

## Co-procesamiento de biomasa en refinerías convencionales como área de innovación

Elizabeth Mar-Juárez<sup>1,\*</sup>, Felipe de Jesús Ortega-García<sup>2</sup> y Federico Jimenez-Cruz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gerencia de Transformación de Biomasa, Instituto Mexicano del Petróleo, CDMX, México

<sup>2</sup> Gerencia de Separación de Hidrocarburos, Instituto Mexicano del Petróleo, CDMX, México

\* Autor de correspondencia: [emar@imp.mx](mailto:emar@imp.mx); Tel.: +52 5591758384

Otros relacionados con desarrollo sustentable. Ponencia Virtual.

Recibido: 22 de agosto de 2023

Aceptado: 5 de octubre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

**Resumen:** El objetivo de esta investigación es definir líneas de acción para reducir la huella de carbono de combustibles tradicionales mediante la adición de materias primas denominadas bio en el proceso de refinado del petróleo. Los resultados muestran, basados en un estudio “pozo a llanta”, la viabilidad de reducir una media del 15% de emisiones produciendo combustibles automotrices con materias primas de biomasa lignocelulósica y aceites vegetales procesados en la unidad de craqueo catalítico (FCC) de una refinería de petróleo. Este proceso se denomina coprocesamiento, tema de este estudio más una fase experimental en la que se empleó aceite de palma. El análisis se realizó en dos estados: La primera parte es la identificación, revisión, filtrado e integración de información disponible en la web relacionada con reportes de coprocesamiento de cargas de FCC no convencionales, para identificar dónde y qué se ha realizado sobre este tema, presentando los resultados en un diagrama que muestra el desarrollo de la investigación realizada. La segunda parte es una fase experimental con una carga compuesta por gasóleo de vacío de una refinería de petróleo más la adición de aceite de palma (5% en peso de material biológico) para analizar el desempeño operacional y detectar puntos críticos de la operación. Estos puntos críticos detectados durante la fase experimental se presentan en un esquema de preguntas que, a su vez, se presentan como futuras líneas de investigación para innovar e incorporar los bios a la matriz energética utilizando la infraestructura existente y con la ventaja de no requerir modificaciones en la FCC que utiliza estas cargas de alimentación. Estas líneas de acción se proponen como formas para lograr la descarbonización y proponer una transición energética coherente y compatible con el objetivo de la Convención Marco sobre mantener el calentamiento global debajo de los 2°C.

**Palabras clave:** co-procesamiento, innovación, biomasa lignocelulósica.

### Biomass co-processing in conventional refineries as an area of innovation

**Abstract:** The objective of this research is to define action lines to reduce the carbon footprint of traditional fuels by adding feedstocks with bio matter in the oil refining process. The results show, based on a cradle-to-gate study, that it is feasible to reduce an average of 15% of emissions by producing automotive fuels with feedstocks of lignocellulosic biomass and vegetable oils processed in the catalytic cracking unit (CCU) of an oil refinery. This process is called co-processing, which is the topic of this study and with palm oil used. The analysis was carried out in two states: The first part consists in the identification, reviewing, filtering and integration of the information available on the web related to reports on the co-processing of non-conventional CCU loads, to identify where and what has been done on this topic, presenting the results in a diagram that shows the development of the research done. The second part is the experimentation with a feed load composed of vacuum gas oil from an operating oil refinery plus the addition of vegetable oil (5% by weight of biological material) to analyze the operational performance and detect critical points of the operation. These critical points shown in the experimentation detected are presented in a scheme of questions that, in turn, are presented as future lines of research to continue innovating about the incorporation bios into the energy matrix using the existing infrastructure and with the advantage of not requiring modifications in the CCU that use these feed loads. These action lines are proposed as forms to achieve decarbonization and propose a coherent fuel transition compatible with the goal of the United Nations Framework Convention on Climate Change of keeping global warming below 2°C.

**Keywords:** co-processing, innovation, lignocellulosic biomass.

### Introducción

Los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) han sido fundamentales para la civilización industrial pues son la fuente de energía que ha permitido el espectacular desarrollo que ésta ha experimentado en los últimos tres siglos. La situación podría continuar así al menos otros 300 años de no ser por dos factores, uno de carácter económico y otro de naturaleza ambiental, que progresivamente han ganado importancia y han motivado a la humanidad a buscar nuevas fuentes para satisfacer la siempre creciente demanda de energía. El factor económico deriva de que los yacimientos de combustibles fósiles son finitos y gradual e inexorablemente se agotarán, conforme ello ocurra cada

vez será más difícil y costoso extraerlos y procesarlos y llegará el momento en que producir energía con otras fuentes resulte más económico. En cuanto al aspecto ambiental específicamente se refiere al cambio climático y la transición hacia la descarbonización.

En el caso de México, a medida que el net zero se ha convertido en un principio rector para las metas nacionales (Cámara de Diputados, 2015), la búsqueda de acciones para lograrla y, al mismo tiempo, construir y reforzar la resiliencia energética, así como construir sistemas sostenibles que generen valor en contraste con los sistemas tradicionales. El coprocesamiento de materias primas biogénicas dentro de las refinerías de petróleo surge como una solución para producir combustibles diésel, marítimos y de aviación con bajo contenido de carbono fósil.

La descarbonización del sector transporte mediante el coprocesamiento de biocrudo derivado de biomasa en las refinerías de petróleo existentes representa una estrategia de mitigación de gases de efecto invernadero y una solución a la incorporación de la bioenergía en la matriz nacional en el corto plazo (IMP, 2023). Teniendo presente que la transición energética involucra a diversos sectores nacionales y que por ello enfrenta diversos retos (Tinoco, Torres, & Venegas, 2021). La puesta en marcha de una nueva generación de combustibles a base de hidrocarburos parcialmente renovables y compatibles con la infraestructura actual y con requisitos mínimos de capital, considera la incorporación de la biomasa al sistema de producción de combustibles actual como una posibilidad técnica y económica. Además, este tipo de proyectos responde a los criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG) que actualmente es el conjunto de estándares que se requiere para la puesta en marcha de un proyecto con conciencia social que permita avanzar hacia el logro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2022).

De acuerdo con diversos estudios y las estimaciones realizadas en los laboratorios del Instituto Mexicano del Petróleo, se estima que es factible coprocesar en el caso especial de Sistema Nacional de Refinación (México) 486 mil ton/año de aceites vegetales y 83.5 millones ton/año de residuos lignocelulósicos (tres veces más que la capacidad de refinación con la que cuenta el país); para contribuir en conjunto con una reducción de emisiones de aproximadamente un 20%, esto es procesar hasta un 20 %, en peso de biocrudo sin que se requieran cambios importantes en la tecnología empleada dentro de la refinería; los límites establecidos se definen teniendo en cuenta los límites técnicos actuales, como se observa en la Figura 1.



Figura 1. Esquema de transición al net zero de una refinería (NREL, 2017)

Con estos resultados actuales se puede plantear un enfoque de largo plazo entre la integración de bios y fósiles mientras se ajustan y definen nuevos frentes para continuar con la reducción de emisiones. La producción de esta

nueva generación de biocombustibles permite descarbonizar ciertas áreas del sector transporte global, incluidos el marítimo y el transporte pesado, espacios donde los biocombustibles tradicionales no han logrado incursionar.

## Materiales y Métodos

La investigación inicia con un estudio del estado del arte de la tecnología, en esta revisión se identifican las investigaciones previas que han incluido el tema de “coprocesamiento de cargas no convencionales para procesar en una unidad catalítica en una refinería convencional”

El proceso de trabajo consideró cuatro actividades principales a realizar en el estado del arte:

1. Delimitación del enfoque del estudio.
  - Tema central: Coprocesamiento de mezclas de gasóleo de vacío (VGO) con bio aceites en unidades de craqueo catalítico fluidizado (FCC).
2. Colecta de información. La recuperación de la información del estudio se realiza con base a los siguientes puntos:
  - Selección de palabras clave o descriptores. Las palabras clave empleadas para la estrategia de búsqueda de información se establecieron usando las siguientes dos estrategias de búsqueda: en la primera estrategia se identifican patentes y artículos con palabras relacionadas con el coprocesamiento de VGO con bio aceite en unidades FCC, empleando como frase de búsqueda en la base Lens los siguientes descriptores:
    - “Co-feeding bio oil and VGO into FCC”; y las combinaciones de los descriptores: “co-feeding”, “bio oil”, “VGO”, “FCC”.
  - Como segunda estrategia de búsqueda se emplean descriptores relacionados con el tema: coprocesamiento de VGO con el uso de cargas de residuos lignocelulosicos en unidades FCC, para ello se emplearon como descriptores:
    - “Co-processing; Crude bio-oil; Fluid catalytic cracking; Petroleum feedstock; Drop-in biofuels; lignocellulosic waste; agro waste” y las combinaciones de los descriptores: “co-feeding”, “bio-oil”, “lignocellulosic waste”, “VGO”, “FCC”, “biocrude”.
3. Fuentes de información. La búsqueda se realizó en la red abierta y bases de datos disponibles en forma gratuita. En este caso se usó la plataforma Lens.org. Para la construcción de la base de datos se transcribieron los siguientes campos:
  - a. Tipo de mezcla empleada como carga a la unidad FCC
  - b. Nombre del trabajo, estudio, tesis o artículo identificado
  - c. Fuente de publicación (estudio, artículo técnico y/o patente).Hasta este punto se construyó y analizó el estado del arte en el tema de coprocesamiento
4. Diseño del experimento. Se preparó una carga conteniendo 5 % peso de aceite de palma y 95 % de gasóleo convencional a FCC. La carga compuesta y la carga convencional se procesaron en la planta piloto FCC con circulación de catalizador bajo condiciones de operación típicas de las unidades FCC industriales: 520 °C de temperatura de reacción, 680 °C de temperatura de regeneración y relación catalizador aceite de 6 Kg/Kg, utilizando un catalizador de equilibrio típico.

La fase experimental incluyó la evaluación de gasóleo convencional con el aceite vegetal y del gasóleo convencional con el biocrudo en una unidad de evaluación ACE-RTM. Con los datos del laboratorio se estimó la reducción de emisiones por el empleo de biomasa para la producción de combustibles.

## Resultados y Discusión

La tecnología de craqueo catalítico fluido (FCC) es uno de los pilares de la industria petrolera que convierte las fracciones de gasóleo pesado en combustibles como la gasolina y el gas LP. Aunque el campo de la tecnología FCC es bastante maduro, el alcance de la investigación en torno al sistema FCC es enorme debido a que se pueden introducir cambios en la materia prima que emplea, en el diseño de los catalizadores que emplea, en las operaciones unitarias, etc. En esta revisión del estado del arte, se identifican diferentes tecnólogos que se han dedicado a la investigación y el desarrollo en el coprocesamiento de cargas alternativas en la planta catalítica. Debido a la variedad de

investigaciones en torno a la tecnología FCC la cual puede incluir variaciones en el diseño del proceso, o en las cargas de alimentación o en los equipos alternos al proceso, es necesario acotar la búsqueda de patentes y artículos definiendo palabras clave orientadas al proceso objetivo, de ahí que se establecieron las siguientes: (Co-processing AND (bio And (crude oil AND FCC))). El buscador define 2,895 registros con estas características y sí, se ejecuta un filtro por familias que permite agrupar el contenido técnico por aplicaciones similares, se obtuvo una agregación por familias que por sus característica sintetiza los registros en 918 familias. Al aplicar un segundo filtro que incluya las palabras clave bio & FCC, la nueva síntesis registra 503 familias.

Se efectúa una identificación de información específica empleando conceptos claves donde principalmente se eliminan patentes relacionadas con innovaciones al proceso FCC o para la producción de bioquímicos, con ello se obtiene una nueva simplificación de patentes y artículos relacionados con el tema en cuestión, reduciendo a 397 familias con las cuales se inicia la revisión, selección y clasificación de las patentes y artículos relacionados con el tema de coprocesamiento. En la Figura 2 se muestran los principales rasgos empleando un filtrado de palabras claves que correlaciona la investigación con los principales tecnólogos en relación con el coprocesamiento de biocrudo y una corriente fósil para ser procesada en una unidad FCC.

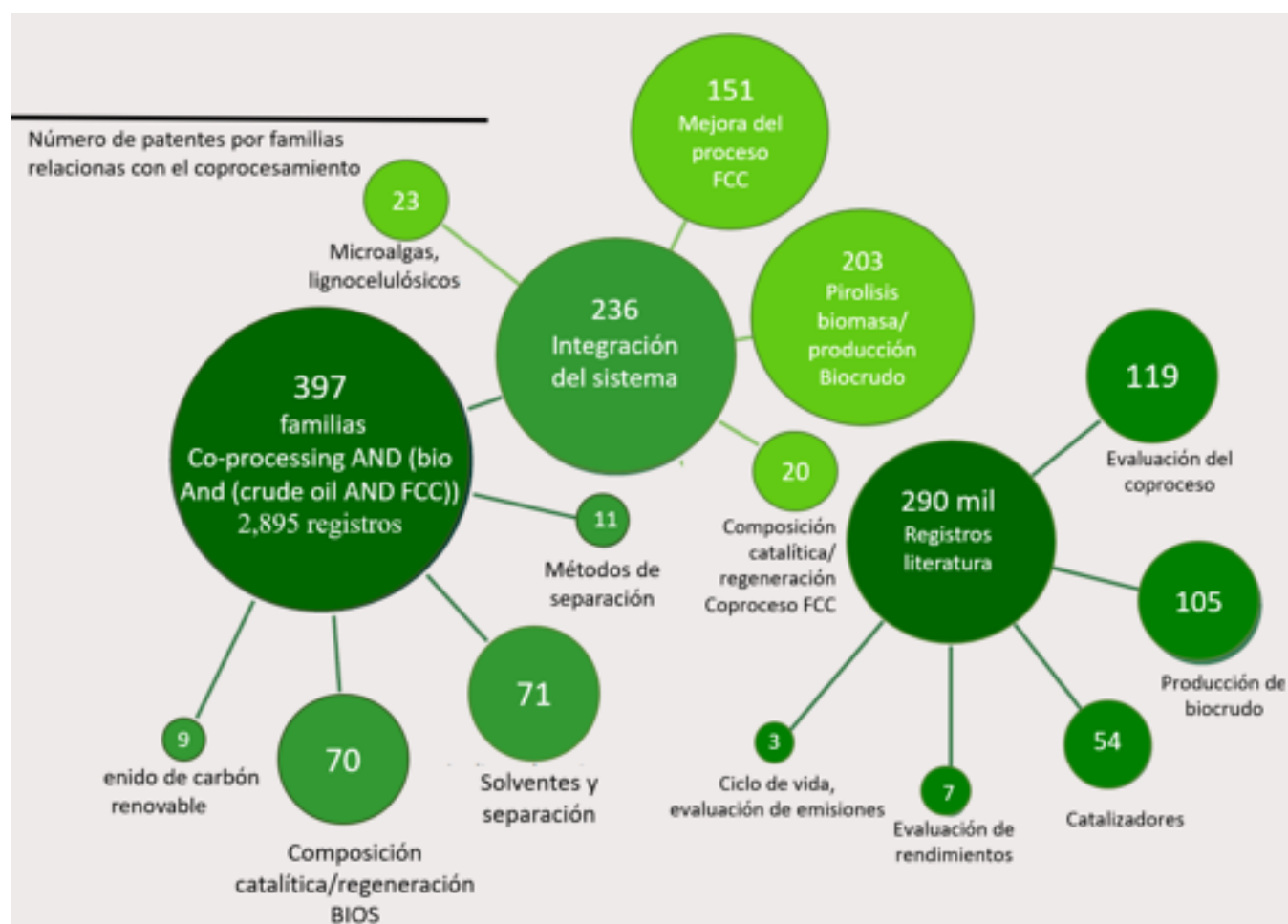


Figura 2. Patentes relacionadas con el coprocesamiento de cargas no convencionales en unidades FCC, agrupando las diferentes patentes con un filtro de palabras claves que identifica hacia donde se orienta la investigación (Lens, 2023).

### Coprocesamiento de bioaceite

Múltiples empresas petroleras están trabajando en el tema y Petrobras ha demostrado que es capaz de hacer coprocesamiento de bioaceite con materia prima convencional sin pretratamiento del bioaceite (Andrea de RezendePinho, De Almeida, Mendes, Ximenes, & y Casavechia, 2015); y en otro estudio se demostró que el coprocesamiento es posible cuando el bioaceite se pretrata primero mediante pirólisis rápida (Pinho, 2017). Otro

aspecto por considerar, son las patentes que se encuentran actualmente en revisión o concedidas recientemente. La compañía petrolera Shell obtuvo una patente llamada “Métodos y sistemas para procesar biomasa celulósica” (Estados Unidos Patente nº US 9783740 B2, 2014). En ella se describe cómo se procesaría la biomasa celulósica en la refinería y cuál sería el camino para la lignina liberada. Describe los métodos y sistemas para la conversión, separación y reciclado de productos de reacción que contienen productos derivados de la lignina. El hidrotreamiento juega un papel importante en el proceso descrito.

ExxonMobil solicitó la patente titulada “Pretratamiento y mejoramiento del petróleo crudo”, que actualmente está pendiente de aceptación (Estados Unidos Patente nº US 20170158967, 2015). La patente describe sistemas y métodos para el tratamiento previo y la mejora de bioaceites crudos para su posterior procesamiento. Los métodos incluidos en la solicitud son el fraccionamiento instantáneo y el craqueo térmico para generar fracciones adecuadas que puedan procesarse, por ejemplo, mediante hidrotreamiento. El sistema descrito reduce el contenido de metales a niveles adecuados para el procesamiento de refinería, lo que puede ser una ventaja en los pasos de procesamiento posteriores. El contenido de metales, halógenos, silicio y/o fósforo en los bioaceites puede causar problemas tanto con el transporte como con el procesamiento convencional, lo que podría incluir incrustaciones, erosión y/o desactivación rápida del catalizador dentro de un oleoducto o sistema de reacción de refinería.

Se otorgó una patente a Honeywell UOP en 2017 con el título Métodos y aparatos de procesamiento de combustible para mejorar una corriente de aceite de pirólisis y una corriente de hidrocarburo (Estados Unidos Patente nº US 9663729 B2, 2017). Esta patente describe que, debido al alto contenido de oxígeno de los aceites de pirólisis, estos son inmiscibles con corrientes de hidrocarburos. Los intentos de coprocesar corrientes de aceite de pirólisis y corrientes de hidrocarburos provocan la desoxigenación del aceite de pirólisis antes del procesamiento de FCC, generando una obstrucción de las líneas de alimentación. La patente presenta un aparato que mejora la mezcla de una corriente de aceite de pirólisis y una corriente de hidrocarburos.

### *Resultados de proceso*

En la investigación realizada por Pinho et al. de Petrobras (2015), se empleó una unidad FCC a escala de demostración, con un inventario de catalizador de 150 kg/h y una velocidad de alimentación de los reactivos de 25 barriles por día (bpd). El gasóleo de vacío (VGO) y el bioaceite se introdujeron en el reactor a temperaturas de 280°C y 50°C, respectivamente. Las reacciones se controlaron en 540°C y 560°C y a tasas de 10/90 y 20/80 de alimentación de bioaceite/VGO, (Pinho, 2015). Dos años más tarde, Pinho presenta el estudio titulado “Fast pyrolysis oil from pinewood chips co-processing” (2017); en este segundo experimento, el bioaceite crudo elaborado de aserrín se coprocesó con un VGO estándar en la unidad FCC de demostración utilizando dos catalizadores de equilibrio FCC comerciales. Se utilizaron dos proporciones diferentes para bioaceite/VGO, es decir, 5/95 y 10/90. El experimento a 540 °C alcanzó un tiempo de operación acumulativo de 400 h durante más o menos 18 x 24.

Las corrientes de bioaceite y petróleo regular son inmiscibles debido a la alta polaridad del bioaceite. Por esta razón, en ambos experimentos, el bioaceite y el VGO se introdujeron en dos posiciones axiales diferentes en el elevador del reactor FCC. El bioaceite no debe inyectarse por encima de los 50°C, ya que esto acelera las reacciones de polimerización y la formación de coque (UOP, 2005).

Ambos experimentos arrojaron tendencias similares en los resultados relativos a los rendimientos de los principales productos. Por esta razón, solo se discuten los resultados del experimento anterior (Pinho, 2015). Primero se vio que la formación de CO, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O es mucho mayor cuando en la co -alimentación de bio-aceite respecto a usar VGO al 100%. Esto puede deberse principalmente al hecho de que el bioaceite contiene altas cantidades de oxígeno y, por lo tanto, produce compuestos oxigenados durante la reacción de craqueo. A partir de la mayor cantidad de CO en comparación con el CO<sub>2</sub>, se puede concluir que existe una preferencia de las reacciones de descarbonilación sobre las reacciones de descarboxilación. Diferentes autores han sugerido reacciones de deshidratación o condensación aldólica como la razón de una mayor formación de agua durante la investigación de compuestos modelo sobre catalizadores de zeolita (Pinho, 2017). Se puede ver una disminución en el rendimiento de la gasolina cuando se coalimenta un 20 % de bioaceite, pero esto se puede explicar por la dilución de los productos por H<sub>2</sub>O que mostró un mayor rendimiento. Los rendimientos de aceite cíclico ligero (ACL) también muestran una disminución con una carga al 20% de bioaceite,

mientras que el rendimiento de los productos de fondo muestra un pequeño aumento. La selectividad de hidrógeno, metano, eteno y propeno se redujo cuando la reacción se coalimentó con bioaceite (Pinho, 2017).

En el pasado, se informó que la producción de coque en las unidades de FCC es excesivamente alta cuando se usa bioaceite 'crudo' sin tratar. Se observó en experimentos realizados a escala de laboratorio y piloto, que la alimentación conjunta de cantidades muy pequeñas de bioaceites hidrogenados podría causar un aumento significativo en la producción de coque, lo que provocaría inestabilidad operativa y obstrucciones (UOP, 2005). Las diferencias entre los rendimientos citados en estos estudios y los de Petrobras, es que al escalar las unidades FCC con simulaciones en laboratorio se puede modificar la operación real.

Para evaluar la diferencia en la calidad de la gasolina, los investigadores analizaron la concentración de aromáticos y el contenido de benceno en la fracción de gasolina y las propiedades de la nafta pesada con rangos de ebullición entre 80°C y 220°C. Se concluyó que el corte de la nafta, producto del bioaceite coalimentado al 20 % reportó un mayor contenido de aromáticos y mayor número de octano. También el fenol está presente en cantidades más altas cuando se alimenta con bioaceite, debido a que los compuestos fenólicos estabilizan el producto craqueado en el rango de la gasolina (Pinho, 2017). Anteriormente se ha propuesto usar una combinación de un fenol y un éter para obtener gasolina con un índice de octano más alto y una mayor estabilidad (Oinonen, Hakanpää-Laotinen, Hämäläinen, Kaskela, & Jungner, 2010).

El contenido de carbono renovable de las fracciones líquidas ha sido investigado mediante análisis de  $^{14}\text{C}$ . El carbono  $^{14}\text{C}$  es el más adecuado para este propósito debido a su vida media de 5730 años, lo que hace que su nivel de trazas sea predecible en cualquier sustancia viva que pueda usarse para la producción de bioaceite y, por lo tanto, de biocombustibles. El análisis de  $^{14}\text{C}$  puede distinguir un carbono renovable de un carbono fósil, ya que las sustancias fósiles no contienen carbono  $^{14}\text{C}$  debido a su antigüedad. La técnica se puede utilizar para medir el contenido de carbono renovable en un combustible de transporte después de mezclarlo con combustibles derivados de fuentes renovables.

Cuando se coalimenta un 20% de bioaceite, el contenido de carbono renovable está entre el 3-5% para el corte de gasolina. Con un contenido entre un 5% a un 10% de bioaceite este porcentaje de carbono renovable en el corte de gasolina es del orden del 1% y 2%, respectivamente. Para los cortes de ACL y más pesados, el contenido de carbono renovable es del 5 % y el 6 %, respectivamente. Al considerar el contenido de carbono del bioaceite utilizado para estos experimentos, se puede concluir que se tiene un 30 % del carbono renovable del bioaceite presente en los productos líquidos finales (Pinho, 2017).

A partir de los esfuerzos de investigación realizados por Petrobras, se puede concluir que es técnicamente factible coprocesar biopetróleo crudo con la materia prima fósil VGO en el proceso FCC. Se muestra que el oxígeno del bioaceite se elimina casi por completo en el proceso de craqueo, principalmente como  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  y agua. Las concentraciones de compuestos oxigenados sí aumentaron en las fracciones de gasolina y diésel obtenidas, pero esto no es tan alto que pueda afectar la calidad del combustible. Dado que se ha demostrado con éxito que es posible coprocesar bioaceite crudo con aproximadamente un 50 % en peso de oxígeno, los autores sugieren que también debe ser posible procesar bioaceites parcialmente mejorados. Se debe encontrar un punto de transferencia óptimo entre la biorrefinería y la refinería de petróleo (Pinho, 2017). Asimismo, los autores notaron el hecho de que los compuestos oxigenados pueden interferir con el paso final de eliminación de azufre, que generalmente se lleva a cabo como un paso de tratamiento posterior para la gasolina en las refinerías. Por lo tanto, es de gran importancia investigar la interferencia de los compuestos oxigenados en la gasolina craqueada, con los catalizadores utilizados para la hidrodesulfuración, por ejemplo, cobalto-molibdeno (Pinho, 2017).

#### *Resultados experimentales con aceite de palma*

El procesamiento de todas las cargas se llevó a cabo sin ningún problema operativo y la inspección física de los productos indica que el aceite de palma fue convertido satisfactoriamente reportando los resultados que se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Resultados al mezclar 5% de aceite de palma con VGO en una unidad FCC

Rendimiento de productos, % peso	Base	5% aceite de palma
Gas Seco	1.89	1.89
Propano	0.95	0.94
Propileno	4.55	4.54
Butano-butileno	9.35	8.99
LPG, % en peso	14.85	14.47
Nafta	51.17	50.97
ACL, ( 221 - 343 °C)	19.02	19.59
ACP,(R+343°C)	8.45	8.48
COQUE	4.72	4.8
Conversión % en peso	72.53	71.93
Balance de materia, % en peso	100.1	100.2

### Integración de Bio-Oil en FCC

Las ventajas de usar bioaceite en las refinerías son significativas (Talmadge, Baldwin, Bidy, & al, 2014) (Zacher, Olarte, Santosa, Elliott, & y Jones, 2014):

- El coprocesamiento de biopetróleo en la infraestructura de refinería existente es rentable, ya que aprovecha el capital existente y no requiere una infraestructura nueva e independiente para la pirólisis, hidrodeshidrogenación (HDO) u otra ruta de proceso para la producción de combustibles.
- Los productos del proceso de conversión de biomasa a combustibles de transporte se destinan a una industria que ya tiene características específicas. Por lo tanto, se podría lograr una reducción de las pruebas de aceptación y del motor que consumen mucho tiempo y son costosas, ya que el coprocesamiento del bioaceite con materia prima convencional puede producir combustibles que son en gran medida indistinguibles de los combustibles existentes.
- La pirólisis rápida de biomasa produce una amplia gama de compuestos químicos que pueden ser manejados por las refinerías modernas.

### Línea de tiempo en innovaciones

Explorando las tendencias con respecto al coprocesamiento se tiene que la producción masiva de bioenergéticos inicia de con la llamada "crisis petrolera" mundial de 1973 que provocó un aumento de los precios del crudo. Esta crisis origino la puesta en marcha del uso de bioenergéticos, para 1998 Europa ya estaba produciendo biodiesel principalmente y Brasil continuaba con su programa de etanol. Con la firma de los diversos acuerdo sobre el Cambio Climático y la introducción de la Ley de Política Energética de Estados Unidos, en la cual se integra el campo al ámbito de la energía, se inicia una producción global de energéticos. Con estos incentivos se impulsa nuevamente la innovación en estos temas. En la Figura 3, se presenta el volumen de patentes que aumenta de manera considerable con el compromiso internacional por reducir la dependencia de los combustibles fósiles y el Protocolo de Kioto adoptado en 1997. Entre 2014 y 2015 se registra un descenso en la actividad de patentamiento empleando bios, esto podría deberse a que existe una correlación entre el precio del petróleo y la investigación en fuentes alternas de energía (Epstein, 2023), antes de ese periodo el crudo Brent registro en promedio un precio de más de 100 dólares por barril, la búsqueda de soluciones queda demostrado en la actividad de investigaciones realizadas en esos años. Posteriormente, se debilita el precio del petróleo para caer en 2015 hasta los 40 dólares por barril, causando que las investigaciones relacionadas con combustibles alternativos sean difíciles de continuar por no obtener una aprobación económica y financiera. De acuerdo a Epstein es irrefutable que el desarrollo de combustible alternativo no son económicamente viables a <\$ 40 por barril. La oscilación del precio del petróleo significa que la investigación y desarrollo de combustible alternativo deben ser competitivos, aun en un entorno de petróleo relativamente barato. Esto es un desafío, pero también puede verse como algo positivo para la sostenibilidad económica de esta nueva industria. La fase experimental y el desarrollo

de patentes a continuado, lo que permite inferir que la integración es factible y la opción de integración de los bios a la matriz energética es real por lo que se sigue integrando estudios con este tema como base de la investigación.

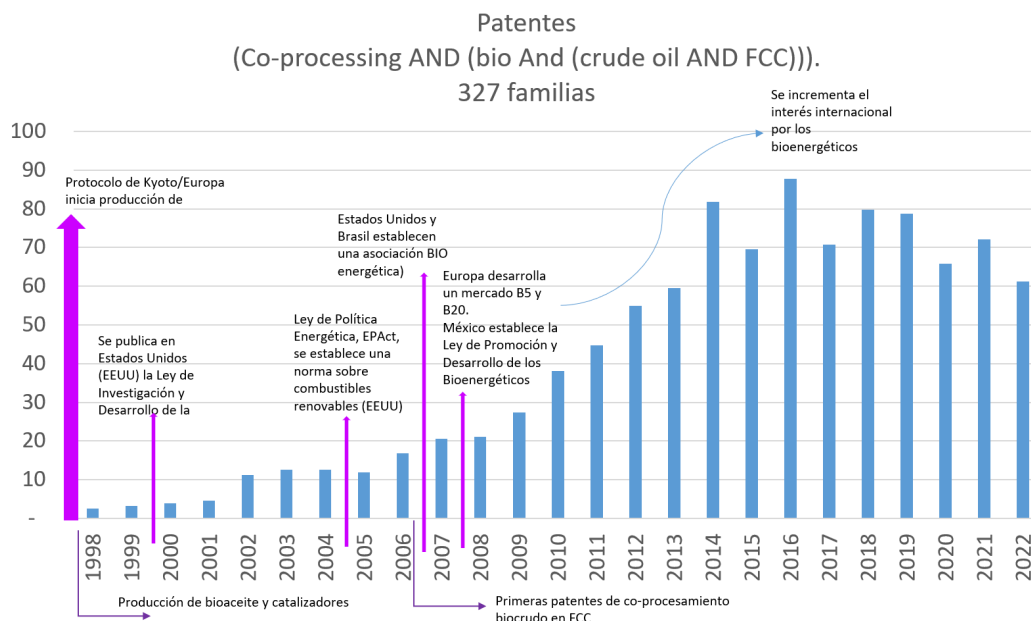


Figura 3. Línea de tiempo de patentes publicadas en el tema de coprocesamiento biocrudo y cargas fósiles (Lens, 2023).

### Líneas de investigación

La mejora de los bioaceites con materias primas de petróleo en las refinerías existentes, conocida como "coprocesamiento", podría ofrecer un camino rápido para reducir la huella de carbono de los combustibles de transporte actuales. Pero ¿dónde se deben insertar los bioaceites sostenibles en los sistemas de refinería existentes para lograr el mayor impacto? En la Figura 4 se muestra donde la biomasa podría emplearse como materia prima. Si tiene éxito, ¿cuánto de ese carbono renovable o "verde" llega a los productos de combustible final?, ¿será necesario cambiar los catalizadores? ¿Cuál es el proceso que permite obtener el biocrudo ad hoc para la refinería?

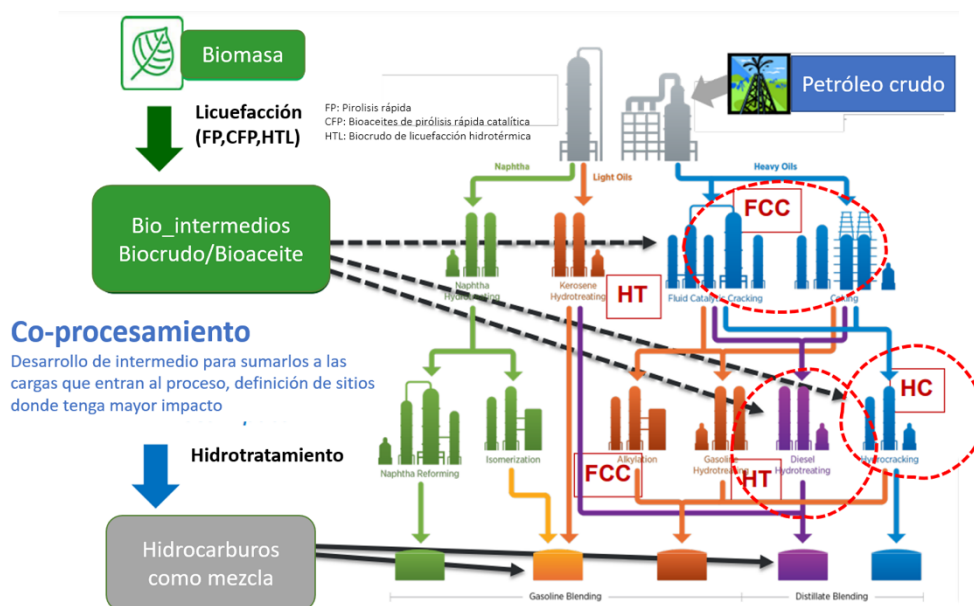


Figura 4. Áreas potenciales de realizar las mezclas bio/fósil en una refinería convencional

El análisis de la información y la parte experimental reveló que es factible acoplar las refinерías con renovables y fósiles. El coprocesamiento de bioaceites con petróleo en las refinерías existentes es una forma prometedora de incluir biomasa en la producción masiva de combustibles e ingresar al mercado en un periodo menor de cinco años. Sin embargo, todavía se requiere realizar investigaciones sobre cómo funciona el coprocesamiento con el equipo de producción de las refinерías existentes. Es necesario realizar pruebas para conocer cómo interactúa el bio-oil con las materias primas, catalizadores, componentes y reactores de la refinерía ya en un proceso constante.

De acuerdo al estado del arte, se estima que la huella de carbono es mucho más pequeña que los combustibles a base de petróleo. De acuerdo a la Figura 5, el uso de biomasa o de desechos bio pueden permitir la transición a cero emisiones netas para descarbonizar el sector transporte. Las preguntas persistentes para responder para definir las líneas de investigación son:

- ¿Se pueden mejorar los catalizadores de refinерía para el coprocesamiento?
- ¿Cómo se afectan los bioaceites producidos a partir de materias primas diferentes? La composición del bio-oil puede cambiar dependiendo de la biomasa utilizada en su elaboración, ya sea madera dura, madera blanda, pastos, o incluso papel y cartón usado.
- ¿Cómo afectan las cantidades de lignina, celulosa y hemicelulosa de estas materias primas?
- ¿Cuánto carbono verde llega al combustible coprocesado? Para acceder a los créditos verdes o plantear el proyecto dentro del marco de la transición net zero, es necesario desarrollar herramientas para medir el carbono verde en combustibles coprocesados y de igual forma evaluar los impactos económicos y sociales.
- Predicción de la producción de la refinерía basada en materias primas biológicas. Una comprensión profunda de cómo reaccionan las especies que contienen nitrógeno en el biocrudo, es clave para predecir el rendimiento del coprocesamiento.
- Reacciones más lentas: un problema con una solución. Se ha encontrado que los biocrudos ralentizan las reacciones químicas involucradas en la refinación del petróleo. Los biocrudos tienen naturalmente altos niveles de especies de nitrógeno, que se unen fuertemente al catalizador utilizado en los procesos de hidrotratamiento disminuyendo su efectividad, lo que resultaría en productos con un mayor contenido de azufre que los productos derivados del petróleo puros.
- 

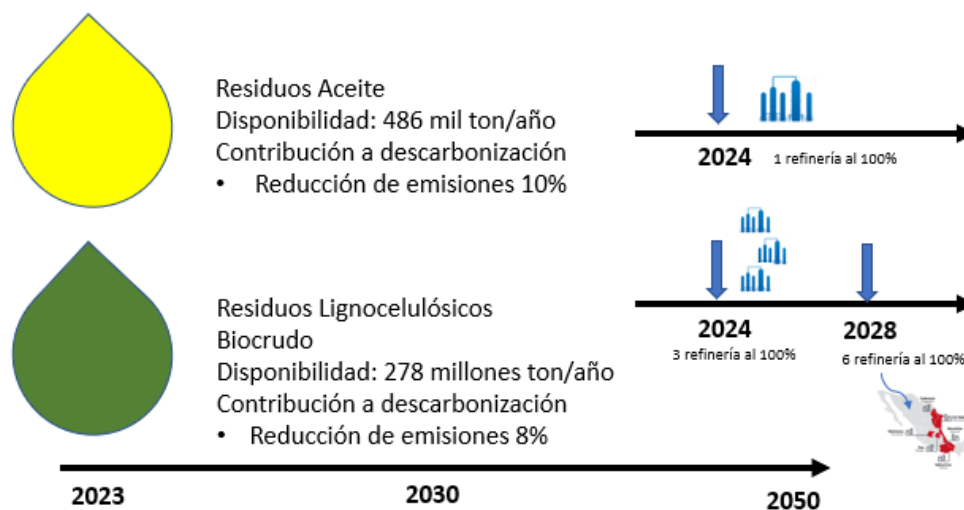


Figura 5. Estimación de reducción de emisiones al introducir materia bios en el sistema de refinación (NREL, 2022)

## Conclusiones

En este documento, se han revisado las actividades de investigación actualizadas sobre el coprocesamiento de biocrudos con crudos convencionales, con énfasis en el uso de la unidad FCC. El coprocesamiento proporciona un camino apropiado para introducir carbono renovable en los combustibles para el transporte mediante la utilización de

una infraestructura que ya existe, evitando notablemente una inversión de capital. La integración de <10% en peso de aceites crudos de pirólisis a base de madera mediante el coprocesamiento con materias primas a base de petróleo es comercialmente aplicable para las unidades FCC. Básicamente, existen dos opciones para mejorar la miscibilidad de los biocrudos con las corrientes de petróleo: (1) emplear catalizadores en el proceso de pirólisis para producir bioaceites de mayor calidad y (2) mejorar los biocrudos mediante métodos térmicos o catalíticos.

El coprocesamiento está en desarrollo utilizando modelos típicos simples para su evaluación. Se han propuesto modelos matemáticos para predecir el rendimiento del coprocesamiento y optimizar los parámetros sistemáticos, a fin de alcanzar los objetivos económicos y medioambientales teniendo presente la búsqueda de una combinación coherente de combustibles que permitan situar el límite del calentamiento global en los 2°C. En otras palabras, este documento resume exhaustivamente los enfoques aplicables para emplear más bios como carga de alimentación en los procesos de refinación, plantea líneas de investigación para el diseño de procesos, que impulsarán la aplicación de bioaceites en la producción de energía. Particularmente a través de los procesos de co-refinación que sean competitivos en costos utilizando las infraestructuras existentes, se tiene la ventaja de lograr proyectos financieramente atractivos sin afectar la operación y producción de las refinerías. Los aspectos que necesitan más investigaciones están relacionados con la búsqueda de materias primas biológicas que tengan un costo más bajo y propiedades más compatibles con las materias primas del petróleo, el desarrollo de catalizadores de coprocesamiento con una mayor conversión de bioaceites, una mejor selectividad de transferencia de hidrógeno y una vida útil más prolongada, la identificación de agentes de corrosión, **¡Error! Marcador no definido.** de corrosión y métodos de prevención de la corrosión debido al uso de materias bio, mejorando la conversión de materia prima para ser utilizada en otros procesos sin afectar los rendimientos de la planta, y reduciendo los costos del proceso.

**Agradecemos** al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores y al Instituto Mexicano del Petróleo por su apoyo para el desarrollo de esta investigación.

## Bibliografía

- Akah, A. (2017). Application of rare earths in fluid catalytic cracking: A review. *Journal of Rare Earths*, 941-956. [http://doi.org/10.1016/S1002-0721\(17\)60998-0](http://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)60998-0)
- Andrea de RezendePinho, A., De Almeida, M., Mendes, F., Ximenes, V., & y Casavechia, L. (2015). Co-processing raw bio-oil and gasoil in an FCC Unit. *Fuel Processing Technology*, 159-166. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.11.008>
- B2, U. 9. (2017). Estados Unidos Patent No. US 9663729 B2.
- Blume, A. (2021). IRPC Process '21: FCC processing of bio-based feeds. *Hydrocarbon Processing*, 1.
- Cámara de Diputados. (2015, 12 24). Ley de Transición energética. *Diario Oficial*. CDMX, CDMX, México: Secretaria de Gobernación.
- Cerqueira, H., Caeiro, G., Costa, L., & y Ribeiro, F. (2008). Deactivation of FCC catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 1-13. <http://doi.org/10.1016/j.molcata.2008.06.014>
- Co, S. O. (2014). Estados Unidos Patent No. US 9783740 B2.
- Cruz, P., Montero, E., & y Dufour, J. (2017). Modelling of co-processing of HDO-oil with VGO in a FCC unit. *Fuel*, 362-370. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.112>
- Epstein, A. (2023). *Un futuro fósil*. Barcelo, España: Deusto.
- Gueudré, L., Thegarid, N., Burel, L., Jouguet, B., Meunier, F., Schuurman, Y., & y Mirodatos, C. (2015). Coke chemistry under vacuum gasoil/bio-oil FCC co-processing conditions. *Catalysis Today*, 200-212. <http://doi.org/10.1016/j.cattod.2014.09.001>
- IMP. (2023). El papel actual y futuro del sector de la refinación y de los bioenergéticos. CDMX: IMP.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal . (2022, 08 01). Transición Energética . Retrieved from Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible: <https://www.gob.mx/inafed/articulos/que-es-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible#:~:text=La%20Agenda%202030%20es%20un%20plan%20de%20acci%C3%B3n,las%20personas%20y%20alcanzar%20la%20equidad%20de%20g%C3%A9nero.>
- Lens. (2023, 08 21). Lens. Retrieved from PATentes: [https://www.lens.org/lens/search/scholar/list?q=\(biofuel%20Australia\)&p=0&n=10&s=score&d=%2B&f=false&e=fa](https://www.lens.org/lens/search/scholar/list?q=(biofuel%20Australia)&p=0&n=10&s=score&d=%2B&f=false&e=fa)
- Marcello, S., Rigutto, R., & y Huve, L. (2007). Zeolites in Hydrocarbon Processing. *Elsevier*, 855-914. [http://doi.org/10.1016/S0167-2991\(07\)80812-3](http://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80812-3)
- Mobil, E. (2015). Estados Unidos Patent No. US 20170158967.
- NREL. (2017, 09 20). Refinery Co-processing Models. Retrieved from National Renewable Energy Laboratory: <https://bioenergymodels.nrel.gov/models/18/>
- NREL. (2022, 06 14). Co-Optimization of Fuels & Engines: Fuel Properties. Retrieved from CO-OPTIMA FINDINGS & IMPACT REPORT: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/co-optima-findings-impact-report>
- O'Connor, P., & Pouwels, C. (1994). FCC Catalyst Deactivation: A Review and Directions for further Research. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 129-144. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(08\)62734-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(08)62734-2)

- Oinonen, M., Hakanpää-Laotinen, H., Hämäläinen, K., Kaskela, A., & y Jungner, H. (2010). Biofuel proportions in fuels by AMS radiocarbon method. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1117-1119. <http://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.10.113>
- Pinho, A. D. (2015). Co-processing raw bio-oil and gasoil in an FCC Unit. *Fuel Processing Technology*, 159-166. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.11.008>
- Pinho, A. D. (2017). Fast pyrolysis oil from pinewood chips co-processing with vacuum gas oil in an FCC unit. *Fuel*, 462-473. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.032>
- Talmadge, M., Baldwin, R., Bidy, M., & al, e. (2014). A perspective on oxygenated species in the refinery integration of pyrolysis oil. *Green chemistry*, 407-453. <https://doi.org/10.1039/C3GC41951G>
- Tinoco, M., Torres, V., & Venegas, F. (2021, 05 11). Los desafíos de la economía mexicana. Retrieved from *Energía, política energética y crecimiento económico*: [http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Desafios-de-la-economia-electronico\\_513.pdf](http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Desafios-de-la-economia-electronico_513.pdf)
- UOP. (2005, 04 15). U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Retrieved from *Opportunities for Biorenewables in Oil Refineries*: <https://www.osti.gov/servlets/purl/861458-Wv5uum/>
- Weitkamp, J., & Hunger, M. (2007). *Acid and Base Catalysis on Zeolites*. Elsevier, 787-804. [http://doi.org/10.1016/S0167-2991\(07\)80810-X](http://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80810-X)
- Wilson, J. W. (1997). *Fluid Catalytic Cracking Technology and Operations*. Estados Unidos: PennWell Books.
- Zacher, A., Olarte, M., Santosa, D., Elliott, D., & y Jones, S. (2014). A review and perspective of recent bio-oil hydrotreating research. *Green Chemistry*, 491-515. <https://doi.org/10.1039/C3GC41382A>