

# El papel de los procesos catalíticos en la producción de biocombustibles avanzados para un transporte aéreo sostenible

**Juan A. Melero, Gabriel Morales, María Ventura**

Instituto de Investigación de Tecnologías para la Sostenibilidad. Universidad Rey Juan Carlos (URJC)  
Grupo de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Rey Juan Carlos (URJC)

**Patricia Pizarro**

Grupo de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Rey Juan Carlos (URJC)  
Unidad de Procesos Termoquímicos. Fundación IMDEA Energía

**Marta Paniagua**

Grupo de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Rey Juan Carlos (URJC)

Los combustibles sostenibles de aviación (SAF) son esenciales para descarbonizar el transporte aéreo bajo una creciente presión regulatoria. El artículo muestra cómo el diseño de procesos y catalizadores innovadores juegan un papel clave en la transformación de biorresiduos en biocombustibles compatibles con los motores actuales de las aeronaves e impulsando una aviación de bajas emisiones.

**PALABRAS CLAVE:** Biorresiduos; SAF; Elongación de cadena; Oligomerización; HDO.

Sustainable aviation fuels (SAF) are essential for decarbonizing air transport under increasing regulatory pressure. The article shows how the design of innovative processes and catalysts play a key role in converting biowaste into biofuels compatible with current aircraft engines for low-emission aviation.

**KEYWORDS:** Biowastes; SAF; C-C coupling reactions; Oligomerization; HDO.

## CONTEXTO ACTUAL: DESAFÍOS DE FUTURO

El transporte aéreo depende casi por completo de los combustibles fósiles, lo que plantea varios desafíos a corto plazo. Estos retos no provienen solo del agotamiento de las reservas de petróleo, sino también de la necesidad urgente de cumplir los acelerados objetivos de descarbonización. No hay que olvidar que el tráfico aéreo es responsable por sí solo de, aproximadamente, el 2,5 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> [1-2].

En el contexto europeo, la Agencia Europea de Medio Ambiente indica que las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector aéreo en Europa podrían incrementarse un 45 % entre 2014 y 2035. Hoy en día, la aviación en Europa representa el 14 % de las emisiones globales del transporte y cerca del 4 % del total de emisiones. Frente a esta situación, la Comisión Europea ha planteado varias medidas [3]:

**1. Instrumentos basados en el mercado del CO<sub>2</sub>,** como sistemas de comercio de emisiones.

**2. Mejoras en la gestión del tráfico aéreo,** para hacer los vuelos más eficientes.

**3. Investigación en diseños y tecnologías de aeronaves más eficientes.**

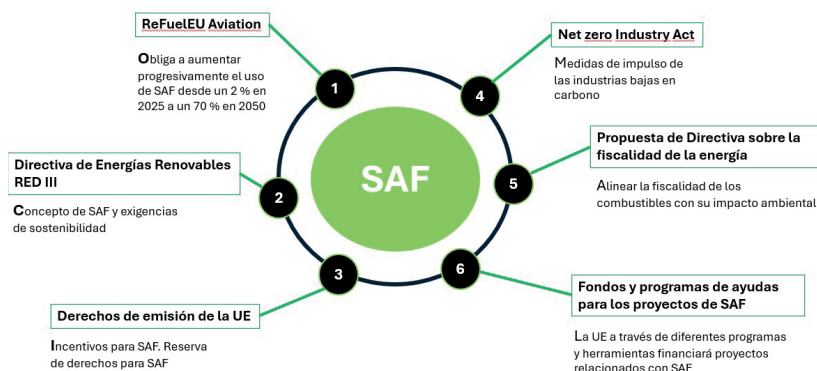
**4. Aumento del uso de combustibles de aviación sostenibles (SAF),** como biocombustibles avanzados y combustibles sintéticos definidos en la Directiva de Energías Renovables.

Para ello, la UE pretende establecer un marco regulatorio para impulsar el SAF a través de distintos instrumentos normativos (Figura 1).

Ante este marco regulatorio, se están impulsando importantes esfuerzos tecnológicos y de investigación orientados a identificar fuentes alternativas que permitan producir SAF [4-5].

Estos combustibles ya se consideran

FIGURA 1. Marco regulatorio para el impulso de la producción de SAF



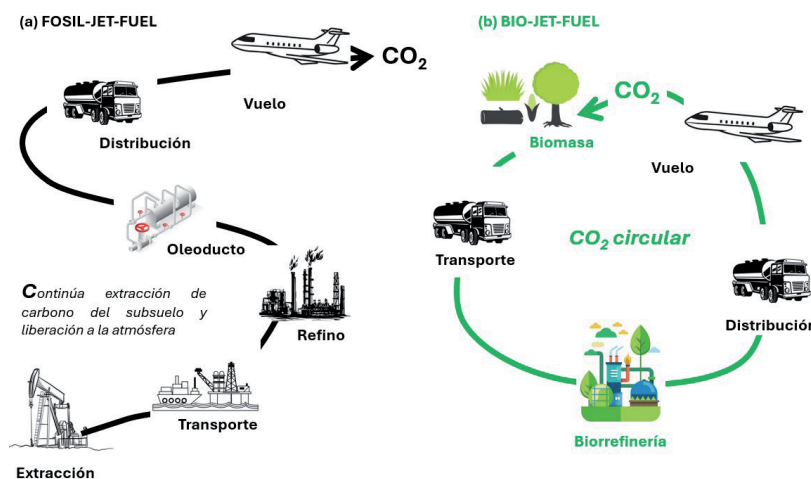
una opción real para sustituir al queroseno fósil, especialmente porque las tecnologías de aviación “cero emisiones” —como los aviones eléctricos o los propulsados por hidrógeno— tardarán todavía décadas en estar lo suficientemente maduras como para tener un papel relevante en la aviación comercial. Además, los SAF tienen la ventaja de ser compatibles con los motores y la logística de distribución actuales, lo que permite utilizarlos como combustibles “drop-in”.

A pesar de su potencial, los SAF se encuentran aún en una fase inicial de desarrollo. En 2024 se produjeron y consumieron, en todo el mundo, alrededor de 1.300 millones de litros, lo que representa menos del 0,3 % del uso total de combustibles de aviación, según la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA). Su despliegue masivo todavía se enfrenta a nu-

merosos obstáculos: el alto coste de fabricación, la necesidad de escalar los procesos productivos y la disponibilidad de las materias primas adecuadas.

Los combustibles sostenibles de aviación (SAF) incluyen tanto biocombustibles avanzados como los llamados *e-fuels* (combustibles sintéticos producidos usando energía renovable), y tienen el potencial de reducir de forma importante las emisiones de gases de efecto invernadero del sector aéreo. En algunos casos, estos combustibles pueden llegar a recortar hasta un 80 % de las emisiones en comparación con el queroseno convencional al trabajar con un CO<sub>2</sub> circular dependiendo de los tipos de procesos (Figura 2). Además, se debe señalar que también permiten reducir las emisiones de SO<sub>2</sub>, partículas y NOX en un 100 %, 50-90 % y 10 %, respectivamente [6-7].

FIGURA 2. Ciclo de carbono (a) Jet-fuel fósil (b) Bio-jet fuel



### TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES AVANZADOS PARA TRANSPORTE AÉREO

El queroseno de aviación es un combustible de alta exigencia técnica y debe cumplir la norma ASTM D1655, además de contar con la certificación ASTM D7566 cuando se trata de combustibles sostenibles. Existen varias rutas para convertir la biomasa en combustibles de aviación (Figura 3) [5].

La mayoría de estas rutas se encuentran aún en fases pre-comerciales (a escala demostrativa, piloto o incluso laboratorio). Hasta ahora, solo seis tipos de combustibles producidos mediante estos procesos han sido aprobados por la normativa ASTM D7566 para mezclarse con el queroseno convencional en proporciones de hasta el 50 % [8-10].

En la actualidad, la mayor parte del bio-queroseno disponible procede de materias primas oleaginosas, como aceites vegetales, grasas animales o aceite de cocina usado, a través del proceso HEFA. Esta vía se ha impuesto en la actualidad porque es relativamente sencilla y ofrece rendimientos másicos elevados entre un 80-90 % con respecto a la materia prima de partida [9]. Sin embargo, su expansión de futuro presenta limitaciones claras debido al elevado coste de la materia lipídica y su limitada disponibilidad, lo que hace que esta vía sea insuficiente para cubrir las necesidades futuras del sector.

Por este motivo, en los últimos años ha despertado un gran interés la conversión catalítica de residuos lignocelulósicos, un recurso abundante y mucho más económico (alrededor de 0,08 €/kg en seco). Muchas de las rutas tecnológicas que se investigan parten precisamente de este tipo de residuos. No obstante, su comercialización aún se enfrenta a importantes barreras, principalmente debido a los elevados costes de los procesos y a sus rendimientos másicos relativamente bajos (10-20 % referido a residuo seco) [9].

La vía *Fischer Tropsch* (FT) —la primera que obtuvo certificación ASTM— sigue sin estar completamente implantada a nivel comercial. Existen proyectos relevantes que buscan demostrar su viabilidad a partir de biomasa, pero por ahora, las expectativas del sector aéreo no se han cumplido. La tecnología FT todavía afronta desafíos importantes, como la limpieza del gas de síntesis, la contaminación de los catalizadores o las dificultades inherentes al escalado industrial.

La pirólisis, otra ruta prometedora, se enfrenta al inconveniente de que los bioaceites obtenidos tienen una calidad baja, lo que hace costoso su posterior refinado para convertirlos en combustibles de aviación y la necesidad de un excesivo consumo de hidrógeno.

Por su parte, la vía *alcohols to jet* (ATJ) a partir de azúcares, compite directamente con el transporte terrestre y se ve

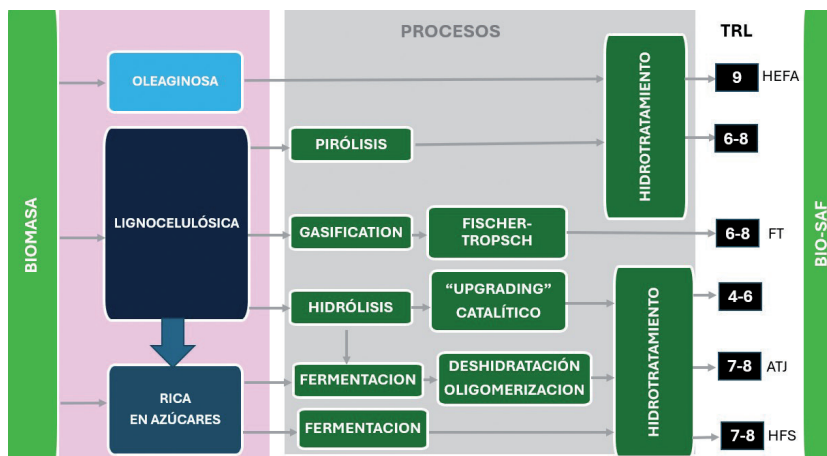
limitada por los bajos rendimientos asociados a la producción de los alcoholes de partida. Algo similar ocurre con la ruta HFS (*Hydroprocessing of Fermented Sugars*), cuya eficiencia se ve condicionada por la baja conversión de glucosa a farneseno, en torno al 15 %.

En este contexto, en los últimos años ha despertado un gran interés la valorización catalítica de intermedios moleculares obtenidas a partir de biorresiduos mediante procesos catalíticos o biológicos (ver Figura 4 en la siguiente página) [11-13]. En este enfoque tecnológico, las moléculas complejas presentes en estos biorresiduos se transforman en moléculas más simples (con menos de seis átomos de carbono).

Estos intermedios moleculares pueden reaccionar entre sí mediante diferentes procesos catalíticos de acoplamiento carbono carbono —como la condensación aldólica, la hidroalquilación, la cetonización o la oligomerización— que permiten alargar de forma controlada las cadenas de carbono. Tras esta etapa, los compuestos resultantes pueden convertirse finalmente en hidrocarburos dentro del rango adecuado para combustibles de aviación (C8–C16) mediante reacciones de hidrogenación y hidroxigenación (HDO).

Una de las ventajas de esta estrategia es que requiere condiciones de reacción relativamente suaves y utiliza materias primas menos complejas que otros procesos termoquímicos. Esto puede traducirse en mayor selectividad hacia los productos deseados y en un consumo energético menor, lo que la convierte en una vía especialmente atractiva desde el punto de vista económico y ambiental.

FIGURA 3. Principales rutas para la transformación de biomasa en SAF [8-10]

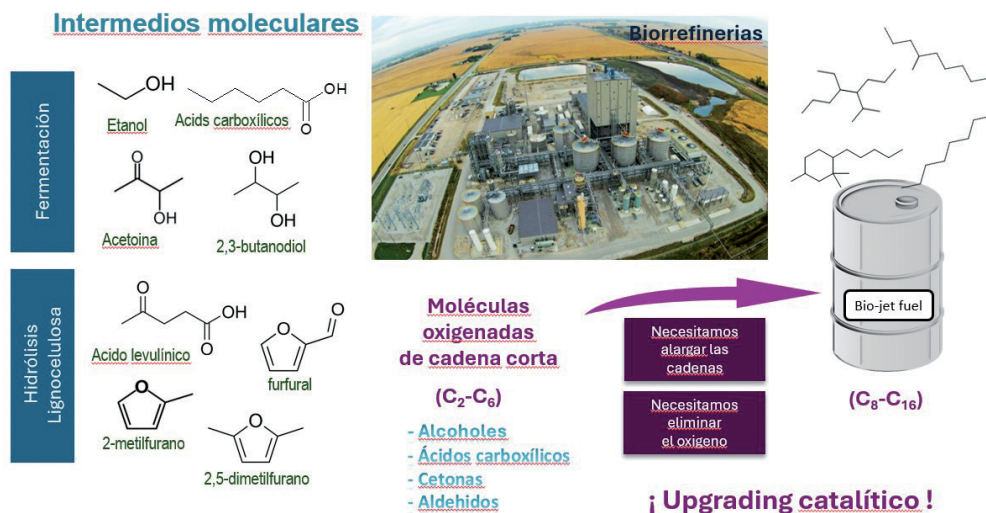


### PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES AVANZADOS A PARTIR DE INTERMEDIOS MOLECULARES DE ORIGEN BIOTECNOLÓGICO: PAPEL FUNDAMENTAL DE LA CATALISIS

ACOPLAMIENTO DE REACCIONES DE ELONGACIÓN DE CADENA Y HDO

El acoplamiento de reacciones de for-

FIGURA 4. Ruta de producción de SAF mediante intermedios moleculares de origen biogénico



mación de enlaces C-C y de HDO es clave para la producción de SAF a partir de estos intermedios moleculares. Partiendo de compuestos con grupos carbonilo (C=O) como aldehídos y cetonas, existen diferentes alternativas, siendo la condensación aldólica y la hidroxialquilación/alquilación (HAA) rutas de gran interés (Figura 5).

Las reacciones de condensación aldólica suelen realizarse utilizando catalizadores básicos homogéneos. Sin embargo, estos catalizadores presentan varios inconvenientes: son difíciles de recuperar para su reutilización, pueden provocar corrosión y generan problemas ambientales. Por otro lado, los catalizadores de eleva-

da fortaleza ácida tipo Brønsted tampoco ofrecen una solución ideal, ya que suelen mostrar baja selectividad hacia el producto deseado.

Esto ocurre porque facilitan la formación de compuestos poliméricos no deseados que compiten con la reacción principal. En nuestro laboratorio, hemos observado que centros ácidos de Lewis más débiles, como los presentes en zeolitas funcionalizadas con Hf, Sn, Ti o Zr, pueden catalizar de forma más selectiva las reacciones de condensación aldólica [14].

Además, el desarrollo de MOFs (*metal-organic frameworks*) basados en Zr y Hf ha demostrado ofrecer una alta actividad y selectividad en

este tipo de reacciones [15]. Estos materiales destacan también por su excelente estabilidad térmica, química y mecánica, lo que los convierte en candidatos muy prometedores.

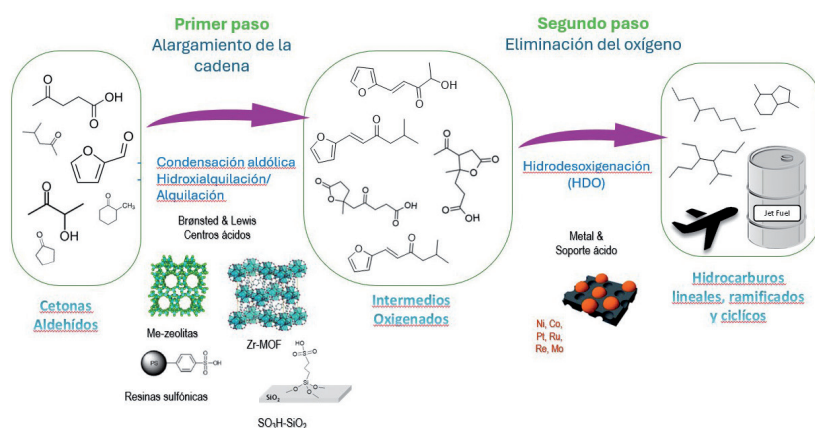
En el proceso catalítico de HAA necesita centros ácidos fuertes tipo Brønsted, que ayudan a polarizar el grupo cetona o aldehído y facilitar así la formación de una carga positiva, un paso clave para que la reacción avance. Activar ese mismo grupo carbonilo con centros ácidos débiles tipo Lewis resulta más difícil que hacerlo mediante protonación directa.

Además, como los productos de condensación HAA suelen ser moléculas relativamente grandes, es importante emplear materiales con poros amplios, que permitan que estos compuestos se muevan libremente y no queden bloqueados en la estructura del catalizador.

Este tipo de propiedades se pueden encontrar en resinas comerciales basadas en ácidos sulfónicos [16], usadas habitualmente como intercambiadores de cationes, o en materiales de sílice mesoporosa modificados con grupos organosulfónicos, que destacan por su fuerte acidez, gran área superficial, porosidad ordenada y buena estabilidad térmica.

Por todo ello, el reto principal de estas rutas de alargamiento de cadena consiste en encontrar un catalizador que impulse la reacción deseada evitando

FIGURA 5. Acoplamiento de reacciones de alargamiento de cadena y de HDO para la producción de SAF



## » La innovación en catálisis es el motor tecnológico que permitirá fabricar combustibles de aviación sostenibles a gran escala, y con menor impacto ambiental

la formación de productos demasiado pesados y fuera del rango del *jet-fuel*.

El proceso de hidrodesoxigenación (HDO) permite eliminar el oxígeno de los compuestos obtenidos previamente en las reacciones de acoplamiento C–C, utilizando altas presiones de hidrógeno. Gracias a ello, se obtiene una mezcla de hidrocarburos dentro del rango del queroseno de aviación, adecuada para mezclarse en la formulación de combustibles sostenibles de aviación (SAF).

La HDO es un proceso catalítico complejo en el que intervienen distintas rutas químicas, como la desoxigenación, deshidratación, la hidrogenación o la ruptura de anillos, entre otras. Normalmente, requiere temperaturas entre 200-400 °C, exceso de hidrógeno y un catalizador adecuado. Diseñar el catalizador buscando un balance óptimo entre las diferentes funcionalidades es fundamental para que el proceso sea eficiente y se consiga un alto rendimiento en carbono hacia el *jet-fuel*.

Los catalizadores basados en metales de transición han cobrado mucho interés debido a su menor coste con respecto a catalizadores con metales nobles (Pd, Pt, ...). Dentro de estos, los catalizadores de níquel destacan por ser más económicos, fácilmente disponibles y ofrecer alta actividad catalítica, lo que los hace especialmente prometedores para procesos HDO.

La incorporación de este metal se ha estudiado sobre distintos soportes, como zeolitas, óxidos metálicos o materiales carbonosos que proporcionen los centros ácidos necesarios para las reacciones de deshidratación, pero a su vez con una fortaleza adecuada que minimice reacciones de hidrocrqueo.

Por otro lado, la incorporación de un segundo metal en cantidades controladas (Re, Mo, ...) puede mejorar las prestaciones de los centros activos de níquel acelerando las velocidades de reacción y permitiendo trabajar en condiciones de reacción más moderadas.

### REACCIONES DE CETONIZACIÓN DE ÁCIDOS CARBOXÍLICOS

Otra reacción de interés de alargamiento de cadena es la cetonzación de ácidos carboxílicos (Figura 6) [17]. La cetonzación es una reacción en la que dos ácidos carboxílicos se combinan para formar una cetona, liberando agua y dióxido de carbono. Esta reacción permite obtener cetonas de cadena más larga, que luego pueden convertirse fácilmente en hidrocarburos mediante procesos de hidrodesoxigenación (HDO), obteniéndose mezclas ricas en parafinas lineales muy útiles para producir combustible de aviación.

En medio orgánico estas reacciones utilizan óxidos metálicos anfóteros, como los de circonio, cerio o titanio. Estos materiales suelen doparse con pequeñas cantidades de magnesio o calcio para ajustar su basicidad y favorecer la ruta deseada. La selección del catalizador es crítica: su composición, estructura y el tamaño de los átomos añadidos influyen en la interacción con el sustrato y en la selectividad de la reacción.

Un importante reto de esta reacción es el diseño de catalizadores para poderla realizar en medio acuoso, pues no debemos olvidar que estos ácidos carboxílicos se generan en caldos fermentativos. En este sentido, el uso de soportes hidrofóbicos como carbones de elevada superficie específica son de gran interés. Evidentemente, si las cetonas formadas tienen menos de 8 átomos de carbono, no pueden convertirse directamente en combustibles de aviación.

En ese caso, hace falta alargamiento de cadena mediante condensaciones aldólicas, como ya se ha comentado (Figura 6). Esta etapa ofrece un beneficio adicional como es la obtención de moléculas ramificadas, que tienen puntos de congelación más bajos y una menor tendencia a generar hollín, lo que mejora las prestaciones del SAF.

**FIGURA 6.** Acoplamiento de reacciones de cetonzación y condensación aldólica para la producción de SAF

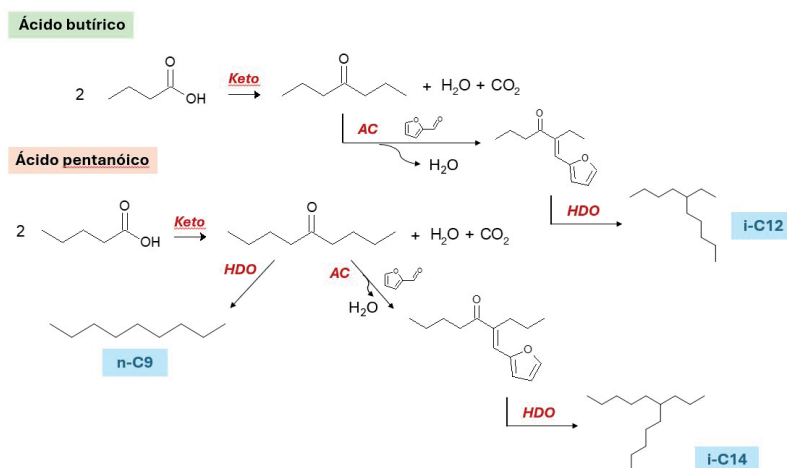
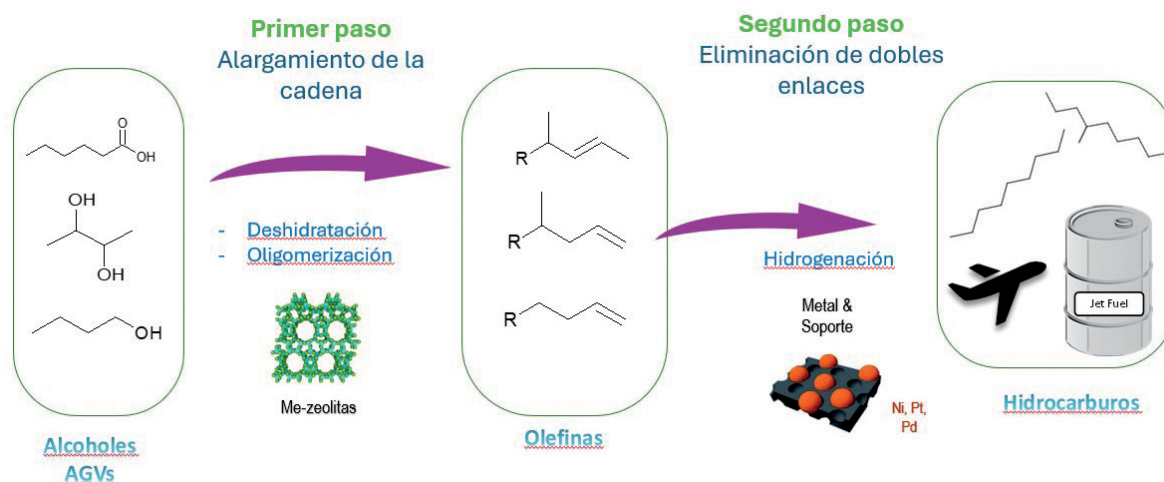


FIGURA 7. Ruta olefínica para producir SAF a partir de alcoholes y ácidos carboxílicos



### PRODUCCIÓN DE SAF MEDIANTE INTERMEDIOS OLEFÍNICOS

Otra alternativa muy interesante es a partir de alcoholes y ácidos carboxílicos de cadena corta (ácidos grasos volátiles, AGVs) mediante la formación de olefinas y posterior oligomerización e hidrogenación (ver Figura 7) de la siguiente página).

La transformación de los AGVs con cadenas entre 4 y 6 átomos de carbono en olefinas se ha estudiado principalmente mediante dos tipos de reacciones: descarboxilación y descarbonilación. En ambos casos se pierde un átomo de carbono, lo que reduce la eficiencia global del proceso, ya que parte del carbono de partida se desaprovecha. Además, estos métodos se han investigado sobre todo usando catálisis homogénea, es decir, catalizadores que se disuelven en el medio de reacción y que dificultan el proceso catalítico.

Una alternativa mucho más eficiente y sostenible es convertir directamente los VFA en olefinas sin perder

ningún átomo de carbono, utilizando catalizadores heterogéneos multifuncionales específicamente diseñados, en un enfoque que apenas se ha explorado hasta ahora [18].

Se trata de una reacción en cascada donde se combina la reducción de grupo carboxilo del ácido hasta el aldehído correspondiente, la reducción de ese aldehído a un alcohol y la deshidratación de este a la correspondiente olefina. Por tanto, se necesita de catalizadores innovadores que puedan llevar a cabo con éxito esta cascada de reacciones.

En los últimos años, alcoholes como el butanol y el butanodiol (y sus isómeros) están cobrando importancia como materias primas, gracias al avance de los procesos de fermentación de residuos biogénicos. El primer reto consiste en diseñar catalizadores y ajustar las condiciones de operación para maximizar la conversión de estos alcoholes en sus correspondientes olefinas mediante reacciones de

deshidratación (butenos). Para ello, es necesario catalizadores que combinen acidez con metales activos en presencia de hidrógeno [19].

Tanto si partimos de ácidos carboxílicos como de alcoholes, la siguiente etapa es la oligomerización a olefinas de mayor número de carbonos en el rango del *jet-fuel*. Centros ácidos de elevada fortaleza tipo Brønsted como los que se encuentran en zeolitas favorecen una rápida oligomerización de alquenos incluso a bajas temperaturas.

La distribución de los productos obtenidos depende de la selectividad de forma que imponen sus microporos y de reacciones competitivas de isomerización. Cuando estas zeolitas se modifican con metales (como Ni, Zn, Ga, etc.) o se cambian las condiciones de operación, se puede modular el grado de oligomerización e, incluso, favorecer otras rutas como la aromatización [20].

### CONCLUSIONES

En el contexto de la descarbonización del sector aéreo, los catalizadores innovadores actúan como la pieza tecnológica fundamental para transformar biorresiduos en SAF de alta calidad.

El papel de estos catalizadores es crucial por las siguientes razones:

- Transformación de biomoléculas en hidrocarburos "drop-in":

» La catálisis avanzada convierte residuos de bajo coste en SAF de alta calidad, acelerando la transición hacia un transporte aéreo más limpio y competitivo



los sistemas catalíticos permiten convertir moléculas biogénicas simples (como alcoholes, cetonas y ácidos carboxílicos de 4 a 6 carbonos) en cadenas de hidrocarburos más largas (C8-C16), que son químicamente idénticas al queroseno fósil. Esto permite su uso en motores actuales sin necesidad de modificaciones.


**• Maximización de la eficiencia del carbono:** el diseño de catalizadores específicos evita la formación de subproductos no deseados, asegurando que la mayor parte de la biomasa se convierta efectivamente en combustible útil.

**• Intensificación de procesos:** una innovación clave es el desarrollo de catalizadores multifuncionales que integran varias etapas químicas (como la deshidratación y la oligomerización) en un único sistema de reacción. Esto reduce la complejidad del proceso (se reduce la inversión), disminuye el consumo energético (se reducen los costes de operación) y de esta forma se mejora la viabilidad económica en la producción de SAF.

**• Control de propiedades críticas del combustible:** los catalizadores permiten diseñar hidrocarburos con estructuras específicas (lineales, ramificadas o cíclicas) y con propiedades que

permitan un mejor comportamiento en las turbinas de los aviones.

**• Estabilidad y sostenibilidad del proceso:** los nuevos diseños buscan catalizadores que no solo sean activos, sino también estables y reutilizables, incluso en condiciones difíciles como medios acuosos o ante la presencia de impurezas.

En resumen, los catalizadores no solo hacen posible la reacción química, sino que determinan la viabilidad económica y ambiental de la transición energética en la aviación al permitir procesos más simples, eficientes y capaces de transformar intermedios moleculares a partir de residuos de bajo coste. 

**Agradecimientos**

Los autores agradecen la financiación del proyecto BIOCATFLY (PID2024-157003OB) financiado por la convocatoria 2024 de ayudas a "Proyectos de Generación del Conocimiento" del Ministerio de Ciencia, Innovación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación.

**Bibliografía**

[1] Lau, J.I.C., Wang, Y. S., Ang, T., Fah Sero, J. C., Khadaroo, S. N. B. A., Chew, J. J. m Luo, A. N. K, 2024. *Emerging technologies, policies and challenges toward implementing sustainable aviation fuel (SAF)*. *Biomass Bioenergy*, 186, 107277.

[2] Lee, D. S, Fahey, D. W., Skowron, A., Aleen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Dohert, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestedt, J., Gettleman, A, De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J.E., Pitari, G., Prather, M. J., Sausen, R., Wilcox, L. J., 2021. *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing from 2000 to 2018*. *Atmospheric Environment*, 244, 117834.

[3] Directive (EU) 2018/2001 of The European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources.

[4] Undavalli, V., Olatunde, G. O. B., Boylu, R., Wei, C., Haeker, J., Hamilton, J., Khandelwal, B., 2023. *Recent advancements in sustainable aviation fuels*. *Progress in Aerospace Sciences*, 136, 100876.

[5] Maghzain, A., Saddler, J. J., *Which processes to making biojet/Sustainable Aviation Fuel (SAF) are likely to supplement the predominant, HEFA/lipid-to-biojet production route?*, 2026. *Bioresource Technology*, 441, 133631.

[6] Zhang, Y., Zhang, L., Liu, G. Sun, M, 2026. *Carbon Footprint of Sustainable Aviation Fuels: A Mini-Review of Trends and Prospects*. *Energy & Fuels*, 40, 3469-3484.

[7] Dey, S., Billa. K. K., Gowthaman, S., Kant, A., Singh, A. P., 2026. *The Prospects and Challenges of Sustainable Aviation Fuels (SAFs) for Clean Combustion in Gas Turbine Engines: A Review*. *Energy & Fuels*, 40, 4335-4352.

[8] Wang, W. C., Tao, L, 2016. *Bio-jet fuel conversion technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 801-822.

[9] Tanzil, A. H., Brandt, K., Wolcott, M., Zhang, X., Garcia-Pérez, M., 2021. *Strategic assessment of sustainable aviation fuel production technologies: Yield improvement and cost reduction opportunities*. *Biomass and Bioenergy* ,145, 105492.

[10] Mupondwa, E., Li, X., Tabil, L. Production of bio-jet fuel: Conversion technologies, techno-economics, and commercial implementation. *Biofuels and Biorefining: Current Technologies for Biomass Conversion*. Vol.1, 157-213.

[11] Li, H., Riisager, A., Saravanamurugan, S., Pandey, A., Sangwan, R. S., Yang, S., Luque, R., 2018. *Carbon-Increasing Catalytic Strategies for Upgrading Biomass into Energy-Intensive Fuels and Chemicals*. *ACS Catalysis*, 8, 148-187.

[12] Wang, H., Yang, B. Zhang, Q., Zhu, W., 2020. *Catalytic routes for the conversion of lignocellulosic biomass to aviation fuel range*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120, 109612.

[13] Li, G., Wang, R. Pang, J., Wang, A., Li, N., Zhang, T., 2024. *Production of Renewable Hydrocarbon Biofuels with Lignocellulose and Its Derivatives over Heterogeneous Catalysts*. *Chemical Reviews*, 124 (6), 2889-2954.

[14] Uricocha, N., Uzquiano, V., Paniagua, M., Morales, G., Melero, J. A., 2025. *Zr-modified USY zeolite as an efficient catalyst for the production of bio-jet fuel precursors from levulinic acid and furfural in the absence of solvent*. *Catalysis Today*, 450, 115211.

[15] Sanz, M., Leo, P., Palomino, C., Paniagua, M., Morales, G., Melero, J. A., 2024. *Boosting the activity of UiO-66(Zr) by defect engineering: efficient aldol condensation of furfural and MIBK for the production of bio jet-fuel precursors*. *Green Chemistry*, 26, 7337-7350.

[16] Landazabal, F. J., Ventura, M., Paniagua, M., Melero, J. A., Morales, G. 2025. *Optimization of the production of bio-jet fuel precursors from acetoin and 2-methylfuran via hydroxyalkylation/alkylation over sulfonic acid resin*. *Catalysis Today*, 455, 115290.

[17] Service, R.F., 2022. *Can Biofuels really fly?*. *Science*, 376, 1394-1397

[18] Yeap, J. H., Heroguel, F., Shahab, R. L., Rozmyslowicz, B., Studer, M. H., Luterbacher, J., 2018. *Selectivity Control during the Single-Step Conversion of Aliphatic Carboxylic Acids to Linear Olefins*. *ACS Catalysis*, 8, 10769–10773

[19] Zheng, Q., Xu, J., Liu, B., Hohn, K., 2018. *Mechanistic study of the catalytic conversion of 2,3-butanediol to butenes*. *Journal of Catalysis*, 360, 221–239.

[20] Lashchinskaya, Z. N., Gabrienko, A. A., Stepanov, A. G., 2024. *Mechanisms of Light Alkene Oligomerization on Metal-Modified Zeolites*. *ACS Catalysis*, 14, 4984–4998.