

# Integración energética de una biorefinería de *Jatropha curcas* para la producción de bioturbosina

## Energy integration of a *Jatropha curcas* biorefinery for the production of biojet fuel

Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo<sup>1</sup>, Laura Daniela Hernández-Jaime<sup>2</sup>, Claudia Gutiérrez-Antonio<sup>3</sup>, Fernando Israel Gómez-Castro<sup>4</sup>, Salvador Hernández<sup>5</sup>

Romero-Izquierdo, A.G; Hernández-Jaime, L.D; Gutiérrez-Antonio, C; Gómez-Castro, F.I; Hernández, S. Integración energética de una biorefinería de *Jatropha curcas* para la producción de bioturbosina. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, número especial. Diciembre, 2023. Encuentro Iberoamericano en Biomasa y Bioenergía. Pág. 55-65.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7011>

- 1 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala. México. Correo electrónico: [araceli.romero@uaq.mx](mailto:araceli.romero@uaq.mx)  
<https://orcid.org/0000-0003-1546-6033>
- 2 Departamento de Ciencias Ambientales, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. México. Correo electrónico: [ld.hernandezjaime@ugto.mx](mailto:ld.hernandezjaime@ugto.mx)  
<https://orcid.org/0009-0002-8381-9005>
- 3 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala. México. Correo electrónico: [claugtez@gmail.com](mailto:claugtez@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-7557-2471>
- 4 Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. México. Correo electrónico: [fgomez@ugto.mx](mailto:fgomez@ugto.mx)  
<https://orcid.org/0000-0003-4906-063X>
- 5 Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. México. Correo electrónico: [hernasa@ugto.mx](mailto:hernasa@ugto.mx)  
<https://orcid.org/0000-0002-4598-3392>

## Palabras clave

Biorefinería; *Jatropha curcas*; integración energética; bioturbosina.

## Resumen

El desarrollo de procesos para la producción de combustible renovable de aviación coadyuva a la recuperación sostenible del sector de aviación; en tales procesos, la aplicación de estrategias de eficiencia energética puede mejorar su competitividad económica y ambiental. En este trabajo se presenta la integración energética en una biorefinería de *Jatropha curcas* (JC) para la producción de bioturbosina, como producto principal, mediante la metodología del punto de pliegue. La aplicación de la integración energética se basa en la construcción de dos rutas, definidas por los intercambios de material entre los procesos que las integran. En la ruta 1 (R1) se consideran 7 y 6 corrientes calientes y frías, respectivamente; mientras que para la ruta 2 (R2), 6 y 8 corrientes calientes y frías, respectivamente. Los resultados muestran que es posible ahorrar hasta 82,41 % y 74,89 % de servicios de calentamiento y enfriamiento para R1, mientras que hasta 71 % y 87,28 % de ahorro de servicios de calentamiento y enfriamiento para R2. Estos resultados suponen menor impacto ambiental, respecto al esquema sin integración, debido al menor consumo de servicios externos, lo cual podría mejorar significativamente la economía del proceso.

## Keywords

Biorefinery; *Jatropha curcas*; energy integration; biojet fuel.

## Abstract

The development of processes for renewable aviation fuel production boosts a sustainable recovery of the aviation sector; in such processes, the application of strategies of energy efficiency can improve its economic and environmental competitiveness. In this work is presented the energy integration of a *Jatropha curcas* (JC) biorefinery for the production of biojet fuel, as the main product, through the pinch point methodology. The energy integration application is based on the construction of two routes, defined by the material exchanges between the integrated processes. Route 1 (R1) considers 7 and 6 hot and cold streams, respectively; whilst in route 2 (R2), 6 and 8 hot and cold streams, respectively. The results show that it is possible to save 82,41 % and 74,89 % on heating and cooling utilities for R1, whilst up 71 % and 87,28 % of savings on heating and cooling utilities for R2. These savings represent less environmental impact, regarding the biorefinery scheme without integration, due to less consumption of external utilities; thereby, the economy of the process could improve significantly.

## Introducción

Debido a la pandemia causada por el virus SARS-CoV-2 en 2020, diversos sectores de la sociedad han sido severamente afectados, tales como el sector salud, transporte, energético, entre otros. Específicamente en términos de energía, tres implicaciones han surgido frente a esta emergencia sanitaria: 1) la seguridad energética es la piedra angular de la economía global; 2) la seguridad eléctrica y los sistemas de energía resilientes son imprescindibles; 3) las transiciones a energías limpias deben estar al centro de los planes de recuperación económica, ya que éstas han sido una fuente resiliente y en expansión durante este periodo crítico [1]. En este sentido, el sector transporte, cuya demanda de energía mundial es alrededor de 29 %, ha impulsado el uso de energías renovables como una estrategia resiliente para alzar su

recuperación sostenida [2]. Particularmente, el sector de aviación ha considerado el uso de bioturbosina, o combustible renovable de aviación, como la estrategia prioritaria para alcanzar a mediano y largo plazo sus planes de recuperación económica sostenible, así como de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> para el 2050 [3].

Desde el punto de vista técnico, la producción de bioturbosina es factible a partir de una gran variedad de materias primas renovables (aceites vegetales, grasas animales, azúcares, almidones, biomasa lignocelulósica) mediante cinco rutas de producción certificadas por ASTM, y al menos dos en proceso de certificación [4]; estos procesos permiten la obtención de bioturbosina con las características fisicoquímicas apropiadas para ser usada en mezclas con turbosina de origen fósil (máximo 50 % v/v), debido a la ausencia de componentes aromáticos [5]. Desde 2011, en México, con la estrategia “Plan de vuelo” organizada por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) diversos vuelos comerciales han utilizado turbosina renovable [4]. Sin embargo, desde el punto de vista económico, la producción de bioturbosina no es competitiva frente a su contraparte fósil. En este sentido, algunas estrategias han sido propuestas para alcanzar su viabilidad económica, en donde destacan la aplicación de herramientas de intensificación de procesos principalmente orientadas a la zona de purificación [5-11]; también se ha reportado el uso de esquemas de aprovechamiento integral de una o varias materias primas, los cuales se conocen como biorefinerías. Una biorefinería es un concepto de planta de procesamiento, similar a las refinerías de petróleo convencionales, que transforma biomasa. Dentro de estos esquemas se busca el aprovechamiento completo de la materia prima para diversificar los procesos y productos, a modo de obtener mayor rentabilidad económica. Pocas biorefinerías orientadas a la producción de bioturbosina como principal producto han sido propuestas [12-14]; no obstante, tales biorefinerías no son aún competitivas económicamente, siendo el alto costo de la materia prima y los altos requerimientos energéticos los principales factores que afectan su economía. Es por ello que en este trabajo se presenta la integración energética, a partir de la metodología de punto de pliegue [15], de un esquema de biorefinería para la obtención de bioturbosina como producto principal, mediante el aprovechamiento integral de *Jatropha curcas* (JC); JC es un cultivo energético de segunda generación con alto potencial productivo en México. El esquema de biorefinería ha sido previamente diseñado, modelado y simulado en Aspen Plus por Romero-Izquierdo y col. [16].

## Metodología

En esta sección se presenta la metodología utilizada para realizar la integración energética de la biorefinería de JC para la producción de bioturbosina y otros bioenergéticos, propuesta por Romero-Izquierdo y col. [16]. En la subsección 1. se describe la metodología de punto de pliegue para realizar la integración de energía, mediante el algoritmo de la tabla problema. En la subsección 2. se presenta el esquema de biorefinería, el cual está integrado por cuatro zonas de procesamiento; finalmente, en la subsección 3. se presenta la integración de energía entre las zonas de procesamiento de la biorefinería, aplicando el algoritmo de la tabla problema.

### Metodología del punto de pliegue

La metodología del punto de pliegue, a través del algoritmo de la tabla problema, permite analizar sistemáticamente las corrientes de un proceso, así como sus servicios auxiliares, mediante la aplicación de la primera y segunda ley de la termodinámica. Esta herramienta predice los requerimientos mínimos de energía externa, así como el número de unidades de intercambio de calor [17,18]; su aplicación se desarrolla a través del algoritmo de la tabla problema, el cual se describe a continuación [19]:

- a. Entrada de datos y definición del  $\Delta T_{min}$ .

- b. Ajuste de temperaturas.
- c. Determinación de los intervalos de temperatura.
- d. Estimación del balance de calor por intervalo.
- e. Construcción de la cascada de calor.
- f. Construcción del diagrama de red.

Para este estudio se considera  $\Delta T_{min}$  como 10 °C, tomando en consideración las siguientes reglas: 1) sin calentamiento externo abajo del pliegue, 2) sin enfriamiento externo arriba del pliegue, 3) sin transferencia de calor a través del pliegue. Es importante señalar que las corrientes de proceso a integrar deben ser definidas como corrientes frías (deben pasar a un nivel mayor de temperatura) o calientes (deben pasar a un nivel menor de temperatura) en la entrada de datos.

### Descripción del esquema de biorefinación

De acuerdo con Romero-Izquierdo y col. [16] fueron procesados 1 016,42 ton/h del fruto de JC dentro del esquema de biorefinación; este esquema está integrado por cuatro zonas de procesamiento: Z1- procesamiento de la cáscara externa e interna, Z2- extracción del aceite vegetal, Z3- digestión anaerobia de la torta residual, y Z4- procesamiento del aceite de JC, las cuales se esquematizan en la Figura 1. En la Z1 se incluyen la pirólisis rápida de la cáscara externa, gasificación y DA-AHCF (ácido diluido, hidrólisis ácida y co-fermentación) para la cáscara interna, así como alcohol a combustible de aviación (ATJ, alcohol to jet) para la producción de bioturbosina, cuya materia prima es el 70 % peso del etanol producido en DA-AHCF. Por su parte, la Z2 abarca el prensado mecánico de las semillas de JC para la obtención del aceite vegetal y torta residual. En seguida, la Z3 incluye el procesamiento de la torta residual mediante digestión anaerobia; de este proceso se obtiene biogás, el cual se transforma en energía eléctrica mediante el uso de una turbina. Finalmente, la Z4 involucra los procesos de hidrotratamiento y transesterificación del aceite vegetal, alimentando el 70 % peso del aceite obtenido de la Z2 al hidrotratamiento, y el 30 % restante a la producción de biodiésel. Es importante mencionar que, en el caso de la gasificación, el hidrógeno obtenido se alimenta al proceso de hidrotratamiento como reactivo. Asimismo, en lo que se refiere a la pirólisis, tres productos con alto valor energético son obtenidos: bio-aceite, bio-carbón y biogases; siendo este último utilizado como corriente de calor residual. Es importante mencionar que este esquema de biorefinería, así como su integración energética han sido modelados y simulados en Aspen Plus V.10.0, usando NRTL, Peng-Robinson, BK10 y UNIQUAC como modelos termodinámicos; el detalle de la simulación puede encontrarse en [16].

De acuerdo con los resultados de simulación reportados para este esquema de biorefinación, la producción de bioturbosina es 33,17 % de la demanda requerida en los 60 aeropuertos con mayor consumo en México, considerando una mezcla 50 % v/v con turbosina fósil, de acuerdo con datos de 2021 [20]. El consumo de vapor para satisfacer los requerimientos de energía del esquema representa el 94,5 % del costo total de servicios externos de calentamiento, enfriamiento y electricidad. Asimismo, el 90 % de la electricidad requerida en esta biorefinería es generada in situ, mediante el acondicionamiento de las corrientes de proceso (ajuste de presión) y la conversión de biogás en electricidad. En este sentido, la aplicación de estrategias que permitan disminuir los requerimientos de vapor de calentamiento dentro de este esquema de aprovechamiento integral, tal como la metodología de punto de pliegue, podría mejorar su competitividad económica.

## Integración energética de la biorefinería de JC

La integración de energía de la biorefinería de JC se lleva a cabo considerando los intercambios de materia entre los procesos incluidos, por lo que dos rutas de integración son analizadas: R1) Procesos de gasificación, prensado mecánico, transesterificación, DA-AHCF y pirólisis; R2) Procesos de ATJ, hidrotratamiento y digestión anaerobia. En los Cuadros 1 y 2 se presentan las corrientes de proceso de las dos rutas de integración, indicando su nivel de temperatura, tipo de corriente y contenido de energía. Es importante notar que, en el caso de la R1, el EX-12 considerado en la gasificación también incluye a los productos de pirólisis, por lo que de este proceso no hay corrientes de intercambio.

Por su parte, para la R2, la digestión anaerobia no posee corrientes de intercambio a considerar dentro de la integración, debido al bajo contenido energético de sus corrientes antes de la transformación del biogás en electricidad.

Los datos presentados en los cuadros 1 y 2 son extraídos de los resultados de simulación de este esquema, y son el primer paso del algoritmo de la tabla problema; para la R1 se tienen 7 corrientes calientes y 6 corrientes frías, mientras que para la R2 se tienen 6 y 8 corrientes calientes y frías, respectivamente.

En lo que se refiere al ajuste de temperaturas, éste se realiza restando el  $\Delta T_{min}$  a las corrientes calientes tanto de entrada como de salida, conservando los valores de las corrientes frías, tal como aparecen en los cuadros 1 y 2.

**Cuadro 1.** Corrientes de proceso, R1.

Prensado Mecánico						
Equipo	ID	Tipo	T inicial (°C)	T final (°C)	$\Delta T$ (°C)	$mC_p$ (kW/°C)
EX-10	C1	F	25,00	100,00	75,00	145,22
Transesterificación						
Cond-REC-ET-1	H1	C	78,56	77,88	0,69	39 471,71
Reb-REC-ET-1	C2	F	113,42	114,88	1,46	26 784,82
Cond-REC-ET-2	H2	C	87,72	77,96	9,77	58,34
Reb-REC-ET-2	C3	F	100,83	168,99	68,16	108,92
Reb-REC-GLYC	C4	F	139,94	281,61	141,67	1 397,82
DA-AHCF						
EX-3	C5	F	68,08	210,00	141,92	12 420,39
EX-4	H3	C	210,00	40,00	170,00	10 758,57
Cond-Rectific	H4	C	77,01	44,61	32,41	3 902,90
Cond-Recupera	H5	C	85,46	29,88	55,58	478,58
Reb-Recupera	C6	F	34,00	115,10	82,30	419,68
Gasificación						
EX-1	H6	C	558,40	30,00	528,40	142,52
EX-2	H7	C	676,86	40,00	636,86	126,04

Notas: Para ID: C=corriente fría, H=corriente caliente; Para Tipo: F= corriente fría, C= corriente caliente.  
 $\Delta T$ = diferencia de temperatura, Temperatura final (T final) – Temperatura inicial (T inicial);  $mC_p$ = producto entre la masa de la corriente y su capacidad calorífica

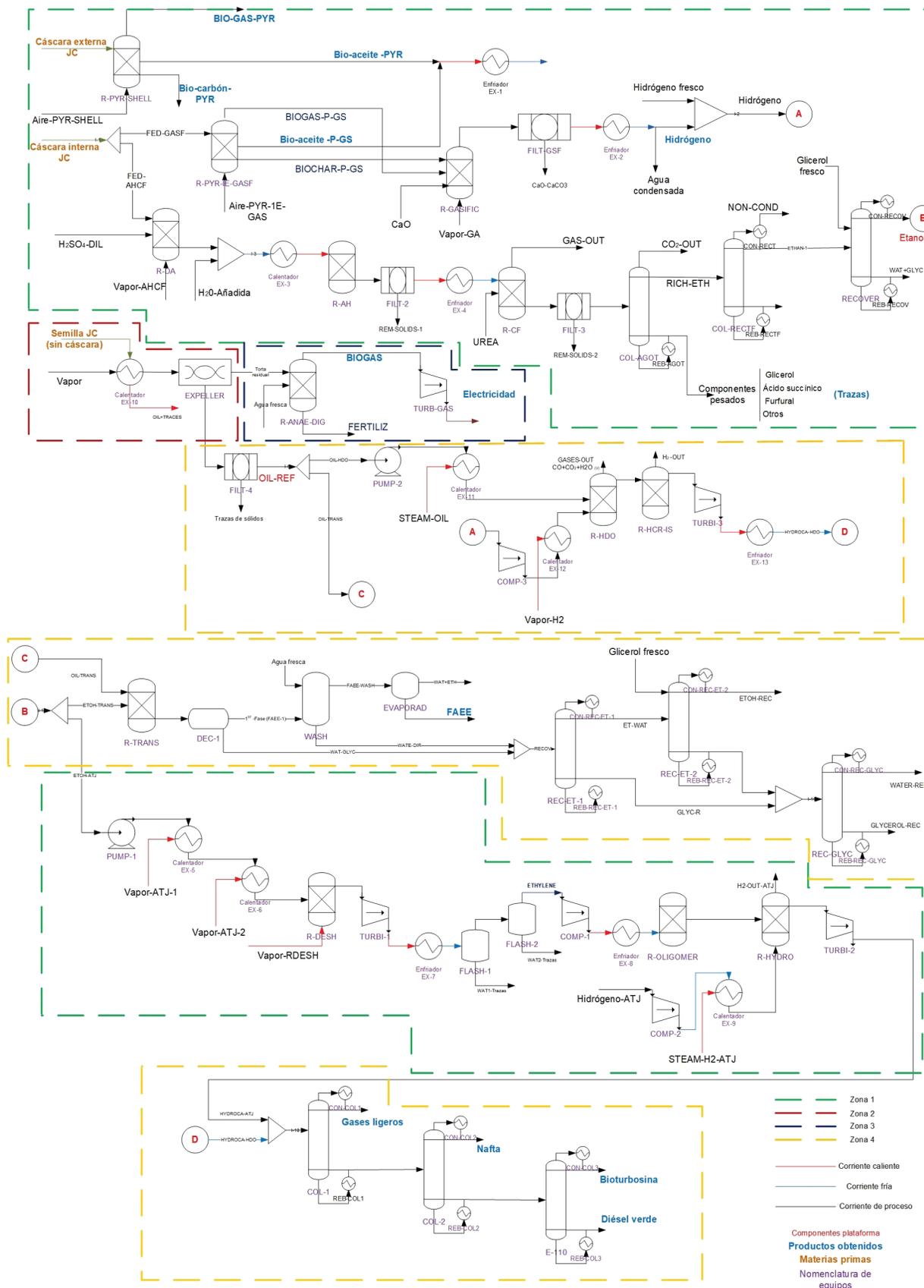


Figura 1. Diagrama de flujo de la biorefinería de JC. Extraído y modificado de [16,19].

Con estas temperaturas ajustadas se realiza la definición de intervalos, en donde se ordenan las temperaturas de las corrientes desde la más caliente hasta la más fría. Cada intervalo formado posee una temperatura de entrada y de salida, así como un valor energético. El valor de energía de cada intervalo se define como un exceso o déficit de calor, realizando un balance de energía entre las corrientes que integran el intervalo.

Una vez obtenido el balance de calor se construye la cascada de calor, a través de la cual se determina la mínima cantidad de servicios auxiliares de enfriamiento y calentamiento requeridos por el sistema. La cascada de calor funciona como una máquina térmica ideal (sin pérdidas al ambiente), en donde sus etapas son definidas por los intervalos estimados previamente. En el punto donde la transferencia de calor es cero se definen las temperaturas de pliegue (una caliente y una fría), las cuales corresponden a las temperaturas de mínimo acercamiento entre las corrientes frías y calientes.

**Cuadro 2.** Corrientes de proceso, R2.

ATJ						
Equipo	ID	Tipo	T inicial (°C)	T final (°C)	$\Delta T$ (°C)	$mC_p$ (kW/°C)
EX-5	C1	F	33,76	350,00	316,24	61,42
EX-6	C2	F	273,61	450,00	176,39	58,19
EX-7	H1	C	257,55	84,00	173,55	202,29
EX-8	H2	C	351,74	120,00	231,74	17,95
EX-9	C7	F	-228,27	100,00	328,27	11,09
Hidrotratamiento						
EX-11	C6	F	80,28	320,00	239,72	63,45
EX-12	C8	F	38,51	320,00	281,49	62,08
EX-13	H6	C	409,58	80,00	329,58	80,38
Cond - COL--1	H3	C	-2,12	-5,49	3,38	544,18
Reb - COL-1	C3	F	95,08	126,01	30,94	157,03
Cond - COL-2	H4	C	73,25	55,60	17,64	184,57
Reb - COL-2	C4	F	175,61	205,72	30,11	254,76
Cond - COL-3	H5	C	219,23	163,76	55,47	132,56
Reb - COL-3	C5	F	364,82	372,34	7,52	1 456,77

*Notas: Para ID: C=corriente fría, H=corriente caliente; Para Tipo: F= corriente fría, C= corriente caliente  
 $\Delta T$ = diferencia de temperatura, Temperatura final (T final) – Temperatura inicial (T inicial);  $mC_p$ = producto entre la masa de la corriente y su capacidad calorífica*

Para la R1, las temperaturas de pliegue son 78,6 °C y 68,6 °C, para las corrientes calientes y frías, respectivamente; mientras que para la R2 son 257,5 °C y 247,5 °C para las corrientes calientes y frías, respectivamente. Asimismo, a partir de la cascada de calor es posible estimar los mínimos requerimientos de energía de calentamiento y enfriamiento para cada red. Han sido estimados 394,36 MW y 515,24 MW de servicios de calentamiento y enfriamiento, respectivamente para la R1; mientras que para la R2 se requieren 22,67 MW y 11,38 MW de servicios de calentamiento y enfriamiento externo, respectivamente.

A partir del valor de las temperaturas de pliegue se diseña la red de intercambio de calor, tanto para abajo como para arriba de este punto, siguiendo las reglas descritas en la subsección 1. Las redes de intercambio construidas se presentan en la siguiente sección, así como los ahorros energéticos conseguidos, respecto al proceso sin integración.

## Resultados

En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos de la aplicación de la metodología del punto de pliegue en el esquema de biorefinería de JC. Las redes de integración de energía diseñadas se presentan en las Figuras 2 y 3, para R1 y R2, respectivamente; ambas cumplen los requerimientos externos de calentamiento y enfriamiento, previamente estimados en su respectiva cascada de calor. Como se puede observar de la Figura 2, para la R1 se tienen 27 equipos de transferencia de calor, de los cuales 7 corresponden a enfriadores, 7 calentadores y 13 son intercambiadores de calor entre corrientes de proceso. Por su parte, para la R2 de la Figura 4 se observan 20 equipos de transferencia de calor siendo 4 enfriadores, 5 calentadores y 11 intercambiadores entre corrientes de proceso. Es importante notar que ningún intercambio se lleva a cabo a través de las temperaturas de pliegue; asimismo, sólo se tienen calentadores por encima del pliegue y enfriadores por debajo del pliegue.

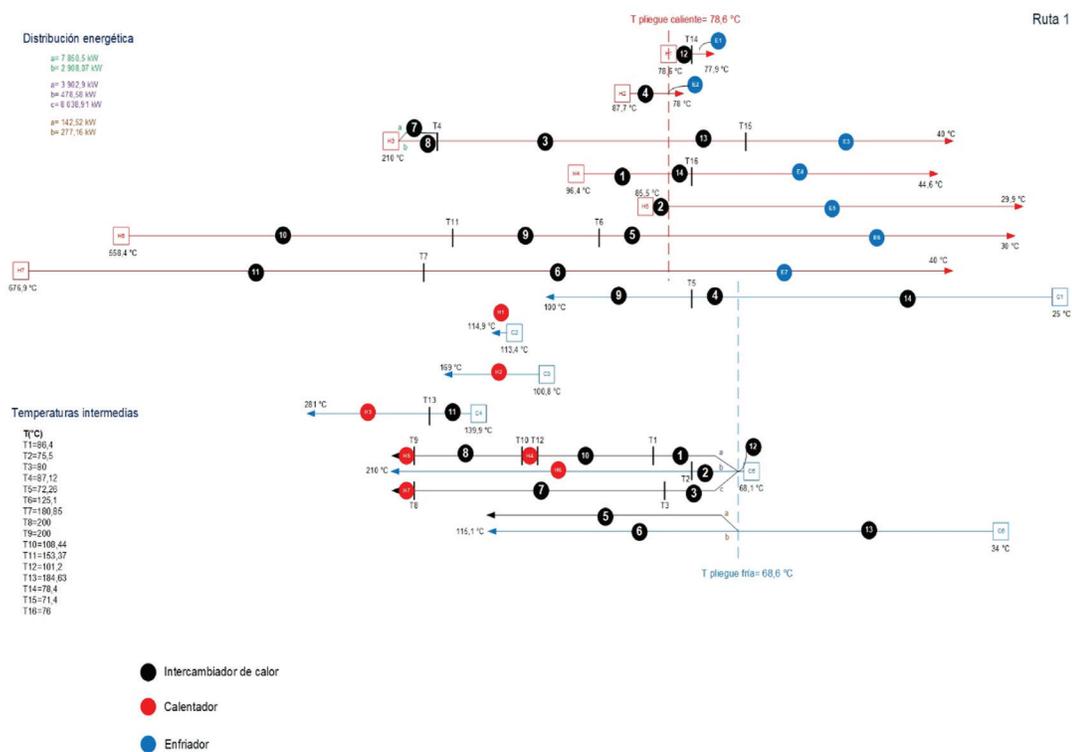
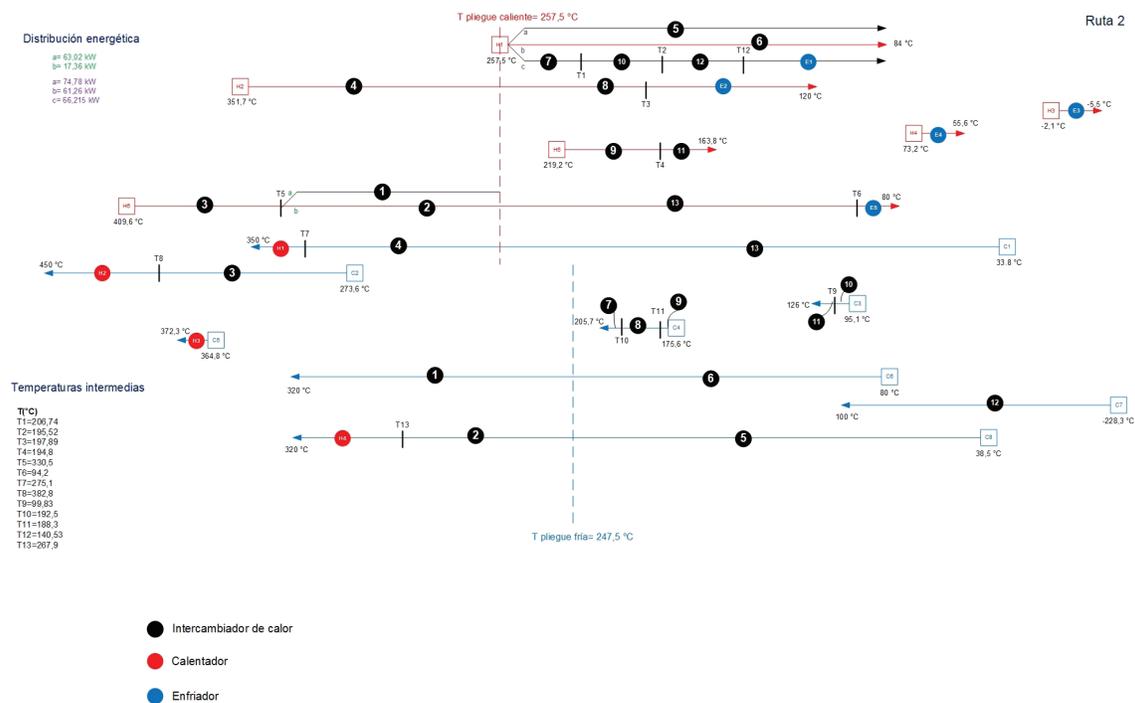


Figura 2. Red de intercambio de calor, R1.



**Figura 3.** Red de intercambio de calor, R2.

Por otro lado, respecto a los ahorros energéticos estimados al aplicar la metodología de punto de pliegue, en el cuadro 3 se presentan los requerimientos externos de calentamiento y enfriamiento tanto para la biorefinería de JC sin integración, como los estimados en para cada ruta integrada. Es importante mencionar que la energía de las corrientes de proceso se refiere a la energía de calentamiento y enfriamiento del esquema sin integración, considerando los procesos involucrados en cada ruta analizada.

**Cuadro 3.** Estimación del ahorro energético alcanzado para las R1 y R2.

R1		
	Calentamiento	Enfriamiento
Q corrientes de proceso (kW)	2 241,51	2 052,22
Q servicios externos (kW)	394,36	515,24
Ahorro	82,41 %	74,89 %
R2		
Q corrientes de proceso (kW)	78,19	89,48
Q servicios externos (kW)	22,67	11,38
Ahorro	71 %	87,28 %

Como se puede observar del cuadro 3, en el caso de la R1 se puede alcanzar hasta 82,41 % de ahorro en servicios de calentamiento y 74,89 % en los servicios de enfriamiento; mientras que para la R2 se puede tener hasta 71 % y 87,28 % de ahorro en los servicios externos de calentamiento y enfriamiento, respectivamente. Estos ahorros de energía reducen el impacto ambiental de este esquema de aprovechamiento integral, al generar menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> por el menor consumo de vapor de calentamiento y reducen además su huella hídrica, al usar menor cantidad de agua de enfriamiento; además podrían suponer una mejora importante en la economía del proceso. Sin embargo, es importante notar que la

cantidad de equipos de intercambio de calor supera casi al doble los equipos originalmente colocados en el esquema de biorefinación, lo cual podría suponer incrementos en los costos de capital asociados con los equipos de proceso y su mantenimiento. Se requiere un estudio adicional en términos económicos en donde se verifique la reducción de costos de operación debido a los consumos significativos en servicios externos, analizando el aumento en los costos de equipos. El estudio ambiental y económico se presentarán en un posterior trabajo. Finalmente, es importante señalar que los ahorros energéticos alcanzados en la biorefinería al realizar la integración energética deben ser comparados con respecto al esquema de biorefinería sin integración, a modo de visualizar el alcance de esta metodología en términos de la eficiencia energética. Estos resultados no podrían ser contrastados con otros esquemas de biorefinería para el procesamiento de JC, ya que deberían de considerar el mismo nivel de diversificación tanto de procesos como de productos obtenidos para realizar una comparación energética justa.

## Conclusiones

En este trabajo se ha presentado la integración energética en una biorefinería de JC para la producción de combustible de aviación renovable como producto principal. La integración de energía se ha llevado a cabo mediante la metodología del punto de pliegue a través del algoritmo de la tabla problema. La aplicación de la integración energética dentro del esquema de biorefinación se ha basado en la construcción de dos rutas, definidas por los intercambios de material entre los procesos que las integran; considerando para la R1, 7 y 6 corrientes calientes y frías, respectivamente, mientras que, para la R2, 6 y 8, corrientes calientes y frías, respectivamente. De acuerdo con los resultados, es posible ahorrar hasta 82,41 % y 74,89 % de servicios de calentamiento para R1 y R2, respectivamente; mientras que se puede alcanzar hasta 71 % y 87,28 % de ahorro de servicios de enfriamiento para la R1 y R2, respectivamente. Estos ahorros suponen un menor impacto ambiental, respecto al esquema sin integración, debido al menor consumo de servicios externos, lo cual podría además mejorar significativamente la economía del proceso. No obstante, resulta necesario realizar un análisis económico detallado para comprobar la influencia del aumento en el número de equipos de intercambio, respecto al esquema original.

## Agradecimientos

Se agradece a CONACyT por el apoyo brindado al proyecto postdoctoral de A.G. Romero-Izquierdo (No. proyecto 869445). Asimismo, se agradece a la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Universidad de Guanajuato por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

Y a la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T) del Programa CYTED, organizadora del evento EIBB-2022.

## Referencias

- [1] IEA, "IEA – COVID-19 Topics," International Energy Agency, 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/topics/covid-19>. [Accessed: 01-Sep-2022].
- [2] I. E. A. IEA, "World Energy Outlook 2020 – Analysis - IEA," 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020#executive-summary>. [Accessed: 24-Jun-2021].
- [3] International Air Transport Association (IATA), "IATA - Post-COVID-19 Green Recovery Must Embrace Sustainable Aviation Fuels," 2021. [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2020-07-09-01/>. [Accessed: 08-Jun-2021].

- [4] C. Gutiérrez-Antonio, A. G. Romero-Izquierdo, F. I. Gómez-Castro, and S. Hernández, *Production Processes of Renewable Aviation Fuel*. Elsevier, 2021.
- [5] C. Gutiérrez-Antonio, A. G. Romero-Izquierdo, F. Israel Gómez-Castro, and S. Hernández, "Energy Integration of a Hydrotreatment Process for Sustainable Biojet Fuel Production," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 55, no. 29, pp. 8165–8175, 2016.
- [6] C. Gutiérrez-Antonio, A. G. Romero-Izquierdo, F. Israel Gómez-Castro, and S. Hernández, "Energy Integration of a Hydrotreatment Process for Sustainable Biojet Fuel Production," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 55, no. 29, pp. 8165–8175, Jul. 2016.
- [7] A. G. Romero-Izquierdo, C. Gutiérrez-Antonio, F. I. Gómez-Castro, and S. Hernández, "Energy Integration and Optimization of the Separation Section in a Hydrotreating Process for the Production of Biojet Fuel," in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 40, Elsevier B.V., 2017, pp. 661–666.
- [8] C. Gutiérrez-Antonio, M. L. Soria Ornelas, F. I. Gómez-Castro, and S. Hernández, "Intensification of the hydrotreating process to produce renewable aviation fuel through reactive distillation," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 124, pp. 122–130, 2018.
- [9] C. Gutiérrez-Antonio, A. Gómez-De la Cruz, A. G. Romero-Izquierdo, F. I. Gómez-Castro, and S. Hernández, "Modeling, simulation and intensification of hydroprocessing of micro-algae oil to produce renewable aviation fuel," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 20, no. 7, pp. 1589–1598, 2018.
- [10] A. L. Moreno-Gómez, C. Gutiérrez-Antonio, F. I. Gómez-Castro, and S. Hernández, "Modelling, simulation and intensification of the hydroprocessing of chicken fat to produce renewable aviation fuel," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 159, p. 108250, 2021.
- [11] A. G. Romero-Izquierdo, F. I. Gómez-Castro, C. Gutiérrez-Antonio, S. Hernández, and M. Errico, "Intensification of the alcohol-to-jet process to produce renewable aviation fuel," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 160, p. 108270, 2021.
- [12] W. C. Wang, "Techno-economic analysis of a bio-refinery process for producing Hydro-processed Renewable Jet fuel from *Jatropha*," *Renew. Energy*, vol. 95, pp. 63–73, Sep. 2016.
- [13] P. Tongpun, W.-C. Wang, and P. Srinophakun, "Techno-economic analysis of renewable aviation fuel production: From farming to refinery processes," *J. Clean. Prod.*, vol. 226, pp. 6–17, 2019.
- [14] A. G. Romero-Izquierdo, F. I. Gómez-Castro, C. Gutiérrez-Antonio, S. Hernández, and M. Errico, "Modelling and simulation of a multiple feedstock integrated biorefinery for the production of aviation biofuel and other biofuels," in *31st European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, vol. 50, M. Türkay and R. Gani, Eds. Elsevier, 2021, pp. 1885–1890.
- [15] N. H. Florin and A. T. Harris, "Hydrogen production from biomass coupled with carbon dioxide capture: The implications of thermodynamic equilibrium," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 17, pp. 4119–4134, 2007.
- [16] A. G. Romero-Izquierdo, C. Gutiérrez-Antonio, F. I. Gómez-Castro, and S. Hernández, "Synthesis and intensification of a biorefinery to produce renewable aviation fuel, biofuels, bioenergy and chemical products from *Jatropha Curcas* fruit," *IET Renew. Power Gener.*, vol. n/a, no. n/a, 2022.
- [17] A. K. Kralj, "Heat integration between two biodiesel processes using a simple method," *Energy and Fuels*, vol. 22, no. 3, pp. 1972–1979, May 2008.
- [18] C. Gutiérrez-Antonio, A. G. Romero-Izquierdo, F. I. Gómez-Castro, and S. Hernández, *Production Processes of Renewable Aviation Fuel*, vol. 1. Elsevier, 2021.
- [19] A. G. Romero-Izquierdo, "Diseño, modelado y simulación de un esquema de biorefinería para el aprovechamiento integral de mezclas de materias primas renovables," *Univ. Guanajuato*, vol. PhD Thesis, 2020.
- [20] SIE, "Demanda interna de turbosina por estado 2014-2032," SENER, 2022. [Online]. Available: [https://sie.energia.gob.mx/movil.do?action=cuadro&cveca=DIPS\\_PP\\_C54\\_E](https://sie.energia.gob.mx/movil.do?action=cuadro&cveca=DIPS_PP_C54_E). [Accessed: 05-May-2022].