

Extended Luenberger observer for a biodiesel production process with heterogeneous catalyst

Ana Paloma González García, Lourdes Díaz Jiménez, Padamsree K. Padmadas, Salvador Carlos Hernandez

**Cinvestav Saltillo, SRNyE, Ramos Arizpe, Coah 25900*

Mexico (Tel: 52-844-4389600; e-mail: paloma.gonzalez@cinvestav.edu.mx, lourdes.diaz@cinvestav.edu.mx, padmasree@cinvestav.edu.mx, salvador.carlos@cinvestav.edu.mx).

Abstract: The biodiesel production process requires low-cost and real-time monitoring. In this document, an extended Luenberger observer was designed to provide on-line estimation of the concentration of triglycerides, methanol, biodiesel, and glycerol. To this end, a mathematical model based on energy and mass balance equations as well as the global transesterification reaction in a batch reactor was considered. The model consists of two nonlinear differential equations, one output equation, and four complementary equations. The simplification of the model was used through a linearization procedure, considering two state variables (reaction rate and temperature) and one output variable (temperature). This procedure allowed to use estimation strategies typical of linear systems. The LQR method was used to calculate the gain observer. A fast convergence (compared to the total reaction time) of the observer was obtained despite varying the initial conditions up to 30%. Thus, it was concluded that the extended Luenberger observer, using temperature as the only output, allows estimating the conversion of triglycerides to biodiesel.

Keywords: State estimation, linearization, supervision, transesterification, biodiesel.

1. INTRODUCCIÓN

El biodiésel es un hidrocarburo renovable obtenido a partir de aceites de origen animal o vegetal; se compone por una mezcla de ésteres monoalquílicos, los cuales dependen de los ácidos grasos presentes en la materia prima. Debido a que tiene propiedades fisicoquímicas similares, el biodiésel se utiliza como sustituto total o parcial del diésel fósil en motores de encendido por compresión. La principal ventaja ambiental del biodiésel es que durante su combustión emite menos CO, THC y PM que su contraparte fósil y, aunque emite mayor cantidad de CO₂, éste se consideran carbono neutral (porque proviene de biomasa) por lo que no contribuye al aumento neto del CO₂ atmosférico (Suresh et al., 2018). Sin embargo, tiene propiedades físicas poco favorables como mayor viscosidad y densidad, que derivan en mayores emisiones de NO_x y mayor consumo específico de combustible (Tamiselman et al., 2017; US, 2019).

Existen diferentes rutas para producir biodiésel, tales como pirólisis, microemulsión, craqueo catalítico y transesterificación (Verma et al., 2016; Baskar y Aiswarya, 2016), siendo esta última el método más utilizado a nivel industrial (Shan et al., 2018; Mahmudul et al., 2017; Reyero et al., 2015). A nivel operativo, la separación del catalizador del producto final es un paso que representa costos adicionales debido a que ambos componentes se encuentran en la misma fase líquida; además, la separación genera aguas residuales que deben ser tratadas antes de disponerse (Shan

et al., 2018; Tabatabaei et al., 2019). Una de las alternativas para solventar esta situación es el uso de catalizadores heterogéneos, los cuales se encuentran en estado sólido, por lo que la separación del biodiésel es más fácil y no se produce agua residual (Avhad y Marchetti, 2016; Tabatabaei et al., 2019). Sin embargo, la principal desventaja de la transesterificación heterogénea es la disminución de la tasa de producción de biodiésel. Esto se asocia con las resistencias de transferencia de masa, al tratarse de un sistema de reacción trifásico (líquido-líquido-sólido) (Shan et al., 2018; Muthukumaran et al., 2018). Para reducir estos inconvenientes, en general, se requieren condiciones de reacción severas para alcanzar un rendimiento semejante al proceso catalizado homogéneamente (Avhad y Marchetti, 2016).

En este sentido, es necesario que la información relevante de cada una de las etapas esté disponible en tiempo real, con el propósito de evitar problemas de operación, asegurar la calidad del producto y detectar fallas (Aguilar-Garnica et al., 2014; Aguilar-Garnica et al., 2016). El reactor, donde se lleva a cabo la transesterificación, es el dispositivo central del proceso; por lo tanto, su supervisión y control es de suma importancia (Ho et al., 2010). La variación en las condiciones de operación en el reactor (temperatura, tiempo de reacción, relación molar aceite/alcohol y cantidad de catalizador) afecta el rendimiento y calidad de los productos (Suresh et al., 2018). Todos estos parámetros deben ser

supervisados a lo largo del proceso para asegurar que el biodiésel cumple con los estándares internacionales.

Para evaluar la calidad del biodiésel de acuerdo con las normativas, se han desarrollado procedimientos analíticos que hacen uso de diversas técnicas como: cromatografía de gases (CG), cromatografía de líquidos, resonancia magnética nuclear y espectroscopía infrarroja (López-Zapata et al., 2017; Talavera-Prieto et al., 2020). Estos métodos requieren que se tomen y preparen muestras para ser analizadas posteriormente fuera de línea, lo que ocasiona que la supervisión de la transesterificación no se realice en tiempo real. Además, la implementación industrial de estas técnicas requiere de equipos costosos y personal calificado para interpretar los resultados, lo cual no es adecuado para el monitoreo en línea del proceso (Talavera-Prieto et al., 2020).

Por otro lado, se han desarrollado sensores específicos para medir la concentración de biodiésel en línea. Estos sensores miden propiedades físicas como viscosidad, índice de refracción, densidad y velocidad del sonido, las cuales varían significativamente para los compuestos de la mezcla de reacción de transesterificación (TG, M, E y G). Estas propiedades cambian durante la reacción de transesterificación en función de la concentración de estas especies, lo cual permite monitorear la reacción (Talavera-Prieto et al., 2020). Sin embargo, al tratarse de sensores especializados su aplicación se ve limitada debido a su alto costo y difícil mantenimiento. Además, pueden introducir retardos en los lazos de control (Oisiovi y Cruz, 2000). Una de las alternativas para realizar la supervisión en tiempo real y a costos accesibles es aplicar estrategias de estimación de estados. El propósito de estas técnicas es proporcionar una estimación en línea de las variables cuya medición se ve limitada por diversas circunstancias, a partir de mediciones fácilmente disponibles como temperatura o pH (Aguilar-Garnica et al., 2016; López-Zapata et al., 2017).

En esta investigación se desarrolló un observador como un primer paso en el diseño de una estrategia para supervisar la dinámica de la transesterificación heterogénea de aceite soya para la producción de biodiésel. Para ello, a partir de los balances de materia y energía se planteó un sistema linealizado que representa el proceso real de la transesterificación heterogénea de aceite de soya. El observador de estados se planteó a partir del sistema linealizado. Se consideraron como variables de estados la concentración de triglicéridos y la temperatura en el reactor; como salida medida se consideró la temperatura de la reacción. La ganancia del observador se calculó utilizando el método LQR. A partir de la estimación de las variables de estado, se reproduce la evolución de las otras variables involucradas en la reacción: metanol, ésteres y glicerol. Finalmente, el desempeño del observador se evaluó variando las condiciones iniciales de hasta 30 %.

2. OBSERVADORES PARA TRANSESTERIFICACIÓN

En los procesos químicos como fermentación, polimerización, cristalización e intercambio de calor se han aplicado diversos tipos de observadores. Los que más destacan son: observadores basados en el método de Luenberger, observadores de sistemas de dimensiones finitas, estimadores bayesianos, observadores de detección de perturbaciones y fallas, observadores basados en inteligencia artificial y observadores híbridos (Mohd Ali et al., 2015). En el caso particular del proceso de producción de biodiésel, se han implementado observadores de tipo Filtro de Kalman Extendido (Aguilar-Garnica et al., 2016; López-Zapata et al., 2017), difuso (Aguilar-Garnica et al., 2016), difuso funcional (López-Zapata et al., 2018), entre otros. Sin embargo, sólo se han utilizado en sistemas con reacciones homogéneas.

Estos tipos de observadores presentan diversas ventajas y desventajas. Por ejemplo, el Filtro de Kalman Extendido se utiliza para obtener resultados de estimación rápidos basados en la teoría de probabilidad; no obstante, su implementación en línea puede ocasionar una excesiva carga computacional debido a que el método es complejo. Por otro lado, los observadores basados en inteligencia artificial (Difuso y Takagi-Sugeno) son adecuados para sistemas altamente no lineales con modelos incompletos o desconocidos, permiten además formalizar e incorporar el conocimiento empírico de los operadores; sin embargo, su implementación en línea puede ser difícil y llevar tiempo, ya que primero deben de adaptarse al sistema (Mohd Ali et al., 2015).

Con base en lo anterior, los observadores mencionados no son adecuados para una aplicación práctica en el sector industrial porque requieren un conocimiento profundo de herramientas que no están necesariamente al alcance de un ingeniero estándar. En este contexto, utilizar el observador de Luenberger extendido surge como una opción para estimar los parámetros cruciales en la transesterificación heterogénea de aceite de soya haciendo uso de métodos computacionales simples.

3. MODELO DE LA REACCIÓN Y DISEÑO DEL OBSERVADOR

3.1 Modelo de la reacción de transesterificación heterogénea

La reacción de transesterificación es parte esencial del proceso de producción de biodiésel (Aguilar-Garnica et al., 2014). La reacción global se presenta en la siguiente ecuación (1):



donde TG son triglicéridos, M es metanol, E son ésteres metílicos (biodiesel) y G es glicerol. Esta reacción es un proceso que consiste en tres reacciones reversibles consecutivas simultáneas, donde se generan diglicéridos (DG) y monoglicéridos (MG) como intermediarios

(Ecuaciones 2-4). Los productos finales son ésteres alquílicos (E), generados en cada una de las reacciones, y glicerol (G) (Muthukumaran et al., 2018; Trejo-Zárraga et al., 2018).



La cinética de transesterificación de TG ha sido estudiada para mejorar el diseño de reactores, predecir el alcance de la reacción bajo condiciones particulares y optimizar el proceso de producción de biodiésel (Feyzi y Shahbazi, 2017). Las ecuaciones de velocidad de reacción se han planteado en función del tipo de catalizador. Generalmente, se describen cinéticas de primer y segundo orden cuando se utilizan catalizadores homogéneos (Muthukumaran et al., 2018). Por otro lado, para los catalizadores heterogéneos se consideran modelos cinéticos que involucran mecanismos de reacción, los cuales describen la interacción entre las tres fases presentes en el sistema (Trejo-Zárraga et al., 2018). Así, el modelo utilizado en este trabajo considera el balance de masa y de energía en el reactor de transesterificación (Dawhane et al., 2019); se compone por un sistema de dos ecuaciones diferenciales (5) y uno de cuatro ecuaciones algebraicas (6). Los sistemas de ecuaciones se resuelven de manera independiente y, en general, no representan una complejidad computacional mayor:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= -\frac{1}{C_{TG0}} r_{TG} \\ \frac{dT}{dt} &= -\frac{J}{C_{TG0}} r_{TG} + Q \end{aligned} \quad (5)$$

donde α es la conversión de TG, C_{TG0} es la concentración inicial de TG y r_{TG} es la velocidad de la reacción; en este sentido, a partir de un estudio comparativo, se eligió el mecanismo Eley-Rideal Adsorción,

$$r_{TG} = \frac{k_1 \left(C_M^3 - \frac{k_2 C_E^3 C_G}{C_{TG}} \right)}{\left(1 + k_3 C_E \sqrt{\frac{C_G}{C_{TG}}} + k_4 C_G \right)^3}, \text{ para representar dicha}$$

velocidad de reacción. Los términos J y Q se definen como

$$J = \frac{-\Delta H_R}{\sum_{i=1}^n \theta_i C_{pi}} + Q \quad y$$

$$Q = \frac{Q_A}{N_{0k} \sum_{i=1}^n \theta_i C_{pi}} = \frac{UA(T_A - T)}{N_{0k} \sum_{i=1}^n \theta_i C_{pi}}, \text{ respectivamente.}$$

Además, ΔH_R es la entalpía de reacción, θ_i la relación molar respecto al reactivo limitante y C_{pi} el calor específico del componente i; U es el coeficiente global de transferencia de calor, A el área del reactor, T_A la temperatura ambiente, T es la temperatura de reactor y N_{0k} es el número de moles iniciales del reactivo limitante.

Las ecuaciones algebraicas se obtienen a partir de las reacciones (2-4) y representan la concentración de triglicéridos (C_{TG}), metanol (C_M), ésteres (C_E) y glicerol (C_G).

$$\begin{aligned} C_{TG} &= C_{0TG} (1 - C_{TG}) \\ C_M &= C_{M0} - 3C_{TG} \\ C_E &= 3C_{TG} C_{0TG} \\ C_G &= C_{TG} C_{0TG} \end{aligned} \quad (6)$$

Detalles del modelo matemático, incluidos los valores numéricos de los parámetros, pueden consultarse en González García et al., 2022).

3.2 Desarrollo del observador

El primer paso para el diseño del observador es la linealización del modelo (5) alrededor del punto de operación; para esto, se define el vector de estados como $x = [x_1, x_2] = [\alpha, T]$, y el punto de operación considerado es $x_0 = [0.98, 333]$, el cual corresponde con el equilibrio químico de la reacción. De esta manera, se obtiene el siguiente sistema lineal (se utilizan símbolos en mayúsculas para referir que se trata de estados linealizados):

$$\dot{X} = AX = \begin{bmatrix} -1.3 & 0.008 \\ -128.7 & -20.9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Puesto que la temperatura puede medirse en línea, esta variable se considera la salida del sistema; su representación matemática se presenta a continuación:

$$Y = CX = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

El segundo paso consiste en la prueba de observabilidad, la cual indica que la matriz de observabilidad es de rango pleno; por lo cual, es posible estimar los estados del sistema.

Luego se plantea el observador; para este caso, se considera un observador de Luenberger extendido (9):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}} &= [A - LC] \hat{X} + Ly \\ Y &= C \hat{X} \end{aligned} \quad (9)$$

Después se procede a calcular el vector de ganancias L. Se consideró la asignación de polos y el método LQR. Se eligió el método de LQR, debido a que provee un vector L óptimo. Cabe recordar que con el método LQR es posible calcular el vector de ganancias óptimo K, el cual permite que la retroalimentación $u = -Kx$ minimice el criterio de desempeño

$J(u) = \int_0^\infty x' Q x + u' R u$. Aprovechando la propiedad de dualidad del par Controlabilidad-Observabilidad, es posible obtener el vector L óptimo para el observador. Se utilizó el comando `lqr()` de Matlab, considerando a matrices diagonales Q y R con diferentes ponderaciones:

$$L=lqr(A', C', Q, R).$$

Finalmente, se evalúa el desempeño del observador efectuando variaciones en las condiciones iniciales y considerando los indicadores IAE (Integral del valor absoluto del error), IAET (Integral del valor absoluto del error ponderado con el tiempo) e ICE (Integral del cuadrado del error), definidos por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} IAE &= \int_0^{\infty} |e(t)| dt \\ IAET &= \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \\ ICE &= \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \end{aligned} \quad (10)$$

4. RESULTADOS

Para el cálculo de la ganancia del observador se tomó como punto de partida las ponderaciones de las matrices Q y R como $w_1=1$ y $w_2=1$ respectivamente; ambas tienen el mismo peso. Luego se mantuvieron constante la ponderación de Q ($w_1=1$) y se varían los valores de w_2 , y viceversa. Posteriormente se calcula el vector de ganancia y se realizan múltiples pruebas para determinar el desempeño del observador (IAET). Cabe señalar que la solución de las ecuaciones se realizó considerando el método ode45 en Matlab.

En la Figura 1 se presenta el resultado de las simulaciones al utilizar diferentes ponderaciones de las matrices Q y R.

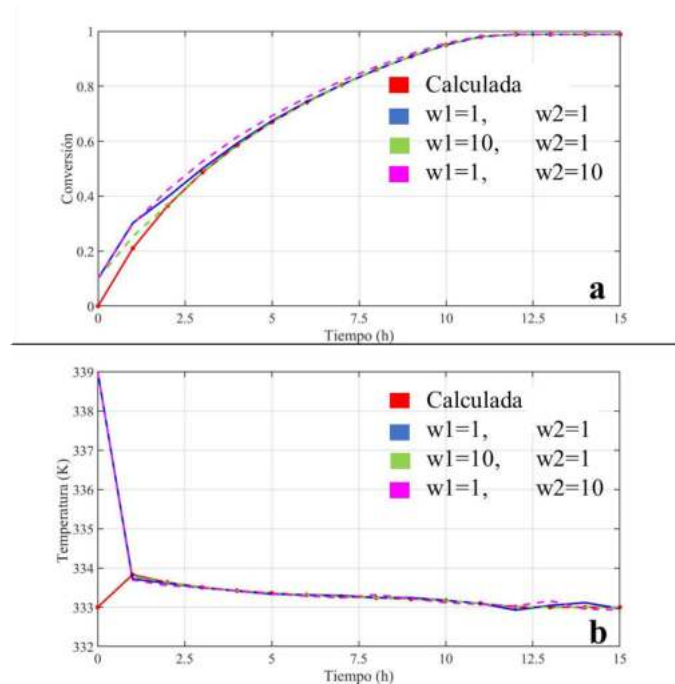


Fig. 1. Estimación de conversión de TG y temperatura en el reactor de transesterificación.

La estimación del observador se compara con lo obtenido con el sistema no lineal. Se observa que el observador consigue efectuar una estimación correcta de ambos estados en cada caso; sin embargo, se aprecian algunas diferencias importantes en función de la ponderación. Cuando se utilizan las ponderaciones $w_1=10$ y $w_2=1$, el observador converge rápidamente tanto en la conversión de triglicéridos (2 h) como en la temperatura (1 h). Mientras que las ponderaciones $w_1=1$ y $w_2=1$ y $w_1=1$ y $w_2=10$ solo dan una respuesta aceptable para la estimación de la temperatura.

Para elucidar el mejor desempeño, se evalúa el error de estimación mediante el criterio IAET. En la tabla 1 se muestran los resultados correspondientes. Se observa que conforme aumenta la ponderación de Q el error entre los estados calculados y los estados estimados disminuye. Por lo tanto, se eligieron los valores $w_1=10$ y $w_2=1$ como ponderación para las matrices Q y R.

Posteriormente, el observador se evaluó considerando diferentes condiciones iniciales, con variaciones entre el 5 y 30 % en ambos estados. Se utilizaron tres indicadores (IAE, IAET y ICE) para determinar el desempeño del observador.

Tabla 1. Desempeño del observador en función de la ponderación de matrices Q y R

Ponderación de Q (w_1) y R (w_2)	Desempeño del observador (indicador IAET)	
	TG	T
$w_1=1, w_2=1000$	1.5861	12.3256
$w_1=1, w_2=100$	1.5193	9.5437
$w_1=1, w_2=10$	1.0216	2.2526
$w_1=1, w_2=1$	0.2755	0.8675
$w_1=1, w_2=0.1$	0.0697	0.2759
$w_1=0.1, w_2=1$	1.0216	2.2526
$w_1=10, w_2=1$	0.0638	0.1958

Los resultados de las simulaciones correspondientes se resumen en la Tabla 2. De acuerdo con estos valores, el observador realiza una estimación correcta de las variables en este rango de variación.

Considerando lo anterior, se presenta en la Figura 2 el comportamiento del observador LQR. Se toman como condiciones iniciales del observador valores 10 % mayores a las condiciones reales del proceso. Se presenta la evolución de cada uno de los componentes de la mezcla de reacción. El observador rápidamente converge y es posible tener las estimaciones de cada uno componentes después de 2 h. Por otro lado, las estimaciones de E y TG, que son típicamente las variables más importantes en el proceso de transesterificación, convergen después de 2 h y 1.5 h,

respectivamente. De este modo es posible conocer su evolución en tiempo real sin necesidad de análisis fuera de línea.

Tabla 2. Desempeño del observador en función de la variación en las condiciones iniciales

TG ₀ , T ₀	Índice	TG	T
(0.05, 330)	IAE	0.0485	1.5809
	IAET	0.05	0.4934
	ICE	0.0015	4.5012
(0.05, 336)	IAE	0.0957	1.6304
	IAET	0.1328	0.587
	ICE	0.0033	4.5035
(0.1, 327)	IAE	0.0946	3.0991
	IAET	0.0855	0.4556
	ICE	0.0058	18.0017
(0.1, 339)	IAE	0.2029	3.2331
	IAET	0.2755	0.8675
	ICE	0.0147	18.0137
(0.2, 321)	IAE	0.1812	6.1589
	IAET	0.1455	0.6968
	ICE	0.0229	72.0054
(0.2, 345)	IAE	0.4635	6.3696
	IAET	0.6649	0.8015
	ICE	0.0729	72.0547
(0.3, 315)	IAE	0.2651	9.17
	IAET	0.2071	0.51
	ICE	0.0507	162
(0.3, 351)	IAE	0.7935	9.55
	IAET	1.2307	1.14
	ICE	0.2014	162

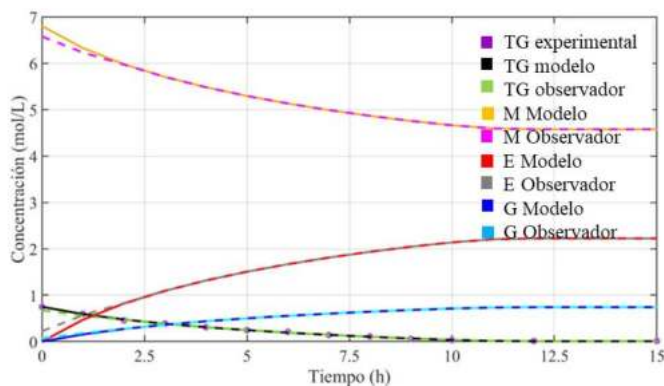


Fig. 2. Estimación de las variables involucradas en la reacción de transesterificación.

Si bien los observadores de estados ya se han utilizado como una estrategia para estimar los componentes presentes en la transesterificación de aceites para la producción de biodiesel

(Aguilar-Garnica et al., 2016; López-Zapata et al., 2017), hasta este momento no se encontraron reportes de la observación de la transesterificación heterogénea para la producción de biodiésel. Por lo que estos resultados pueden servir de guía para futuras investigaciones.

Dentro de las ventajas de la metodología utilizada se encuentra que relacionar los datos experimentales con los modelos cinéticos ya establecidos facilita la deducción de modelo que representa adecuadamente el proceso bajo estudio. Además, si se realizan las simplificaciones apropiadas al modelo, este aún puede respetar adecuadamente el proceso, lo que facilita la aplicación práctica del modelo en los algoritmos computacionales. También, utilizar un observador de Luenberger extendido para estimar la concentración de TG, M, E y G a lo largo de la reacción de transesterificación es una estrategia fácil de implementar. Además, su aplicación ofrece balance entre la precisión de la técnica y la viabilidad computacional.

Sin embargo, dentro de las principales desventajas de este tipo de observador se puede mencionar el hecho de que se requiere del conocimiento profundo de las características del proceso y de los materiales utilizados. Asimismo, debido a que para determinar las ganancias del observador Luenberger se emplean las Jacobianas del modelo específico que describe el proceso, esta dependencia provoca que exista cierta divergencia si se simulan cambios en los parámetros del modelo.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos se admite que el proceso de la transesterificación de aceite de soya empleando un catalizador heterogéneo puede supervisarse mediante un observador de Luenberger extendido. Las mediciones de TG a diferentes temperaturas son suficientes para conocer la dinámica de la transesterificación heterogénea y para estimar la concentración de triglicéridos, metanol, biodiésel y glicerol. No obstante, es necesario complementar la investigación con la validación del comportamiento de la temperatura del reactor de mediante mediciones reales. Además, las investigaciones futuras podrían integrar otras variables, como el pH, que también puedan medirse fácilmente con sensores robustos y de bajo costo.

5. CONCLUSIONES

Debido a los retos que presenta la supervisión continua del proceso de producción de biodiésel, se consideran las estrategias de estimación como una alternativa para realizar esta tarea. El propósito de esta investigación fue desarrollar una estrategia de supervisión de la transesterificación de aceite de soya con catalizador heterogéneo para determinar la dinámica de la reacción mediante el observador de Luenberger extendido. Con base en los resultados obtenidos, se puede extraer las siguientes conclusiones.

El observador de Luenberger extendido es adecuado para estimar la evolución de la conversión de TG a biodiésel (E) y

la temperatura del reactor, aun variando las condiciones iniciales hasta un 30 %. Esto ofrece una alternativa a los análisis fuera de línea como el análisis por CG.

La dinámica del proceso de transesterificación heterogénea pudo ser determinada mediante mediciones de temperatura; sin embargo, se requiere del conocimiento profundo de las características del proceso y de los materiales utilizados, lo cual puede considerarse como una limitante o desventaja de aplicar una estrategia de estimación de estados como el observador de Luenberger extendido.

REFERENCES

- Aguilar-Garnica E., F. Rodríguez-Palomera, J.P. García-Sandoval, F.M.E. Escalante. Dynamical modeling for biodiesel production from grease trap wastes. *Chem. Eng. Sci.* 117 (2014) 396-406
- Aguilar-Garnica E., J. García-Sandoval, D. Dochain. Monitoring of a biodiesel production process via reset observer. *J. Process Contr.* 42 (2016) 104-113
- Avhad M.R., J.M. Marchetti. Innovation in solid heterogeneous catalysis for the generation of economically viable and ecofriendly biodiesel: A review. *Cataly. Rev.* 58 (2016) 157-208
- Baskar G., R. Aiswarya. Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 57 (2016) 496-504
- Feyzi M., Z. Shahbazi. Preparation, kinetic and thermodynamic studies of Al-Sr nanocatalysts for biodiesel production. *J. Taiwan Inst. Chem. E.* 71 (2017) 145-155
- Gebremariam S.N., J.M. Marchetti. Economics of biodiesel production: Review. *Energy Convers. Manage.* 168 (2018) 74-84
- González García A.P., Figueroa Díaz A.B., Carlos Hernandez S., Padmadas P.K., Díaz Jiménez, L. Guishe biochar as heterogeneous catalyst for biodiesel production: synthesis and transesterification modeling. *Reac Kinet Mech Cat.* (2019) 1-19.
- Ho Y.K., F.S. Mjalli, H.K. Yeoh. Multivariable Adaptive Predictive Model Based Control of a Biodiesel Transesterification Reactor. *J. Appl. Sci.* 10 (2010) 1019-1027
- López Zapata B.Y., M. Adam Medina, P. Álvarez Gutiérrez, H. Hernández de León, C. García Beltrán, R. Meza Gordillo. Different approaches for the dynamic model for the production of biodiesel. *Chem. Eng. Res. Des.* 132 (2018) 536-550
- López-Zapata B.Y., M. Adam-Medina, P.E. Álvarez-Gutiérrez, J.P. Castillo-González, H.R.H.-d. León, L.G. Vela-Valdés. Virtual Sensors for Biodiesel Production in a Batch Reactor. *Sustainability.* 9 (2017)
- Mahmudul H.M., F.Y. Hagos, R. Mamat, A.A. Adam, W.F.W. Ishak, R. Alenezi. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 72 (2017) 497-509
- Mohd Ali J., N. Ha Hoang, M.A. Hussain, D. Dochain. Review and classification of recent observers applied in chemical process systems. *Computers & Chemical Engineering.* 76 (2015) 27-41
- Muthukumaran C., G. Sharmila, N. Manojkumar, A. Gnanaprakasam, V.M. Sivakumar. in: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Optimization and Kinetic Modeling of Biodiesel Production*, Elsevier, 2018
- Oisiovi R.M., S.L. Cruz. State estimation of batch distillation columns using an extended Kalman filter. *Chem. Eng. Sci.* 55 (2000) 4667-4680
- Reyero I., G. Arzamendi, S. Zabala, L.M. Gandía. Kinetics of the NaOH-catalyzed transesterification of sunflower oil with ethanol to produce biodiesel. *Fuel Process. Technol.* 129 (2015) 147-155.
- Shan R., L. Lu, Y. Shi, H. Yuan, J. Shi. Catalysts from renewable resources for biodiesel production. *Energy Convers. Manage.* 178 (2018) 277-289
- Suresh M., C.P. Jawahar, A. Richard. A review on biodiesel production, combustion, performance, and emission characteristics of non-edible oils in variable compression ratio diesel engine using biodiesel and its blends. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 92 (2018) 38-49
- Tabatabaei M., M. Aghbashlo, M. Dehghani, H.K.S. Panahi, A. Mollahosseini, M. Hosseini, M.M. Soufiyan. Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review. *Prog. Energy Combust. Sci.* 74 (2019) 239-303
- Talavera-Prieto N.M.C., A.G.M. Ferreira, R.J. Moreira, A.T.G. Portugal. Monitoring of the transesterification reaction by continuous off-line density measurements. *Fuel.* 264 (2020) 116877
- Tamilselvan P., N. Nallusamy, S. Rajkumar. A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 79 (2017) 1134-1159
- Trejo-Zárraga F., F.d.J. Hernández-Loyo, J.C. Chavarria-Hernández, R. Sotelo-Boyás. in: *Biofuels - State of Development*, K. Biernat (eds), Kinetics of Transesterification Processes for Biodiesel Production, IntechOpen, London, 2018, pp. 149-179
- U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy. *Clean Cities.* (2019). *Alternative Fuel Price Report.*
- Verma P., M.P. Sharma. Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 62 (2016) 1063-1071.