

Determinación experimental del coeficiente total de transferencia de calor en la transesterificación de aceite usado de fritura

Marlín García-Díaz, Yunaisys Cruz-García, José Gandón-Hernández, Guido Riera-González
Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana
José Antonio Echeverría, CUJAE.
mgarcia@quimica.cujae.edu.cu, gandon@quimica.cujae.edu.cu, guido@quimica.cujae.edu.cu

RESUMEN

La transesterificación de aceite de soya residual de los procesos de frituras, se lleva a cabo en un reactor. En este, la transferencia de calor es determinante para que ocurra la reacción y obtener buenos rendimientos. Para el calentamiento efectivo de los reaccionantes es preciso el diseño adecuado del equipo, en el que el valor del coeficiente total de transferencia de calor es importante. Para producir biocombustibles, se pueden emplear tanques enchaquetados con agitación mecánica, ya que su limpieza resulta más fácil. El principal inconveniente es la estimación del coeficiente individual del fluido que va por la chaqueta. El presente trabajo tuvo como objetivo la determinación experimental del coeficiente total de transferencia de calor en un reactor de laboratorio, para ser empleado en el escalado del proceso. El tiempo de calentamiento requerido fue de 7 minutos. El coeficiente total promedio resultó ser $255.02 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ con una desviación estándar de 5.55, válido para un intervalo de Reynolds de $8 \cdot 10^2$ a $2 \cdot 10^3$. Este coeficiente se empleó para dimensionar un reactor de 5 L, en el que se reprodujeron los resultados de la escala anterior.

Palabras clave: coeficiente total de transferencia de calor, tanque enchaquetado, transesterificación.

ABSTRACT

The transesterification of residual soybean oil from frying processes is carried out in a reactor. In it, heat transfer is decisive for the occurrence of the reaction and obtaining good yields. For the effective heating of the reactants, the adequate design of the equipment is necessary, in which the value of the overall heat transfer coefficient is important. For the production of biofuels, jacketed tanks with mechanical agitation can be used, since cleaning them is easier. The main drawback is the determination of the individual coefficient of the fluid that goes through the jacket. The objective of this work was the experimental determination of the overall heat transfer coefficient in a laboratory reactor, to be used in the process scaling. It was determined, that the required heating time is 7 minutes. The average overall coefficient turned out to be $255.02 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ with a standard deviation of 5.55, valid for a Reynolds interval of $8 \cdot 10^2$ to $2 \cdot 10^3$. This coefficient was used to size a 5 L, in which the results of the previous scale-up were reproduced.

Key words: overall heat transfer coefficient, jacketed tank, transesterification.

INTRODUCCIÓN

La obtención de biocombustible, a partir de aceite vegetal usado es una idea muy difundida en el mundo. En Cuba, igualmente se investiga en este tema (1 - 4), por las ventajas sociales y medioambientales que representa. Esta conversión ocurre mediante una reacción de transesterificación, que es la etapa definitoria en el proceso de producción del biocombustible (5).

Para que ocurra este proceso es necesario garantizar condiciones operacionales adecuadas, tales como: velocidad de agitación, temperatura y tiempo de reacción (6). La temperatura, una de las variables fundamentales, puede variar entre 40 y 70 °C (1, 6-8), en función del país o del alcohol empleado.

La transformación química depende de la energía o, lo que es lo mismo, de la transferencia de calor, por lo que la velocidad de la reacción está en función de la temperatura, entre otros parámetros. Este aspecto se favorece, en mayor o menor grado, con la velocidad promedio que alcanzan las partículas en un sistema químico.

Si se requiere alcanzar el resultado cinético deseado y un buen diseño del reactor, es necesario conocer el coeficiente total de transferencia de calor. Muchos investigadores han trabajado en este tema (9-11), para lograr diferentes condiciones operacionales y características constructivas.

Al inicio de esta investigación, para facilitar la transferencia de calor y obtener los resultados deseados en la producción de biocombustibles a diferentes escalas, se empleó un reactor con serpentín sumergido.

Debido a las características que presenta el aceite residual de los procesos de frituras, el uso de reactores enchaquetados es más recomendable ya que, a pesar de ser menos eficientes, son más fáciles de limpiar.

En el laboratorio se contaba con un reactor enchaquetado de un litro de capacidad que fue necesario evaluarlo térmicamente. Para esto se requería conocer los coeficientes individuales de transferencia de calor de los fluidos que intercambian o el coeficiente total de transferencia de calor del equipo.

La determinación confiable de estas variables, en equipos enchaquetados y con agitación mecánica, no siempre es posible, debido al número de consideraciones requeridas para aplicar las expresiones de cálculo. Otra dificultad presente en estos casos, es que no se dispone de expresiones confiables para determinar el coeficiente individual del fluido que circula por la chaqueta (en este caso agua). Esto limita la determinación del coeficiente total mediante la estimación de los coeficientes individuales, por lo que resulta más conveniente utilizar expresiones deducidas a partir del balance diferencial de calor en estado no estacionario, que se complementan con datos y resultados experimentales.

El objetivo del presente trabajo fue determinar, experimentalmente, el coeficiente total de transferencia de calor en un reactor enchaquetado, con agitación mecánica empleado en la transesterificación de aceite vegetal usado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se empleó, como materia prima fundamental, aceite de soya residual del proceso de fritura. La experimentación se realiza en un reactor de laboratorio enchaquetado como el que se muestra en la figura 1, de 1 L de capacidad y de acero inoxidable. El fluido que se empleó como medio de calentamiento es el agua.

La obtención del biocombustible se realizó con los mejores valores obtenidos en estudios anteriores (1, 12): velocidad de agitación de 375 min⁻¹ y temperatura de la mezcla reaccionante de 45 °C. El impelente utilizado fue de dos paletas planas.

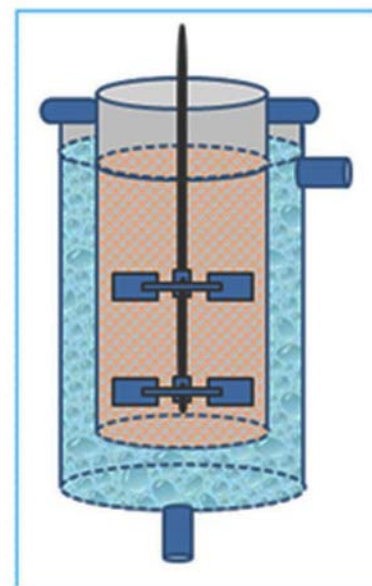


Figura 1. Esquema del reactor enchaquetado.

Para determinar el coeficiente total de transferencia de calor del equipo se emplean las ecuaciones (1) y (2) recomendadas para tanques enchaquetados con medio calefactor no isotérmico (13).

$$\ln\left(\frac{T_1-t_1}{T_1-t_2}\right) = \frac{W.C_W}{M.C_M} \cdot \left(\frac{K_1-1}{K_1}\right) \cdot \theta \quad (\text{Ec.1})$$

De la ecuación (1) se despeja K_1 y, según la ecuación (2), se puede obtener el valor de U .

$$K_1 = e^{\left(\frac{U.A}{W.C_W}\right)} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

T_1 : temperatura inicial del agua (°C)

t_1 : temperatura inicial de la mezcla reaccionante (°C)

t_2 : temperatura final de la mezcla reaccionante (°C)

W : flujo másico del agua, kg/min

C_W : capacidad térmica específica del agua, J/kg. °C

M : flujo másico de la mezcla reaccionante, kg/min

C_M : capacidad térmica específica del aceite o de la mezcla reaccionante, J/kg. °C

θ : tiempo (min)

K_1 : constante en las ecuaciones de calentamiento y enfriamiento, adimensional

e : base del logaritmo natural

U : coeficiente total de transferencia de calor, J/s.m² °C

A : área de transferencia de calor, m²

Se partió de que la mezcla reaccionante tiene propiedades físico-químicas similares a las del aceite, se procedió a determinar el tiempo que demora el aceite en alcanzar la temperatura deseada.

El procedimiento experimental fue el siguiente: Se midió la temperatura inicial del aceite, cuando la temperatura del agua en el termostato se estabilizó en el valor deseado, se conectó el agitador y se comenzó a medir la temperatura que alcanzó el aceite cada dos minutos, hasta que pudo considerarse constante en dependencia de la precisión del termómetro empleado.

De esta forma se pudo establecer la temperatura final alcanzada por el aceite y el tiempo de calentamiento. Se realizó un diseño de experimentos de 3¹, en el que la variable independiente es la temperatura. Los niveles estudiados fueron 35 °C, 45 °C y 50 °C y se realizaron tres réplicas (1, 12). El procesamiento estadístico se realizó por análisis de varianza.

La validación del coeficiente calculado se realizó mediante el cálculo del área de transferencia de calor de un reactor, ecuación (3), para procesar 5 litros de aceite. Este fue escalado por similitud geométrica y se obtuvieron las dimensiones y condiciones operacionales.

$$Q = U \cdot A \cdot \text{MLD} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

Q : Calor a transferir en el equipo (W)

U : Coeficiente total de transferencia de calor (W/m² °C)

A : Área de transferencia de calor (m²)

MLDT: Diferencia media logarítmica de temperatura (°C)

Se siguió el mismo procedimiento experimental a partir de las condiciones fijadas. En este caso la velocidad de agitación fue de 250 min⁻¹. Se realizaron cinco corridas de producción de biocombustible y se evaluó el rendimiento de la reacción con respecto al volumen de aceite empleado.

Los resultados obtenidos fueron procesados estadísticamente, mediante el programa Statgraphics Centurion XVI.I.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 2 muestra el comportamiento de la temperatura del aceite con el tiempo, para 60 °C del agua en la chaqueta para la determinación del tiempo de calentamiento en el reactor de 1 L.

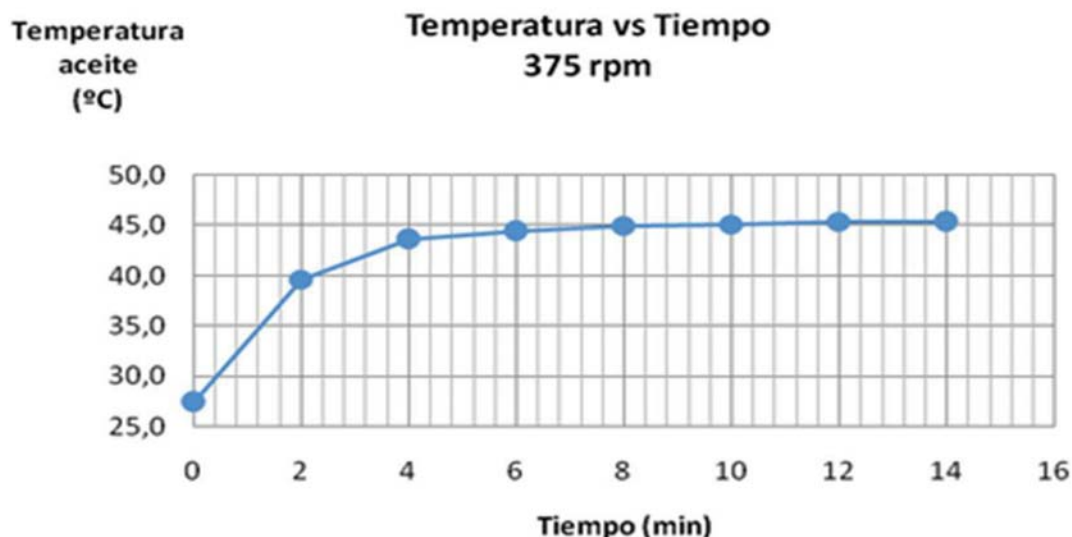


Figura 2. Comportamiento de la temperatura del aceite de soya residual del proceso de fritura en el tiempo, en el reactor de 1 L.

En la figura se observa que, a partir de los 7 minutos de comenzar el calentamiento, se ha alcanzado la temperatura deseada y se logró la estabilidad de dicho valor. Solo se muestra el comportamiento de la temperatura del aceite en 45 °C, ya que es el valor que se emplea en la transformación. El resto de los niveles estudiados indicaron resultados similares. Este resultado permite fijar el tiempo de calentamiento del aceite o de la mezcla reaccionante en 7 minutos, con lo cual se puede determinar el coeficiente total de transferencia de calor.

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para alcanzar las tres temperaturas de aceite o mezcla reaccionante experimentadas.

Tabla 1. Determinación del coeficiente total de transferencia de calor

	U (W/m ² °C)		
	35 °C	45 °C	50 °C
T mezcla	35 °C	45 °C	50 °C
Recuento	3	3	3
Promedio	255.73	253.30	253.72
Desviación Estándar	4.61	8.94	8.93
Coeficiente de Variación (%)	1.80	3.53	3.51

Se observa la poca variabilidad que presenta el coeficiente total de transferencia de calor para cada temperatura, con un coeficiente de variación menor a 4 % en todos los casos, lo que se considera aceptable (14).

No obstante, se realiza un análisis de rangos múltiples, para analizar si existen diferencias significativas entre los diferentes grupos de coeficientes totales de transferencia de calor determinados. Esto se observa en la tabla 2.

Tabla 2. ANOVA para los coeficientes totales de transferencia de calor

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	5.25807	2	2.62903	0.07	0.9374
Intra grupos	241.298	6	40.2164		
Total (Corr.)	246.56	8			

Según los resultados de la tabla 2, donde el valor-P (0.937) de la razón-F es mayor o igual a 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las variables con un nivel del 95.0 % de confianza, por tanto, hay repetitividad en el experimento.

Esto también se puede comprobar en la tabla 3, donde se observa que todos los grupos son homogéneos; por tanto, se reafirma que no hay diferencia significativa entre los grupos.

Tabla 3. Análisis de grupos homogéneos

	Casos	Media	Grupos homogéneos
Ut2	3	253.963	x
Ut3	3	255.39	x
Ut1	3	255.727	x

Al no existir diferencia estadísticamente significativa entre los grupos estudiados, se realizó un análisis conjunto de todos los valores cuyo resultado se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Determinación del coeficiente total de transferencia de calor

	U (W/m ² °C)
Recuento	9
Promedio	255.02
Desviación estándar	5.55
Coefficiente de Variación (%)	2.17
Sesgo estandarizado	-0.64
Curtosis estandarizada	-0.43

Como se aprecia, los valores cumplen con una distribución normal al tener Sesgo estandarizado y Curtosis estandarizada dentro del intervalo -2 a +2. También presentan un coeficiente de variación menor que 3 % que demuestra la poca variabilidad que existe entre los 9 valores determinados.

Las razones anteriores permiten considerar como el valor del coeficiente total de transferencia de calor al promedio de 255.02 W/m²°C, para determinaciones futuras en proceso de transformación de aceite vegetal usado en biocombustible, así como para el escalado del proceso. Se realizó también un análisis del valor y se encontró que este está en el intervalo reportado por Welty para equipos de transferencia de calor donde intercambia agua con aceite lubricante (15).

Las condiciones a las que fueron determinados los coeficientes indican que son válidos para un intervalo de $800 < Re < 2000$ y un valor de $Pr=340$.

Validación del coeficiente total de transferencia de calor calculado

El coeficiente de transferencia de calor calculado se toma como base para determinar el área de transferencia de un reactor enchaquetado para procesar 5 litros de aceite vegetal usado.

Al aplicar la ecuación (3), se obtuvo que el área de transferencia de calor para la producción de biocombustible, a partir de 5 L, es de 0.10 m^2 . Las condiciones operacionales y las dimensiones del equipo, a partir del escalado se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones del reactor de 5 L y condiciones operacionales

Escalado	Cálculo	Estándar
Diámetro interno del reactor (cm)	20.00	20
Altura total del reactor (cm)	24.55	25
Altura del líquido en el reactor (cm)	20.00	20
Longitud de la paleta (cm)	15.82	16
Altura de la paleta (cm)	1.65	2
Diámetro de la chaqueta (cm)	27.27	28
Velocidad de agitación (min^{-1})	233	250

Los resultados obtenidos para las dimensiones del reactor se consideran adecuadas, ya que cumplen con las relaciones geométricas establecidas. Con respecto a la velocidad de agitación, se observa que hay una pequeña variación, pero se considera aceptable ya que este es uno de los valores empleados en la reacción de transesterificación (2).

Para el reactor de 5 L se determinó el tiempo en que se logra alcanzar la temperatura del aceite y estabilizarse, siguiendo el mismo plan experimental que en el caso anterior. El resultado se presenta en la figura 3.

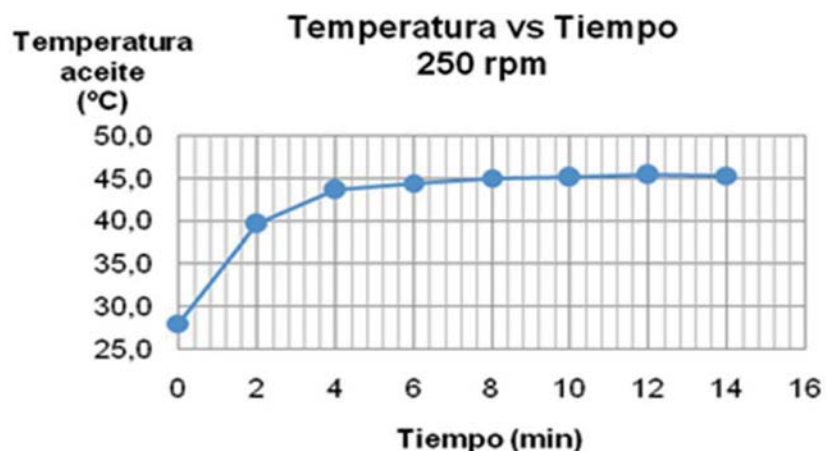


Figura 3. Comportamiento de la temperatura del aceite de soya residual del proceso de fritura en el tiempo, para el reactor de 5 L.

La figura 3 muestra el resultado para la temperatura de 45°C (para los otros dos niveles los resultados son similares). Además, se observa que al igual que en el reactor de 1 L, la estabilidad de la temperatura del aceite se logra a partir de 7 minutos; se demuestra que, a esta escala, se reproducen los resultados de la escala inferior.

A esta nueva escala, se realizaron 5 corridas experimentales y se emplearon las condiciones descritas anteriormente. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.

Se puede observar que el rendimiento, en todos los casos, es superior al 80 %, lo cual se corresponde con lo planteado en la literatura (2, 4, 8). Lo anterior permite concluir que los resultados obtenidos reproducen los que se obtienen con el reactor de 1 L, por lo que el empleo del coeficiente total global de transferencia de calor determinado en el reactor de escala de un litro, se puede emplear para el cálculo del área de transferencia de calor de reactores empleados en las reacciones de transesterificación para la producción de biocombustible, a partir del aceite de soya usado en frituras y en las condiciones descritas.

Tabla 6. Resultados de la transesterificación en el reactor de 5 L

Volumen de aceite (L)	Volumen de biocombustible (L)	Rendimiento (%)
5	4.3	86.00
5	4.1	82.00
5	4.2	84.00
5	4.1	82.00
5	4.2	84.00
Promedio		83.60
Desviación estándar		1.67

CONCLUSIONES

1. Para el reactor de laboratorio de 1L de capacidad y de material de acero inoxidable, el tiempo de calentamiento del aceite de soya residual del proceso de fritura o mezcla reaccionante es de 7 minutos.
2. El coeficiente total de transferencia de calor promedio es de $255.02 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ con una desviación estándar de 5.55, válido para un intervalo de Reynolds de $8 \cdot 10^2$ a $2 \cdot 10^3$, un valor del Prandtl de $3.4 \cdot 10^2$.
3. El coeficiente total de transferencia de calor puede ser empleado en el cálculo del área de transferencia de calor y el escalado de la operación, lo que fue comprobado a partir de los resultados obtenidos para un reactor de 5 L.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. García-Díaz, M.G.-H., José ; Maqueira-Tamayo, Yudisel Estudio de la obtención de biodiesel a partir de aceite comestible usado. . Tecnología Química, 2013. XXXIII(2): p. 134-138.
2. Sarracent-López, A.G.-H., José, Estudio de la transformación del Aceite de Soya usado en ésteres etílicos de ácidos grasos. Tecnología Química, 2016. XXXVI(3): p. 417-438.
3. Ordoñez-Sánchez, Y.C.B.-S., Bárbara ; Gandón-Hernández, José; García-Díaz, Marilyn Desarrollo de un software para la simulación del proceso de transformación del aceite vegetal usado en un biocombustible. UCE Ciencia. revista de Posgrado 2016. 4(3).
4. Gandón-Hernández, J.T.-B., Yanelis Caridad; García-Díaz, Marilyn, Caracterización de un biocombustible obtenido a partir de aceite vegetal de desecho. Tecnología Química, 2017. XXXVII (2).
5. López, L.B., Jenny ; Malagón-Romero, Dionisio Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado. Ing. Univ, 2015. 19(1): p. 155-172.
6. Narváez-Rincón, P.C.F.S.-C.J.A.-T., Luisa Fernanda-Ponce de León, Influencia de la temperatura y el porcentaje del catalizador en la etanolisis del aceite de palma. REVISTA COLOMBIANA DE QUÍMICA, 2004. 33: p. 109-115.
7. Lafont, J.J.M.S.P.Y.C.T., Análisis químico de mezclas biodiesel de aceite de cocina usado y diesel por espectroscopia infrarroja. Información Tecnológica, 2011. 22(4): p. 35-42.
8. Zainol-Abidin, R.G.P.-M.M.H.A.-R., Transesterification of Waste Cooking Oil using Calcium Loaded on Deoiled Spent Bleaching Clay as A Solid Base Catalyst. Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 2016. 11(2): p. 176-181.
9. Dostál, M.K.P.F.R., Measurement of heat transfer coefficients in an agitated vessel with tube baffles. Acta Polytechnica, 2010. 50(2): p. 46-57.

10. Reddy-K, A.B.R.-M.R.R.-P., Experimental estimation of heat transfer coefficients using helical coil in an agitated vessel. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2012. 3(2): p. 193-200.
11. Avilez-Montes, Y.M.R.-M.F.A.O.-Q.E.L.-A.Ó.P.-S., Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en el proceso de escaldado de mora Castilla (*Rubus glaucus* Benth) por el método de elementos finitos *Ingeniería e Innovación*, 2016 4(2): p. 7-14.
12. García-Díaz, M., Estudio del aprovechamiento del aceite comestible usado, in *Facultad de ingeniería Química 2013*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría p. 81.
13. W. Green, D.H.P., *Robert Perry's chemical engineers' Handbook*. 2008: McGraw-Hill Companies, Inc. 2735.
14. Welty, J.R.C.E.W.R.E.W.G.L.R., *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 2007: United States of America. 729.
15. Barrera Aldama Y, García Noa E, Solís Aliaskina K. Análisis de procesos en la cuba quesera empleando el método de los mínimos cuadrados parciales. *Revista Centro azúcar*, Vol 47, N° 2, pp1-10 2020.