentación se conoce como sección de pelado, ya que los componentes más volátiles se separan de la materia prima; mientras que la sección por encima de la alimentación se denota comúnmente como la sección rectificadora, ya que aumenta la concentración de los componentes más volátiles.

Cada línea de alimentación está provista de válvulas neumáticas, que están acopladas al sistema de control y adquisición. Además, la columna está provista de ocho termopares y transductores de presión ubicados a lo largo de la columna de destilación, incluidos los del hervidor. Estas señales ayudan a monitorear el progreso del proceso de destilación, es decir, el estado transitorio y estacionario, así como a identificar cualquier posible mal funcionamiento.

La energía requerida para la destilación es proporcionada por el hervidor. Los vapores producidos se mueven hacia arriba por la columna en contacto constante con la corriente de alimentación descendente. Los vapores de bajo peso molecular se convierten en la "fracción ligera" cuando llegan al condensador. El hervidor contiene un calentador eléctrico (8 kW). El condensador consta de un intercambiador de calor de contraflujo de carcasa y tubos y utiliza agua del grifo para enfriar la corriente de gas que sale de la columna. La "fracción ligera" sale del condensador por gravedad y se almacena en una disposición de dos tanques de almacenamiento conectados en serie. El tanque superior actúa como un depósito para bombear la fracción ligera a la columna de destilación para evaluar la influencia del reflujo durante el proceso de destilación. El tanque inferior se utiliza para el almacenamiento y el muestreo. Los compuestos moleculares superiores bajan por la columna de destilación, justo debajo del hervidor. Estos compuestos constituyen la "fracción alta".

Planta piloto de 50 kW_t para la combustión de combustibles sólidos con captura de CO₂ inherente mediante tecnología Chemical Looping Combustion (CLC)

Esta planta piloto se emplea para la combustión de combustibles sólidos con captura de CO₂ a través de procesos de Chemical Looping Combustion (CLC). La tecnología CLC se basa en la transferencia de oxígeno del aire al combustible a través de un transportador de oxígeno, normalmente un óxido metálico, que se encuentra circulando continuamente entre dos reactores de lecho fluidizado circulante interconectados, denominados reactor de reducción (RR) y reactor de oxidación (RO). De esta manera, se evita el contacto entre el combustible y el aire durante todo el proceso de combustión. En el reactor de reducción tiene lugar la oxidación del combustible a CO₂ y vapor de agua por la acción del transportador de oxígeno, que queda en estado reducido (MxOy-1). Así, mediante la simple

condensación del vapor de agua, se obtiene una corriente muy concentrada de CO₂ que tras una etapa de purificación y compresión está lista para su transporte y almacenamiento. Posteriormente, el transportador de oxígeno en estado reducido es enviado al reactor de oxidación donde se oxida con aire regenerándolo hasta su estado oxidado (MxOy), lo cual lo deja listo para ser reenviado al reactor de reducción y comenzar un nuevo ciclo. La corriente de salida del reactor de oxidación está compuesta principalmente por N₂ y algo de O₂ sin reaccionar, ya que el suministro de aire se realiza con un exceso sobre la cantidad estequiométrica necesaria. Las temperaturas habituales de operación en ambos reactores están entre los 700 y 1000 °C.

Esta planta piloto también incluye un separador de carbono (SC) diseñado como un lecho fluidizado burbujeante y situado entre los reactores de reducción y oxidación. Su función consiste en separar las partículas de char de las del transportador de oxígeno (en la corriente de sólidos que abandona el reactor de reducción) mediante elutriación selectiva para recircularlas de nuevo al reactor de reducción. Además, el diseño incluye un lecho de cierre doble o loop-seal doble (LS-D) ubicado entre el ciclón del reactor de reducción y el separador de carbono para regular independientemente la velocidad de circulación del transportador de oxígeno entre los reactores de reducción y oxidación. Todos los reactores están unidos por lechos de cierre (LS) para impedir la mezcla de gases. La planta piloto dispone de dos sistemas con válvulas de desviación situados tras sendos ciclones para la medida directa de la velocidad de circulación. Además, la unidad está equipada con analizadores de gases en línea y un sistema de recuperación de alquitranes.

La potencia nominal de esta planta piloto se sitúa entre 20 y 50 kW (TRL 5) dependiendo de si opera en modo iG-CLC (in situ gasification Chemical Looping Combustion) o en modo CLOU (Chemical Looping with Oxygen Uncoupling), respectivamente. Además, esta planta tiene la versatilidad de poder operar en condiciones de gasificación (Chemical Looping Gasification) para la producción de gas de síntesis e hidrógeno.

Esta instalación fue construida en el año 2013 en el marco de un proyecto de investigación nacional (ENE2010-19550) y desde entonces se ha empleado para llevar a cabo diferentes proyectos nacionales (PDC2021-1211190-I00, TED2021-129842B-I00) y europeos (RFCP-CT-2012-00006, H2020-LC-SC3-2018-2019-2020). A lo largo de este tiempo, en esta instalación se han valorado energéticamente diferentes combustibles sólidos con captura inherente de CO₂ tales como carbón, biomasa (hueso de aceituna, residuo forestal de pino, pellets de paja) y plásticos (cloruro de polivinilo-PVC y polipropileno-PP) haciendo uso de transportadores de oxígeno de origen sintético (óxidos metálicos basados en cobre, hierro, manganeso y titanio) y natural (minerales de hierro como la ilmenita). Finalmente, los principales hitos de investigación logrados hasta este momento (diciembre de 2024) en esta planta piloto han sido los siguientes:

- Primera campaña experimental de combustión de biomasa en una planta piloto en continuo operando en modo CLOU con obtención de emisiones negativas de CO₂.
- Primera campaña experimental de gasificación de biomasa en una planta en piloto en continuo (CLG) controlando la cantidad de oxígeno alimentada al reactor de oxidación con un análisis detallado de todas las variables de operación del proceso.

Instalación de batería de flujo redox de vanadio (VRFB)

El VRFB está formado por 32 pilas, que se agrupan en 8 cadenas para generar 50 kW. Cada pila consta de 14 celdas con placas bipolares de grafito, membranas poliméricas de intercambio aniónico y electrodos de fieltro de carbono modificados térmicamente con un área de 1.400 cm². Las placas y membranas bipolares están integradas en marcos de flujo, y el sistema de sellado es una tecnología patentada. Las 4 pilas que forman cada cadena están conectadas en paralelo hidráulica y eléctricamente en serie. Las



cuerdas se montan en marcos independientes para facilitar las tareas de mantenimiento y se colocan a ambos lados del contenedor.

El sistema energético consta de dos depósitos de 3 m³ donde se almacena el electrolito, que proporcionan una capacidad de almacenamiento de 100 kWh, disponiendo cada uno de ellos de un sistema de medición de estado de carga (SoC). El sistema hidráulico también incluye un grupo de bombeo con 4 bombas centrífugas controladas por frecuencia y el correspondiente sistema de tuberías y válvulas que permite la fácil regulación del caudal de electrolito.

La arquitectura eléctrica consta de varios buses de diferentes voltajes tanto en corriente continua (DC) como en corriente alterna (AC), que están formados por diferentes convertidores de potencia y fuentes de alimentación. Para convertir y gestionar la potencia demandada y generada por el VRFB, se dispone de un convertidor frontal AC-DC bidireccional que produce el bus DC de alta tensión (690 V). En este punto, las cadenas de las pilas (40-80 V) se conectan a través de convertidores CC/CC bidireccionales aislados. El VRFB dispone de un sistema de medición integrado en el sistema de gestión de baterías (BMS) con sensores para detectar posibles fugas de gas, el nivel de altura en los depósitos y la presión y caudal del electrolito.

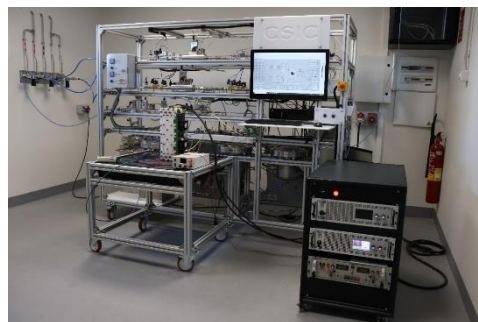
Además, la batería cuenta con un software de control (EPC) desarrollado en el proyecto para la gestión de la energía, que garantiza el funcionamiento óptimo y seguro de todo el sistema. Este software se encarga de controlar el sistema hidráulico, gestionar el control térmico y recibir las mediciones del BMS y monitorizar el estado general del sistema, activando alarmas en caso de detectar averías o averías. También proporciona una API al usuario para comandar la potencia de entrada o salida deseada utilizando el protocolo MQTT a través de una conexión Ethernet. Otra función clave del software es gestionar la telemetría de las variables del sistema para monitorizar de forma remota y continua el rendimiento del sistema y detectar problemas o fallos en tiempo real.

La batería está alojada dentro de un contenedor *high-cube* de 12,2 m de largo especialmente diseñado para acomodar los diferentes elementos. Garantiza la seguridad y el transporte rápido, garantizando la integridad de los diferentes dispositivos. Dispone de dos puertas dobles en ambos extremos y un armario para facilitar la conexión eléctrica. El exterior del contenedor está pintado con pintura epoxi anticorrosión y el interior con pintura antiácida. También dispone de un polipasto manual para facilitar las labores de mantenimiento y montaje. El autoconsumo total de energía de la batería es de unos 6,5 kW.

La VRFB de 50 kW puede funcionar de forma aislada o conectada a la red eléctrica. Para probar experimentalmente el potencial del VRFB, se ha desarrollado una microrred inteligente en el ICB, que constituye una instalación experimental flexible donde se puede probar con alta precisión la integración de energías renovables con sistemas de almacenamiento de energía, así como estudios de estabilización de la red. La microrred consta de un campo solar fotovoltaico de 35 kWp instalado en la cubierta del Edificio 4, una batería de iones de litio de segunda vida de 46 kWh, diferentes cargas bidireccionales y convertidores, así como el sistema de gestión de energía.

Banco de pruebas de pilas de combustible

El banco de pruebas de pilas de combustible PEM ha sido diseñado y construido por miembros del grupo para estudiar y caracterizar pilas de hasta 50 kW de potencia eléctrica. Como característica distintiva, que la convierte en un diseño único, esta instalación cuenta con tres líneas diferentes para cada uno de los gases reactivos (H₂ y O₂), ya que el rango dinámico de los controladores de masa actuales no permite cubrir todos los valores de caudal necesarios con un solo controlador. Así, con una sola instalación es posible operar en los siguientes caudales



desde 0,024 lN/min hasta 1600 lN/min. También cuenta con un sistema de humidificación por burbujeo que se encarga de proporcionar las condiciones de temperatura y humedad deseadas a las corrientes de gas reactivo, especialmente para pilas PEM de baja temperatura, así como un sistema de recogida de agua mediante un intercambiador de contracorriente que permite cuantificar la cantidad de agua generada por reacción química en la chimenea. Además, cuenta con otros dos sistemas: el sistema de medición y control, que asegura que los reactivos lleguen a la pila con los parámetros adecuados de caudal, presión, temperatura y humedad relativa; y el sistema de seguridad, que se encarga de prevenir cualquier tipo de accidente o minimizar los daños sufridos en caso de que se produjera. El control automático incluye software específico en LabView también desarrollado por miembros del grupo de investigación. El banco se puede controlar y monitorear de forma remota.

Banco de pruebas de electrolizadores de agua

Diseñado para probar electrolizadores de agua a baja temperatura con potencias de hasta 5 kW. Incluye un sistema de suministro de agua desionizada con un controlador de masa de caudal y una fuente de alimentación de DC si es necesario. Se miden la presión y la temperatura de entrada de agua. También se controlan los caudales de oxígeno e hidrógeno, la presión y la temperatura. Además, también se puede medir el contenido de agua y oxígeno en la corriente de hidrógeno. La presión de salida de la pila se puede controlar para que pueda funcionar hasta 35 bar. El hidrógeno generado se puede almacenar en un estante de botellas después de la presurización a 200 bar. Se puede medir el consumo total de energía, así como el voltaje de cada celda. El banco se puede controlar y monitorear de forma remota. Si se requiere una parada de emergencia, todo el banco se purga automáticamente con nitrógeno. Se ha instalado un sistema de escape ATEX para evacuar cualquier posible fuga de hidrógeno que sería detectada por un sensor de hidrógeno.

12. EL ICB DENTRO DEL CSIC

El Instituto de Carboquímica forma parte del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, el mayor organismo público de investigación de España y uno de los más destacados del Espacio Europeo de Investigación (ERA). Además, es el principal agente de ejecución del Sistema Español de Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTI).

Actualmente somos más de 13.800 personas repartidas entre la Organización Corporativa (ORGC) del CSIC y los 121 institutos de investigación y tres centros nacionales (CN), distribuidos por toda la geografía española y entre los que se incluye también un Instituto en Roma. La actividad investigadora del CSIC se encuadrada en tres grandes áreas globales, Sociedad, Vida y Materia, que cubren la gran mayoría de las disciplinas del conocimiento humano.

Podríamos resumir el CSIC en las siguientes cifras: 14.000 artículos publicados al año, 5.000 proyectos en ejecución, 450 tecnologías protegidas y 700 tesis defendidas al año.

El CSIC es una Agencia Estatal para la investigación científica y el desarrollo tecnológico, adscrita al Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades. Y, por tanto, un organismo público con personalidad jurídica diferenciada, patrimonio y tesorería propios, autonomía funcional y de gestión, plena capacidad jurídica y de obrar y de duración indefinida.

Esta condición también establece que tiene como misión el fomento, la coordinación, el desarrollo y la difusión de la investigación científica y tecnológica, con el fin de contribuir al avance del conocimiento y al desarrollo económico, social y cultural, así como a la formación de personal y al asesoramiento a entidades públicas y privadas en estas materias.