

# Herramientas de simulación aplicadas a la optimización energética de procesos en ingeniería química

Caso de estudio: Etapa de esterificación en la obtención de biodiesel 2G



María F. Laborde<sup>1,2</sup>

Medardo Serna-Gonzalez<sup>3</sup>

José M. Ponce-Ortega<sup>3</sup>

María C. Gely<sup>1</sup>

Ana M. Pagano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN), Argentina

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

<sup>3</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, México

E-mail: fernanda.laborde@fio.unicen.edu.ar

44



## RESUMEN

En este trabajo se presenta el empleo de herramientas de simulación de ingeniería química aplicadas a la optimización energética de un caso de estudio: la obtención de biodiesel de segunda generación (2G) a partir de aceites vegetales usados (AVUs). Se diseña una red de intercambio de calor (RIC) para minimizar el uso de servicios requeridos en la etapa de esterificación catalítica de los AVUs. El proceso se simula por medio del software Aspen Plus<sup>TM</sup> para una capacidad de procesamiento de 680,7 kg/h de AVUs, considerando que los aceites vegetales usados están compuestos por una mezcla de 72,82% de aceite de girasol y 27,13% de aceite de soja, constituidos por sus triglicéridos mayoritarios trilinoleína y trioleína (78% y 22% para el girasol, 70% y 30% para la soja, respectivamente). Para obtener la RIC se aplica una superestructura

constituida con todas las corrientes del proceso de esterificación, la cual se resuelve con el software GAMS<sup>TM</sup>. Asimismo, se analizan otras posibles alternativas de diseño como bomba de calor y/o ciclos Rankine orgánico. Mediante la aplicación de la RIC se logra disminuir el 28% en el uso de servicios externos.

## ABSTRACT

This paper presents the use of chemical engineering simulation tools applied to the energy optimization of a case study: obtaining second generation biodiesel (2G) from waste vegetable oils (WCO). A heat exchange network (HEN) is designed to minimize the use of services required in the catalytic esterification stage of WCO. The process is simulated by mean of Aspen Plus<sup>TM</sup> software for a processing capacity of 680.7 kg/h of WCO, considering that they are composed of

a mixture of 72.82% of sunflower oil and 27.13% of soybean oil, constituted these oils by the main triglycerides trilinolein and triolein (78% and 22% for sunflower oil; 70% and 30% for soybean oil, respectively). A superstructure with all streams of the esterification process is applied to obtain the heat exchange network (HEN), which is solved by GAMS™ software. Other possible design alternatives such as heat pumps and / or organic Rankine cycles are also analyzed. By mean of the application of HEN, a reduction of 28% in the use of external services is achieved.

### **PALABRAS CLAVE**

Red de Intercambio de Calor, Superestructura, Esterificación, Biodiesel, AVUs.

### **INTRODUCCIÓN**

La simulación de procesos es una herramienta cada vez más importante para la industria química, ya que constituye un recurso muy versátil para aplicar al diseño, caracterización, optimización y monitoreo de procesos industriales [1, 2].

El biodiesel –una alternativa a los combustibles fósiles ya que es natural, renovable, biodegradable, técnica-mente factible, económicamente competitivo, no tóxico, ecológico y fácilmente disponible, [3-5] puede ser generado a partir de diferentes fuentes renovables, tales como aceites vegetales alimenticios [6] y otras fuentes no comestibles [7-10].

Los biocombustibles de segunda generación (2G) son una alternativa comprometida con el medio ambiente. Los aceites vegetales usados (AVUs) no son biodegradables; si se vierten a desagües se convierten en potenciales contaminantes del agua, impidiendo el intercambio de oxígeno y la entrada de luz. Se estima que un litro de AVUs contamina unos 1000 litros de agua [11]. El reciclado de los AVUs es importante a nivel mundial, por lo tanto, el uso de estos desechos de la industria alimentaria en la producción de biodiesel resultaría adecuado y provechoso.

Por otra parte, la utilización de AVUs para la producción de biodiesel es de interés cre-

ciente día a día, ya que es una materia prima económica en la mayoría de los países del mundo. El precio de los AVUs es más barato en comparación con los aceites vegetales frescos [12-14].

Desde 2002, en Argentina se han desarrollado distintas experiencias sobre producción de biodiesel a partir de AVUs [15]. En 2006 en el Congreso de la Nación se sancionó la Ley 26.093 que regula y promueve la producción y uso sustentable de biodiesel. Esta Ley establecía que a partir de 2010 todo combustible líquido caracterizado como gasoil o diesel oil comercializado dentro del territorio nacional debía ser mezclado con biodiesel en un porcentaje del 5% como mínimo, pero actualmente los niveles de corte del gasoil se han ampliado al 9,7% [16]. A partir del año 2008, en la Provincia de Buenos Aires se crea el Programa Provincial “Plan BIO” para recolección y reciclado del aceite vegetal usado. Desde entonces más de 100 municipios han adherido al Programa [17], con lo cual se ha fomentado en Argentina la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales usados.

Las plantas de elaboración de biodiesel presentan un uso intensivo de la energía; generar un ahorro en los servicios auxiliares ofrecería un interesante potencial para mejorar la economía de estos procesos. Para lograr el objetivo de recuperación máxima de energía o de requerimientos mínimos de servicios auxiliares es posible recurrir al empleo de redes de intercambio de calor (RIC) [18, 19], bombas de calor [20, 21] o ciclos Rankine orgánico (ORC) [22-26].

Con el fin de optimizar energéticamente el proceso de obtención de este biocombustible, en el presente trabajo se desarrolla un modelo de simulación de la primera etapa que corresponde a la esterificación de los ácidos grasos libres presentes en los AVUs, y se analiza a partir del modelo la posibilidad de recuperación máxima de energía.

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **Materia prima**

Se estudia el proceso de producción de bio-

diesel a partir de AVUs con una acidez libre del 5% [27, 28]. La composición de los AVUs fue definida sobre la base de datos de la Cámara de la Industria Aceitera de la República Argentina [29] y de *Made in Argentina* [30]. A partir de esta información se determinó que los principales aceites vegetales consumidos en el país son de soja y girasol [29]. No se encuentra entre ellos el aceite de maíz, aunque sea uno de los mayores cultivos en Argentina, debido a que su aceite solo representa el 1% del total de los aceites vegetales elaborados en el país [30].

A partir informes de la Cámara de la Industria Aceitera de la República Argentina (CIARA) [29] sobre el consumo anual de aceites vegetales en el período 2010-2016, se definió a los AVUs como una mezcla de 72,82% aceite de girasol y 27,13% de aceite soja. En la Tabla 1 se muestra la composición acídica de estos aceites [31].

**Tabla 1: Composición acídica porcentual de los aceites de soja y girasol.**

Ácido graso (%)	Aceite	
	soja	girasol
Ác. palmítico	7-11	3-6
Ác. esteárico	2-6	1-3
Ác. oleico	22-34	14-35
Ác. linoleico	43-56	44-75
Ác. linolenico	5-11	---
Ác. eicosanoico	---	0,6-4

En la Tabla 1 se observa que ambos aceites están constituidos principalmente por los ácidos grasos linoleico y oleico, con lo cual se infiere que los aceites están compuestos mayoritariamente por trilinoleína y trioleína, tal como fue propuesto por Aboelazayem, O., M. Gadalla [32]. En función de ello, la composición aproximada de los AVUs se definió constituida por trilinoleína y trioleína, en fracciones de 75% y 25% para el aceite de girasol y de 66% y 34% para el aceite de soja, respectivamente.

Para la síntesis de la planta de producción de biodiesel a partir de AVUs se especificó un

caudal másico de 680,7 kg AVUs/h [33]. Por otra parte, considerando que la acidez libre de los AVUs es superior al 0,5% [28] se requiere de una etapa de esterificación catalítica de los ácidos grasos libres previa a la transesterificación.

### Software

Aspen Plus™ es un software de simulación de procesos químicos mediante el cual puede realizarse la síntesis y análisis de procesos, la estimación de propiedades de compuestos, el análisis de sensibilidad de variables de proceso, entre otras tareas del diseño de procesos y equipos [1].

GAMS™ (General Algebraic Modeling System) es un sistema de modelado de alto nivel que está específicamente diseñado para resolver problemas de optimización para modelos de diferentes características (GAMS, 2019).

### Simulación

La simulación de procesos en estado estacionario juega un rol importante en la industria química, ya que constituye una potente herramienta para el diseño, caracterización, optimización y monitoreo de procesos industriales [2].

En la primera fase del desarrollo del modelo de simulación de la obtención de biodiesel, los AVUs se definieron como una mezcla de ácido oleico, trilinoleína y trioleína. El ácido oleico fue seleccionado como representativo de la fracción de ácidos grasos libres del aceite (AOCS Oficial Method Ca 5a -40). Se incluyeron además los componentes metanol con 99% de pureza (reactante) y el ácido sulfúrico con 98% de pureza (catalizador).

Al momento de seleccionar un paquete de propiedades para el modelo de simulación, se tuvo en cuenta que en el proceso de obtención de biodiesel se trabaja principalmente con compuestos polares no electrolíticos, a presión inferior a 10 bar (1000 kPa) y en presencia de interacción líquido-líquido. En función de estas características, y considerando el diagrama de decisión propuesto por Carlson, E.C. [34], los paquetes de propiedades adecuados para la simulación de la esterifi-

cación de AVUs en Aspen Plus™ resultaron ser UNIQUAC, NRTL y sus variantes. En este trabajo se optó por utilizar el paquete NRTL, ya que permitió obtener resultados favorables en trabajos de simulación de producción de biodiesel de otros autores como Zhang, Y., M.A. Dubé [28], Yun, H., M. Wang [35], Lee, S., D. Posarac [36], Yancy-Caballero, D.M. and R. Guirardello [37], Aboelazayem, O., M. Gadalla [32], Santos, T., J.F. Gomes [38]. Los parámetros de interacción binaria se estimaron con Aspen Plus™ utilizando los modelos de UNIFAC [32, 37-40].

### Optimización energética

El ahorro energético en un proceso se puede conseguir mediante una red de intercambio de calor (RIC), en la cual se recupera calor de las corrientes calientes que puede ser aprovechado por las corrientes frías, minimizando las necesidades energéticas de servicios auxiliares donde estas líneas se deben enfriar o calentar, respectivamente, reduciendo así los costos operativos de la instalación [18, 19].

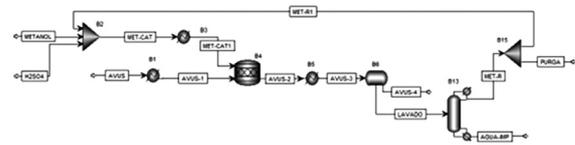
El Punto de Pliegue es una temperatura crítica en el diseño de RIC que divide a la red en dos zonas: por encima y por debajo del Punto de Pliegue. No se debe transferir calor a través del Punto de Pliegue, ni usar calentamiento debajo del Punto de Pliegue, ni usar enfriamiento por encima del Punto de Pliegue [19, 41]. Esta temperatura se determina mediante el Método Punto de Pliegue [42].

La optimización energética mediante RIC se puede realizar a partir de la generación de una superestructura, la cual consiste en una representación en etapas dentro de las cuales puede ocurrir intercambio de calor entre corrientes calientes y frías [43-45]. Para el caso bajo estudio, a partir de la superestructura se generó un modelo matemático basado en el trabajo de Inchaurregui-Méndez et al. (2015) [46], en el cual la función objetivo es no lineal y optimiza el requerimiento de servicios externos.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo correspondiente a la etapa de esterificación catalítica del proceso de obten-

ción de bioetanol a partir de AVUs simulado en Aspen Plus™ se muestra en la Figura 1.



**Figura 1:** Simulación de la etapa de esterificación del proceso de obtención de bioetanol 2G a partir de aceites vegetales usados (AVUs).

A partir de la simulación se obtuvieron los parámetros de las corrientes del proceso que fueron consideradas potencialmente convenientes para ser incorporadas en la integración de calor, las cuales se muestran en la Tabla 2.

Se consideró un  $\Delta T_{\text{mínimo}}$  de  $5^{\circ}\text{C}$ , y mediante el método Punto de Pliegue [42] se determinó que la temperatura Pinch para estas corrientes (Tabla 2) corresponde a  $197^{\circ}\text{C}$  para las corrientes frías y  $207^{\circ}\text{C}$  para las corrientes calientes. A partir de la temperatura de pliegue se pudo observar que la corriente C3 quedó totalmente por encima de éste, mientras todas las demás se ubicaron absolutamente por debajo del Punto de Pliegue. Esto permitió concluir que la corriente C3 no puede integrarse termodinámicamente con ninguna de las demás corrientes.

**Tabla 2:** Características de las corrientes con posibilidad de integración de calor.

Corriente*	TE ( $^{\circ}\text{C}$ )	TS ( $^{\circ}\text{C}$ )	Q (kJ/h)
C1	25	60	17069
C2	25	60	49060
C3	200	201	199626
H1	60	25	67441
H2	66	65	180136
H3	204	25	5364
H4	65	25	13948

\* C1: MET-CAT; C2: AVUS; H1: AVUS-2; H2: B13 (condensador); C3: B13 (rehervidor); H3: AGUA-IMP; H4: MET-R.

Sobre esta base, se planteó una superestructura con las corrientes C1, C2,

H1, H2, H3 y H4. Utilizando el software Aspen Energy Analyzer™ se determinaron las temperaturas de las corrientes de servicio. Para el servicio de enfriamiento el fluido empleado fue agua, a temperaturas de entrada y de salida de 15°C y 25°C respectivamente, mientras que para el servicio de calentamiento se utilizó vapor a temperaturas de entrada y salida de 249°C y 250°C, respectivamente.

El modelo matemático correspondiente a la superestructura [46] se resolvió utilizando el software GAMS para determinar la red de intercambio con el mínimo uso de servicio de refrigeración y calentamiento. Utilizando el Solver ALPHECP (aplicable a problemas generales de MINLP basado en el método de plano de corte extendido) se obtuvo la solución de la superestructura que se presenta en la Figura 2, donde es posible observar que se utiliza la corriente del tope de la torre de destilación (H2) para calentar las corrientes de ingreso al reactor (C1 y C2).

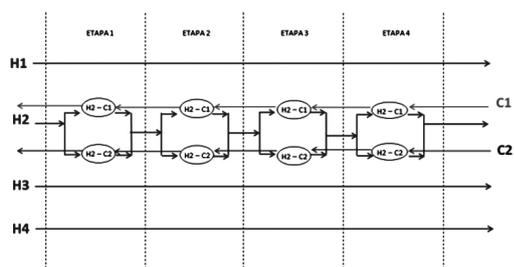


Figura 2: Superestructura resultante de la red de intercambio para la etapa de esterificación del proceso de obtención bioetanol 2G.

En la Figura 3 se presenta la red obtenida y los requerimientos de servicios externos, donde se observa que las corrientes C1 y C2 se intercambian totalmente con H2; las corrientes H1 y C3 requieren de servicio externo, mientras que las corrientes H3 y H4 son salidas del proceso (Figura 1) que no requieren de servicio de enfriamiento.

Con este arreglo se obtuvo una reducción en el servicio externo del 28%. Bajo estas condiciones se requiere un servicio de refrigeración de 181448 kJ/h y un servicio de calefacción de 199626 kJ/h.

Adicionalmente, se analizó la posibilidad de integrar la corriente C3 y el calor residual de la corriente H2, luego del intercambio con C1 y C2, en una bomba de calor o un ciclo

Rankine orgánico. Estas alternativas no fueron posibles en función de las temperaturas de la fuente y el sumidero de calor. Las bombas de calor se aplican a temperaturas no mayores a 40°C [20]. En el caso bajo análisis, la fuente está a 65°C. Por otra parte, cuando la temperatura de la fuente es inferior a 100°C la tecnología del ciclo Rankine orgánico no resulta económicamente apropiada [47].

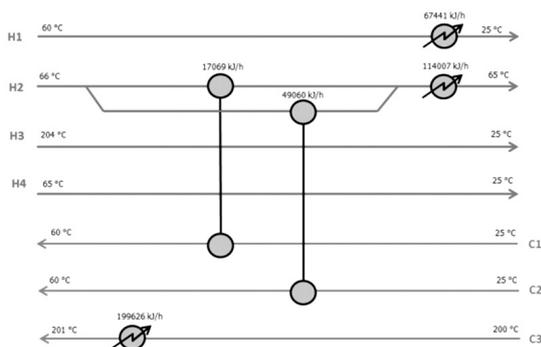


Figura 3: Red de intercambio de calor y necesidades de servicios externos para la etapa de esterificación del proceso de obtención bioetanol 2G.

## CONCLUSIONES

Se aplicaron herramientas de uso general para la simulación y optimización de procesos en ingeniería química para el caso de obtención de bioetanol 2G a partir de AVUs. Esta metodología permitió realizar la optimización energética de la etapa de esterificación del proceso minimizando el uso de servicios externos. Mediante el método de Punto de Pliegue y la resolución en GAMS del modelo de una superestructura se logró diseñar una RIC que reduce el 28% del uso de servicios externos, lo cual pone en evidencia la importancia del recurso de simulación y optimización aplicado. Para caso en estudio, la bomba de calor y el ORC no fueron aplicables debido a las características de la fuente de calor residual.

## REFERENCIAS

- [1] AspenTech Technology, Inc. (2018). <http://www.aspentech.com>
- [2] Martínez Sifuentes, V.H.; Alonso Davila, P.A.; Lopez Toledo, J.; Salado Carbajal, M.; Rocha Uribe, J.A. (2000). Simulación de procesos en Ingeniería Química: Plaza y Valdés.

- [3] Bhuiya, M.M.K.; Rasul, M.G.; Khan, M.M.K.; Ashwath, N.; Azad, A.K. (2016). Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel - Part: 1 selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 55, 1109-1128.
- [4] Hwang, J.; Bae, C.; Gupta, T. (2016). Application of waste cooking oil (WCO) biodiesel in a compression ignition engine. *Fuel*. 176, 20-31.
- [5] Nasir, N.F.; Daud, W.R.W.; Kamarudin, S.K.; Yaakob, Z. (2013). Process system engineering in biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 22, 631-639.
- [6] Demirbas, A. (2011). Competitive liquid biofuels from biomass. *Applied Energy*. 88(1), 17-28.
- [7] Al-Widyan, M.I.; Al-Shyoukh, A.O. (2002). Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel. *Bioresource Technology*. 85(3), 253-256.
- [8] Al-Widyan, M.I.; Tashtoush, G.; Abu-Qudais, M.D. (2002). Utilization of ethyl ester of waste vegetable oils as fuel in diesel engines. *Fuel Processing Technology*. 76(2), 91-103.
- [9] Çaylı, G.; Küsefoğlu, S. (2008). Increased yields in biodiesel production from used cooking oils by a two step process: Comparison with one step process by using TGA. *Fuel Processing Technology*, 89, 2,118-122.
- [10] Dorado, M.P.; Ballesteros, E.; Arnal, J.M.; Gómez, J.; López, F.J. (2003). Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil. *Fuel*. 82(11), 1311-1315.
- [11] EROSKY CONSUMER (2018). [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/urbano/2010/06/24/193915.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2010/06/24/193915.php)
- [12] Demirbas, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*. 50(1), 14-34.
- [13] Babazadeh, R.; Razmi, J.; Pishvae, M.S.; Rabbani, M. (2017). A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk. *Omega*. 66, 258-277.
- [14] Sahar; Sadaf, S.; Iqbal, J.; Ullah, I.; Bhatti, H.N.; Nouren, S.; Habib Ur, R.; Nisar, J.; Iqbal, M. (2018). Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. *Sustainable cities and society*.
- [15] Garrido, S.M. (2010). Tecnología, territorio y sociedad. Producción de biodiesel a partir de aceites usados. *Revista de Ciencias Sociales*. 75-86.
- [16] Bergedo, P.; Calzada, J.; Ramseyer, F. (2018) La visión del USDA sobre biodiesel y el bioetanol en Argentina. *Bolsa de Comercio de Rosario, XXXV (1847)*.
- [17] OPDS. (2018). Plan BIO. Biodiesel a partir de aceites vegetales usados.
- [18] Renedo Estébanez, C.; Fernández Díez, P. (2003). Tecnología pinch para el diseño de redes de intercambiadores (I). Principios, reglas básicas, suministros. *Ingeniería Química*. 402, 111-120.
- [19] Kemp, I.C. (2007). Pinch analysis and process integration: a user guide on process integration for the efficient use of energy: Butterworth-Heinemann, Elsevier.
- [20] Toro López, M.; Isaza, C.; Chejne Janna, F. (2012). Uso de las bombas de calor de alta temperatura como alternativa para el uso racional de energía en la industria. *Corporación Unicversitaria Lasallista Facultad de Ingenierías*, Colombia.
- [21] Cengel, Y.A.; Boles, M.A. (2012). *Termodinámica*. McGraw Hill, Mexico.
- [22] Lira-Barragán, L.F.; Ponce-Ortega, J.M.; Serna-González, M.; El-Halwagi, M.M. (2014). Optimal design of process energy systems integrating sustainable considerations. *Energy*. 76, 139-160.
- [23] Hipólito-Valencia, B.J.; Rubio-Castro, E.; Ponce-Ortega, J.M.; Serna-González, M.; Nápoles-Rivera, F.; El-Halwagi, M.M. (2014). Optimal design of inter-plant waste energy integration. *Applied Thermal Engineering*. 62(2), 633-652.
- [24] Vescovo, R.; Spagnoli, E. (2017). High temperature ORC systems. *Energy Procedia*. 129, 82-89.
- [25] Braimakis, K.; Karellas, S. (2018). Energetic optimization of regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) configurations. *Energy Conversion and Management*. 159, 353-370.

- [26] Tajik Mansouri, M.; Amidpour, M.; Ponce-Ortega, J.M. (2019). Optimal integration of organic Rankine cycle and desalination systems with industrial processes: Energy-water-environment nexus. *Applied Thermal Engineering*. 158, p.113740.
- [27] Chai, M.; Tu, Q.; Lu, M.; Yang, Y.J. (2014). Esterification pretreatment of free fatty acid in biodiesel production, from laboratory to industry. *Fuel Processing Technology*. 125,106-113.
- [28] Zhang, Y.; Dubé, M.A.; Mclean, D.D.; Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*. 89(1), 1-16.
- [29] CIARA (2017). Cámara de la Industria Aceitera de la República Argentina. <http://www.ciara.com.ar/>.
- [30] Made in Argentina. 24/04/2014.
- [31] CHEMPRO (2019). Chempro Technovation Pvt. Ltd. <http://www.chempro.in/fattyacid.htm>.
- [32] Aboelazayem, O.; Gadalla, M.; Saha, B. (2018). Design and simulation of an integrated process for biodiesel production from waste cooking oil using supercritical methanolysis. *Energy*. 161, 299-307.
- [33] Capdevila, V.; Orifici, L.; Gely, M.C.; Pagano, A. Biodiesel a partir de aceites vegetales usados (AVUs). *Proceedings of the Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CLICAP 2012)*. Argentina.
- [34] Carlson, E.C. (1996). Don't gamble with physical properties for simulations. *Chemical Engineering Progress*. 35-46.
- [35] Yun, H.; Wang, M.; Feng, W.; Tan, T. (2013). Process simulation and energy optimization of the enzyme-catalyzed biodiesel production. *Energy*. 54, 84-96.
- [36] Lee, S.; Posarac, D.; Ellis, N. (2011). Process simulation and economic analysis of biodiesel production processes using fresh and waste vegetable oil and supercritical methanol. *Chemical Engineering Research and Design*. 89 (12), 2626-2642.
- [37] Yancy-Caballero, D.M.; Guirardello, R. (2015). Modeling and parameters fitting of chemical and phase equilibria in reactive systems for biodiesel production. *Biomass and Bioenergy*. 81, 544-555.
- [38] Santos, T.; Gomes, J.F.; Puna, J. (2018). Liquid-liquid equilibrium for ternary system containing biodiesel, methanol and water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 6 (1), 984-990.
- [39] West, A.H.; Posarac, D.; Ellis, N. (2008). Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant. *Bioresource Technology*. 99(14), 6587-6601.
- [40] Granjo, J.F.O.; Duarte, B.P.M.; Oliveira, N.M.C. (2017). Integrated production of biodiesel in a soybean biorefinery: Modeling, simulation and economical assessment. *Energy*. 129, 273-291.
- [41] Jimenez Gutierrez, A. (2003). *Diseño de procesos en ingeniería química*. Editorial Reverte.
- [42] Laborde, M.F.; Orifici, L.I.; Manzur, A.M.; Pagano, A.M.; Gely, M.C. (2014). *Redes de Intercambio de Calor Aplicadas a la Esterificación de Aceites Vegetales Usados*. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 5(4), 31-44.
- [43] Serna González, M.; Ponce Ortega, J.M.; Jiménez Gutiérrez, A. (2003). Una estrategia MINLP para la síntesis de redes de intercambio de calor considerando las caídas de presión de las corrientes. *Tecnología, Ciencia, Educación*. 18(2), 45-56.
- [44] Yee, T.F.; Grossmann, I.E. (1990). Simultaneous optimization models for heat integration - II. Heat exchanger network synthesis. *Computers & Chemical Engineering*. 14(10),1165-1184.
- [45] Inchaurregui - Méndez, J.A.; Vázquez - Román, R.; Ponce - Ortega, J.M.; Mannan, M.S. (2015). A Heat Exchanger Networks Synthesis Approach Based on Inherent Safety. *Journal of Chemical Engineering Research Updates*. 2, 22-29.
- [46] Laborde, M.F.; Serna González, M.; Ponce Ortega, J.M.; Pagano, A.M.; Gely, M.C., Optimización energética aplicada al proceso de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales usados, Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Cs. Aplicadas (CLICAP 2018).
- [47] Wang, Z.Q.; Zhou, N.J.; Guo, J.; Wang, X.Y. (2012). Fluid selection and parametric optimization of organic Rankine cycle using low temperature waste heat. *Energy*. 40(1), 107-115.