

Producción de biodiesel a partir de aceite de palma

Biodiesel production using palm oil as a reactant

**Jorge Eduardo
Murillo Valdés***

Resumen

En el presente trabajo se estudia la producción de biodiesel a partir de aceite de palma utilizando dos medios catalíticos, ácido y base; mediante la realización de la transesterificación del glicerilo tripalmitato y el glicerilo trioleato con etanol; y el análisis de las siguientes variables: temperatura, contenido de catalizador y relación molar de alimento de etanol.

La máxima conversión es calculada con base en el análisis termodinámico y sus valores comparados con los resultados experimentales, obteniendo para condiciones prácticas semejantes valores de conversiones muy aproximados con el uso de catalizador básico.

Summary

A procedure for production of biodiesel using palm oil is presented using both a basic catalyst and an acid catalyst; the transesterification of glyceryl tripalmitate and glyceryl trioleate with ethanol was performed; three different variables were analysed as follows: temperature, catalyst concentration and molar feed ratio.

The maximum conversion is calculated based on a thermodynamic analysis and the calculated values are compared with the experimental results. The calculated values of conversion are in agreement with the experimental results.

Introducción

El calentamiento de la atmósfera y el incremento de la contaminación del aire y agua, son los principales desafíos medioambientales que hoy afronta la humanidad. Una de las alternativas para disminuir estos problemas, es el uso de los «biocombustibles» como

sustituyentes (en forma parcial o total) de combustibles petroquímicos (naftas, gasoil, fuel oil), logrando balances en las emisiones más favorables de dióxidos y monóxido de azufre. Ninguna población es ajena a estos problemas y a sus consecuencias.

Palabras clave

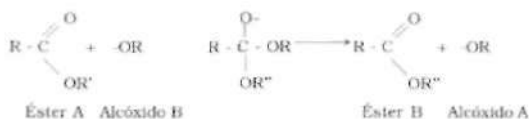
Biodiesel, aceite de palma, transesterificación, Catálisis homogénea

* Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y arquitectura, Departamento de Ingeniería Química, Agosto de 2003
Recibido: 30 de agosto de 2004. \probado: 19 de noviembre de 2004.

La búsqueda constante de combustibles alternativos a escala mundial, ha propiciado la aparición de biocombustibles como el etanol para motores de gasolina y el biodiesel para los motores de encendido por compresión. Las pequeñas modificaciones que hay que realizar a estos últimos y el bajo impacto ambiental han motivado a las naciones más desarrolladas a promover su uso, destacándose la utilización de aceites de girasol y soya, en forma de metilésteres (Ingaramo *et al.*, 2001).

Cuando se hace referencia al biodiesel, por lo general se trata de ésteres de metilo y etilo de ácidos grasos de cadena par. que con frecuencia van del C4 al C24. La razón de ello es la composición de la materia prima: grasas y aceites de origen animal y vegetal.

El proceso de síntesis consta normalmente de una transesterificación que sustituye el grupo glicerilo de los triglicéridos por un grupo metilo u etilo, proveniente de un alcóxido como el metóxido u etóxido de sodio (Moreno *et al.* 2002).



Colombia con un gran potencial agrícola, está impulsando en la actualidad la producción de aceites vegetales, en especial, el de palma: gracias a medidas gubernamentales tendientes a promover su desarrollo; con una producción de más de medio millón de toneladas métricas/año hacen que el país sea el primer productor latinoamericano de aceites de palma y palmiste y el cuarto en el mundo, (www.sagpya.mecon.gov.ar/agricu/publicaciones/aceitepalma/.html).

El hecho de crear una nueva aplicación del mismo originaría un nue-

vo mercado del producto, en la fabricación de combustibles biodegradables. solucionando el continuo derramamiento de grasas usadas, a las aguas de drenaje; además el incremento de cultivos de palma de aceite serviría para el Programa Plante del gobierno nacional en cuanto a la situación de cultivos ilícitos.

El presente artículo describe la producción de biodiesel a partir de aceite de palma por transesterificación con etanol, vía catálisis ácida y catálisis básica; utilizando tetra isopropil titanato e hidróxido de potasio, respectivamente. Este estudio fue realizado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

Diseño experimental

Se analizaron dos variables de procesos en tres niveles a saber: temperatura, relación molar de etanol y concentración de catalizador con dos niveles. Se realizaron mediciones experimentales del índice de refracción de la mezcla con base en una refracción, utilizando como variables de salida de proceso el índice de refracción de la mezcla y el volumen en exceso mediante la destilación de la mezcla resultante. En un inicio se planteó un análisis termodinámico (Murillo 2003). suponiendo que el aceite de palma sólo contiene glicerilo tripalmitato y glicerilo trioleato. Con la ayuda del software Matlab se pudo graficar el comportamiento de la transesterificación. variando la relación molar de alimento de etanol sobre masa de aceite cargada al reactor; con esta información se planteó una cinética teórico- estequiométrica, con el fin que permitiera determinar la concentración de los ésteres y el alcohol con el avance de la reacción.

De la teoría se tomaron en un principio, los rangos de temperatura de reacción y las relaciones molares de

alimentación de etanol, las cuales se verificaron con el análisis termodinámico (Mohamad, 2002).

La conversión global del proceso se determinó mediante la siguiente expresión:

$$X = \frac{\text{MOLESRXN}}{\frac{92 \cdot 0,789}{46}}$$

X = Conversión global del proceso

MOLESRXN = Moles de etanol que reaccionan

Niveles de las variables de proceso

Del análisis termodinámico se establecieron los rangos de las variables teóricas que mejor se ajustan al diseño experimental; para temperatura y la relación molar de alimentación se eligieron tres niveles y para el porcentaje de catalizador sobre cantidad de aceite cargado al reactor dos niveles. Estos valores se exponen a continuación en las tablas 1 y 2.

Preparación de la muestra

Curvas de calibración para control de reacción

Para determinar el avance de la reacción se realizaron curvas de calibración de índice de refracción de la mezcla biodiesel, glicerina y aceite etanol como función del contenido de etanol (Figura 1) (Murillo, 2003).

Materiales y métodos

Reactivos

- Aceite de palma procesado
- Etanol grado analítico marca Merk
- Tetra isopropil titanato (TPT)
- Hidróxido de potasio (KOH) grado analítico
- Marca Merk
- Agua destilada.

Tabla 1 Combinación de los niveles del proceso con el catalizador básico

Ensayo	Temperatura °C	[]-EOH (Moles de E-OH / Moles de oil cargados al reactor)	(%de Cat. básico/ Wp de aceite cargado)
1	40	5,34	1
	50	5,34	1
	70	5,34	1
2	40	6,67	1
	50	6,67	1
	70	6,67	1
3	40	8,00	1
	50	8,00	1
	70	8,00	1
4	40	5,34	3
	50	5,34	3
	70	5,34	3
5	40	6,67	3
	50	6,67	3
	70	6,67	3
6	40	8,00	3
	50	8,00	3
	70	8,00	3

Tabla 2 Combinación de los niveles del proceso con el catalizador ácido

Ensayo	Temperatura °C	[]-EOH (Moles de E-OH / Moles de oil cargados al reactor)	(%de Cat. ácido/ Wp de aceite cargado)
7	40	5,34	1
	50	5,34	1
	70	5,34	1
8	40	6,67	1
	50	6,67	1
	70	6,67	1
9	40	8,00	1
	50	8,00	1
	70	8,00	1
10	40	5,34	3
	50	5,34	3
	70	5,34	3
101	40	6,67	3
	50	6,67	3
	70	6,67	3
12	40	8,00	3
	50	8,00	3
	70	8,00	3

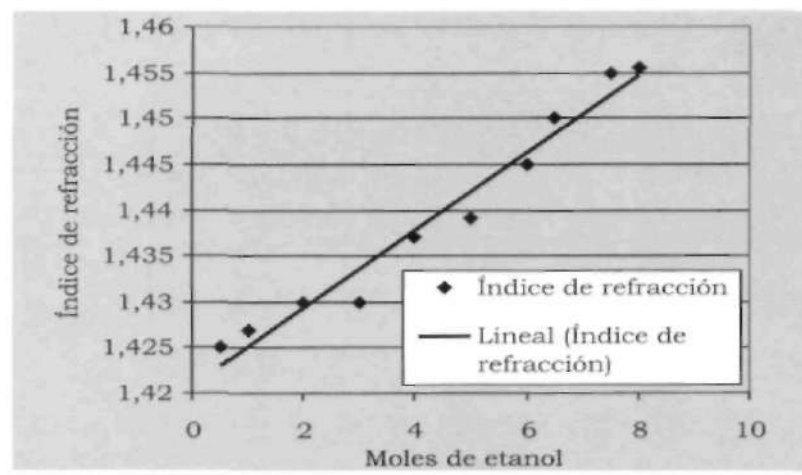


Figura 1 Índice de refracción vs moles de etanol presentes

Procedimiento

Reacción

Se realizó el montaje del reactor y el sistema de separación, luego se acondicionó el equipo haciendo pruebas a distintas condiciones de agitación, temperatura, relación molar de alimentación y porcentaje de catalizador. Con el biodiesel obtenido en las pruebas de acondicionamiento se realizaron curvas de calibración del índice de refracción para diferentes concentraciones de etanol, aceite, biodiesel y glicerina.

Antes de iniciar cada ensayo se midió el índice de refracción y la viscosidad del aceite, se pesó la cantidad de aceite necesario para la reacción (250g.) y se agregó al reactor Batch. Una vez cargado el aceite, se inició el precalentamiento del mismo hasta 5°C por debajo de la temperatura de reacción deseada.

Se midió y se disolvió en el etanol necesario para el ensayo, la cantidad de catalizador requerido para el mismo, esto se hizo calentando a 25°C y agitando vigorosamente la mezcla. luego se agregó al reactor la mezcla catalizador-etanol. de una forma lenta y pausada, con el fin de mejorar la solubilidad y se midió el volumen de reacción.

Se inició la agitación mecánica a 2000 RMP y se tomó el índice de refracción inicial de la mezcla, se continuó tomando pequeñas muestras, midiéndoles el índice de refracción a cada una de ellas durante dos horas, en intervalos de 10 y 20 minutos. Una vez finalizado el tiempo de reacción, se midió el índice de refracción y el volumen de reacción a la mezcla.



Separación

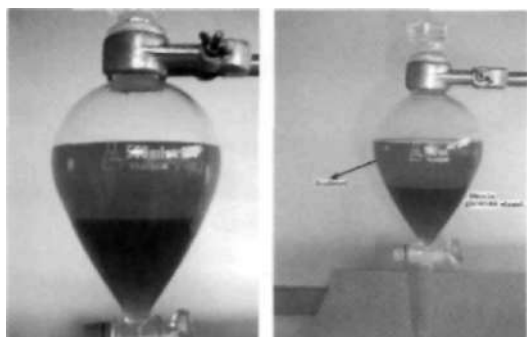
Luego de finalizado el tiempo de reacción. se dejó enfriar y se agregó la mezcla de reacción al equipo de destilación simple, calentado al baño de María hasta cinco grados por encima de la temperatura de ebullición del etanol.

Se destiló la cantidad de etanol que no reaccionó y se midió su volumen en una probeta. Los fondos se dejaron enfriar y se agregaron al embudo de separación.

Después se lavó la mezcla agregándole en forma pausada agua destilada y se agitó el embudo de separación, se dejó reposar hasta que se produjo la separación de fases, apartando en la parte superior el biodiesel y en la inferior la glicerina. A cada fase se le midió el índice de refracción. La centrifugación de la fase biodiesel, se utilizó como etapa final

de separación, luego se le midió el pH. la viscosidad y la densidad a la muestra de biodiesel.

Se tomaron 500 ml de biodiesel y se realizaron pruebas de calor de combustión, punto de combustión y punto de inflamación.



Resultados

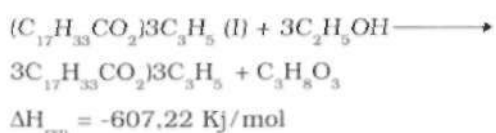
Análisis fisicoquímico del aceite de palma

Los resultados del análisis fisicoquímico realizado al aceite de palma, se muestran en las tablas 3. 4 y 5.

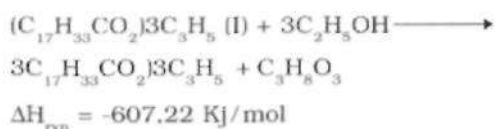
Análisis termodinámico

Entalpia de reacción

- Reacción con el glicerilo trinoleato:



- Reacción con el glicerilo tripalmitato:



Energías libres de Gibbs y capacidades caloríficas estándar de reacción

- Reacción con el glicerilo trinoleato:

Energía libre de reacción

$$\Delta G_{rxn} = -55,665 \text{ Kj/mol}$$

Cp de reacción (Cp_{rxn})

Tabla 3 Caracterización físico-química del aceite de palma

Propiedad	Teórica	Práctica
Índice de saponificación (mg de KOH)	208,4	205,63
Índice de yodo	48-58	53,87
Viscosidad (cp) a 30°C	-	846.670
Punto de fusión (°C)	18	19
Densidad (gr/ml) a 20°C	1,38	1,25
Peso molecular	844	846

Tabla 4 Índice de refracción del aceite de palma por lote de producción

Envase	Lote de producc.	Vence	Punto de muestra	Índice de RD
1	180132	18-01-2004	Superficie	1,4720
1	180132	18-01-2004	Medio	1,4720
1	180132	18-01-2004	Interno	1,4720
2	150231	15-02-2004	Superficie	1,4720
2	150231	15-02-2004	Medio	1,4725
2	150231	15-02-2004	Interno	1,4720
3	162423	13-01-2004	Superficie	1,4725
3	162423	13-01-2004	Medio	1,4720
3	162423	13-01-2004	Interno	1,4725
4	120232	12-02-2004	Superficie	1,4720
4	120232	12-02-2004	Medio	1,4720
4	120232	12-02-2004	Interno	1,4720

Tabla 5 Viscosidad y densidad del aceite de palma por lote de producción

Envase	Lote de producc.	Vence	Viscosidad (centipoises)	Densidad (gr/ml)
1	180132	18-01-2004	846.672	1,245
1	180132	18-01-2004	846.670	1,250
1	180132	18-01-2004	846.671	1,250
2	150231	15-02-2004	846.672	1,249
2	150231	15-02-2004	846.669	1,250
2	150231	15-02-2004	846.670	1,251
3	162423	13-01-2004	846.671	1,252
3	162423	13-01-2004	846.670	1,251
3	162423	13-01-2004	846.669	1,250
4	120232	12-02-2004	846.670	1,250
4	120232	12-02-2004	846.671	1,249
4	120232	12-02-2004	846.669	1,250

$$\Delta Cp_{rxn} = -3,5 \times 10^{-3} \text{ Kj/mol}^{\circ}\text{K}$$

- Reacción con el glicerilo tripalmitato:

Energía libre de Gibbs de reacción

$$\Delta G_{rxn} = -79,008 \text{ KJ/mol}$$

Cp de reacción (Cp_{rxn})

$$\Delta C_{p_{rxn}} = -8,1 \times 10^{-2} \text{ KJ/mol}^{\circ}\text{K}$$

Curvas de energía libre de Gibbs en función de la temperatura (Smith et al., 1989)

Se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

$$\Delta G = \Delta H^0 + \int_{298,15}^T C_{p_{rxn}} * dT - T * \left[-\Delta S_{f_{rxn}} + \int_{298,15}^T \left(\frac{C_{p_{rxn}}}{T} \right) * dT \right]$$

$$\Delta S_{f_{rxn}} = \frac{\Delta H^0_{rxn} - \Delta G^0_{rxn}}{298,15}$$

Las ecuaciones anteriores, se utilizan para describir el comportamiento de la energía libre de Gibbs en función de la temperatura; luego para:

La reacción estequiométrica con el glicerilo trinoleato:

$$\Delta S_{f_{rxn}} = \frac{\Delta H^0_{rxn2} - \Delta G^0_{rxn2}}{298,15} = \frac{-607,22 + 79,008}{298,15} = -1,7716 \text{ KJ/mol}^{\circ}\text{K}$$

$$\Delta G = -607,22 + \int_{298,15}^T (8,1 \times 10^{-2}) * dT - T * \left[-1,7716 + \int_{298,15}^T \left(\frac{8,1 \times 10^{-2}}{T} \right) * dT \right]$$

La reacción estequiométrica con el glicerilo tripalmitato:

$$\Delta S_{f_{rxn}} = \frac{\Delta H^0_{rxn1} - \Delta G^0_{rxn1}}{298,15} = \frac{-459,8 + 55,665}{298,15} = 1,355 \text{ KJ/mol}^{\circ}\text{K}$$

$$\Delta G = -459,8 + \int_{298,15}^T (3,52 \times 10^{-3}) * dT - T * \left[-1,355 + \int_{298,15}^T \left(\frac{3,52 \times 10^{-3}}{T} \right) * dT \right]$$

Los resultados del comportamiento de la energía libre de Gibbs en función de la temperatura para reacciones 1 y 2, se muestran en las figuras 2 y 3.

Cálculo de las constantes de equilibrio teóricas

Para el cálculo de estas constantes se toma en cuenta, que el aceite alimentado tiene solo los compuestos de mayor concentración, es decir el glicerilo trinoleato (55%) y el glicerilo

tripalmitato (45%) y que sólo ocurre la reacción de transesterificación.

Para calcular las constantes de equilibrio a 298,15 K se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta \ln K_e = \frac{\Delta G^0}{R + T}$$

T = temperatura (298,15 Kelvin)

R = constante universal de los gases (8,31451 J/mol^oK)

ΔG^0 = energía libre de Gibbs de reacción a 298,15

La reacción 1 (con el glicerilo tripalmitato) tenemos:

$$-\ln K_e = \frac{-55,665 \text{ KJ/mol}}{(8,314 \text{ KJ/mol}^{\circ}\text{K}) * (298,15 \text{ K})} \quad \text{Ec. 1}$$

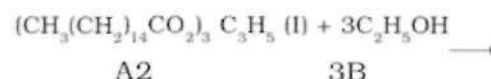
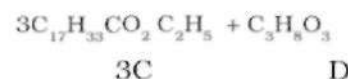
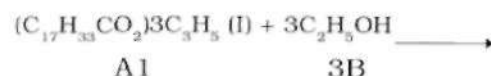
$$K_e = 1.307$$

La reacción 2 (con el glicerilo trinoleato) tenemos:

$$-\ln K_e = \frac{-79,769 \text{ KJ/mol}}{(8,314 \text{ KJ/mol}^{\circ}\text{K}) * (298,15 \text{ K})} \quad \text{Ec. 2}$$

$$K_e = 1.468$$

A partir de estas constantes, se calculó la variación de la conversión en función de la carga total de etanol alimentada al reactor, mediante un programa en Matlab de estas variables seguidas de las siguientes ecuaciones se visualizó este efecto.



La tabla 6 presenta el balance molar estequiométrico para la reacción de transesterificación.

Luego:

$$K_{e1} = \left(\frac{C_e^3 * C_n}{C_{A1} * C_B^3} \right) = \frac{27 C_{AO1}^3 X_{A1}^1 * C_{AO1} X_{A1}}{C_{AO1} (1 - X_{A1}) * C_{AO1}^3 (\theta_B - 3X_{A1})^3}$$

$$K_{e1} = \frac{27 X_{A1}^4}{(1 - X_{A1}) (\theta_B - 3X_{A1})^3}$$

$$K_{e2} = \left(\frac{C_e^3 * C_n}{C_{A1} * C_B^3} \right) = \frac{27 C_{AO2}^3 X_{A2}^3 * C_{AO2} X_{A2}}{C_{AO2} (1 - X_{A2}) * C_{AO2}^4 (\theta_B - 3X_{A2})^3}$$

$$K_{e1} = \frac{27 X_{A2}^4}{(1 - X_{A2}) (\theta_B - 3X_{A2})^3}$$

Las figuras 4 y 5 muestran la variación de la conversión de equilibrio

Tabla 6

Tabla estequiométrica basada en Scott Fogler

Sustancia	t = 0	dt	t = final
A1	0,55 N _{AO}	-0,55 N _{AO} (1-X _{A1})	0,55 N _{AO} (1-X _{A1})
A2	0,45 N _{AO}	-0,45 N _{AO} X _{A2}	0,45 N _{AO} (1-X _{A2})
B	NB	-1,65 N _{AO} X _{A1} - 1,35 N _{AO} X _{A2}	N _{AO} (DB-1,65X _{A1} -) 1,35X _{A2}
C	0	1,65 N _{AO} X _{A1}	1,65 N _{AO} X _{A1}
D	0	1,35 N _{AO} X _{A2}	1,35 N _{AO} X _{A2}
E	0	N _{AO} (0,55X _{A1} + 0,45X _{A2})	N _{AO} (0,55X _{A1} + 0,45X _{A2})
Total	N _{AO} + N _B		N _{AO} (1+d _B)

Donde:

o_B = Relación molar de alimentación de etanol

N_{AO} = Moles de aceite alimentadas

X_{A1} = Conversión del glicérilo tripalmitato

X_{A2} = Conversión del glicérilo trioleato

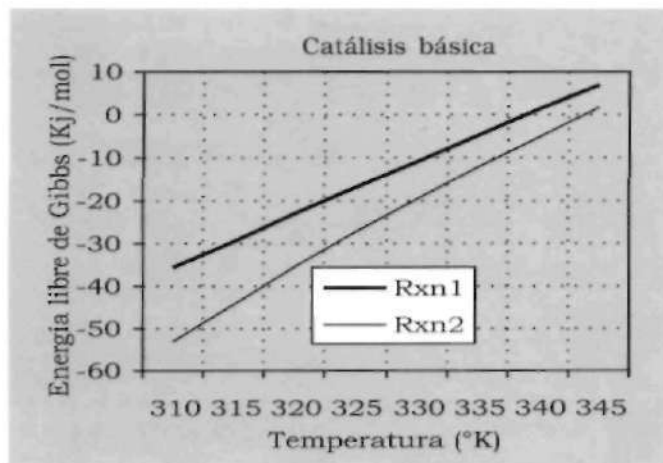


Figura 2 Energía libre de Gibbs vs rango de temperatura utilizado con el catalizador básico

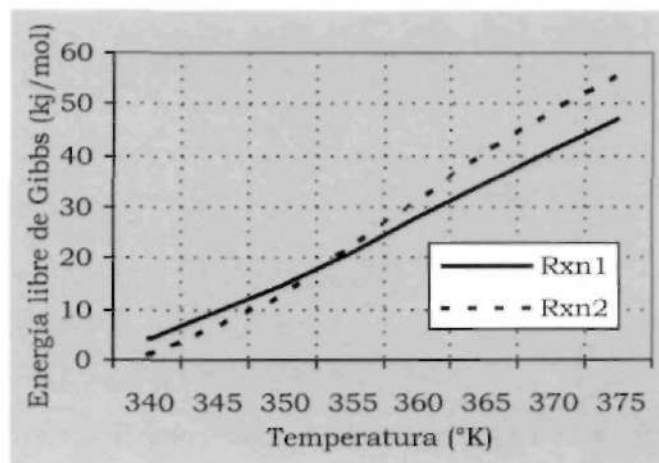


Figura 3 Energía libre de Gibbs vs rango de temperatura utilizado con el catalizador ácido

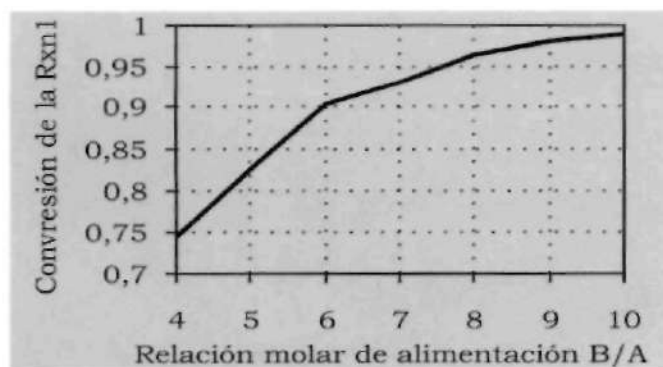


Figura 4 Variación de la conversión de la Rxn1 con respecto a la temperatura y la razón molecular de alimentación

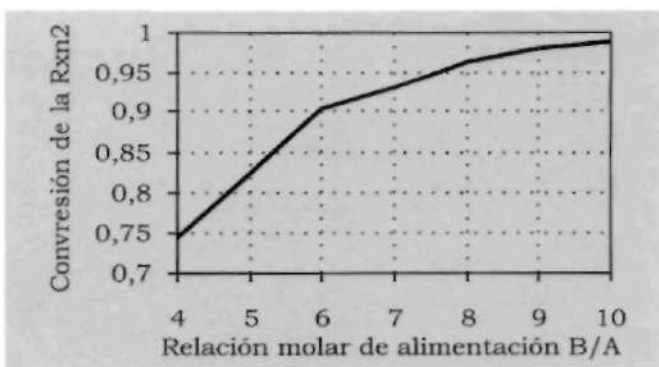


Figura 5 Variación de la conversión de la Rxn2 con respecto a la razón molar de alimentación de etanol

teórica con respecto a la relación molar de alimentación de etanol/aceite.

Variación de la constante de equilibrio con la temperatura

Gráficos de moles de etanol/volumen total de rxn con respecto al tiempo de reacción (min)

A continuación se presentan los gráficos más representativos de la variación de la concentración de etanol con respecto al tiempo, éstas muestran inicialmente la variación de los moles de etanol 1 volumen total de la reacción, manteniendo la carga, tipo de catalizador y la relación de ali-

mentación de etanol constantes, variando sólo la temperatura. Luego se expone el mismo efecto variando la carga de catalizador seguida de la variación de la relación molar de alimentación (Figura 8).

Avance de la reacción con respecto a la carga de catalizador básico (Figuras 9 y 10).

Avance de la reacción con respecto al efecto del catalizador (Figura 11).

La Figura 12 muestra el avance de la reacción aumentando el catalizador ácido, la temperatura la relación mo-

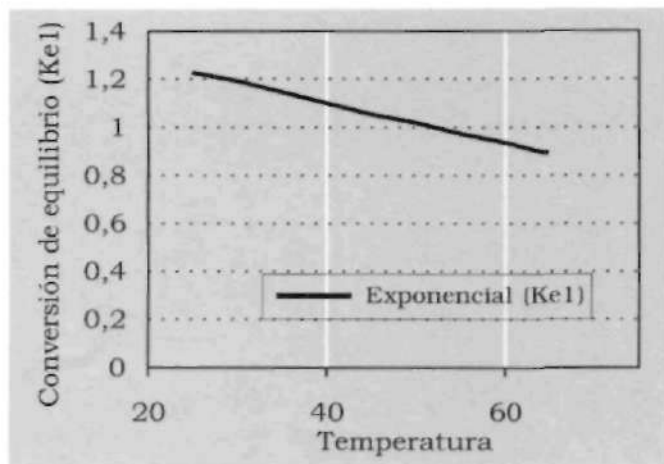


Figura 6 Variación de la constante de equilibrio R_{nx1} (K_{e1}) vs temperatura

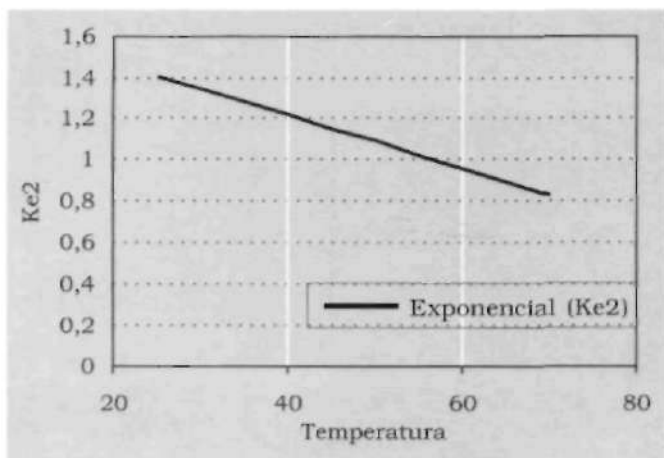


Figura 7 Variación de la constante de equilibrio de la reacción 2 (K_{e2}) vs temperatura

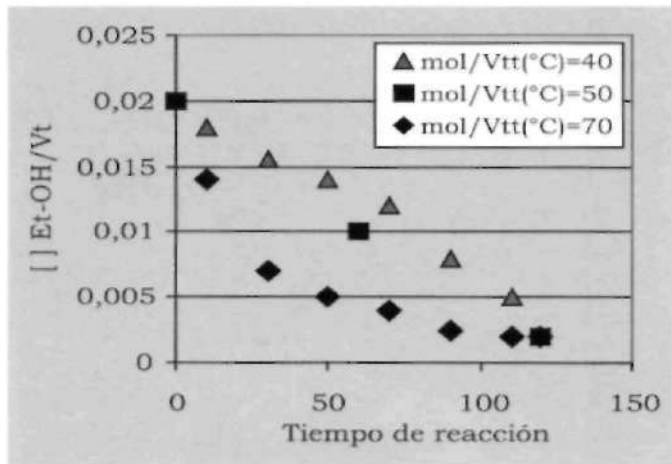


Figura 8 Concentración de etanol/ V_t vs tiempo de reacción con 3% de catalizador ($C.I. = 8M$)

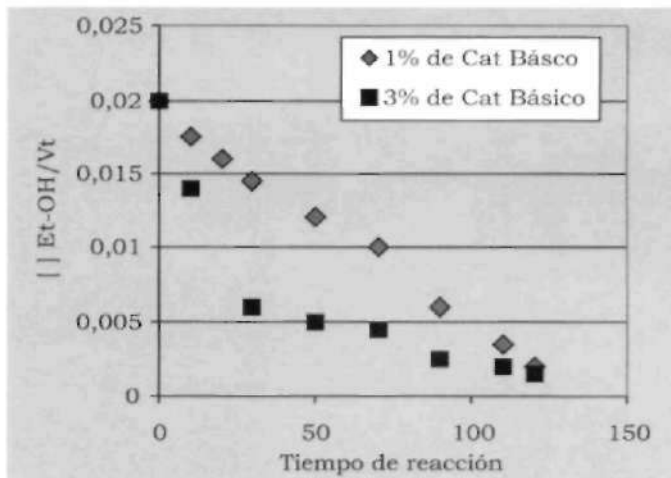


Figura 9 Concentración de etanol/ V_t vs tiempo de reacción a $T = 40^{\circ}C$ y $RM = 8$

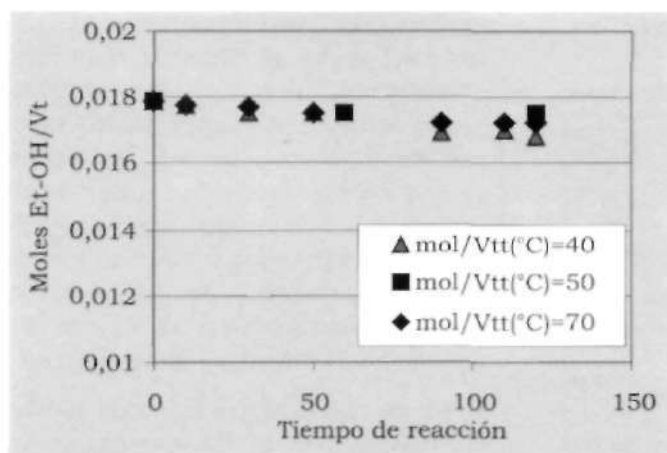


Figura 10 Concentración de Et -OH/Vt de Rxn vs tiempo de Rxn con 1% catalizador ácido (C.I. = 5,34 Mol)

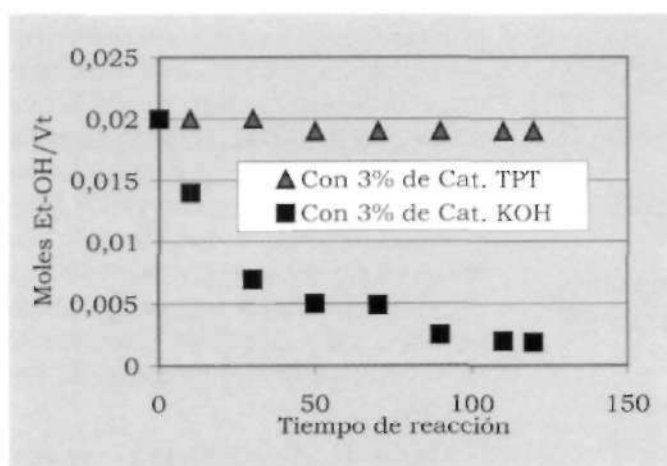


Figura 11 Comparación de avance de la reacción con respecto al tipo de catalizador usado

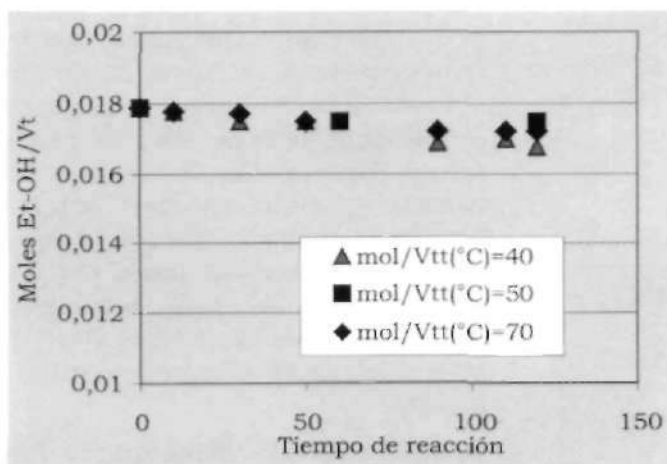


Figura 12 Moles de Et OH/Vol, total vs tiempo de reacción con 5% de catalizador TPT, T= 70°C y RM= 11.02

lar de alimentación (etanoliaceite) y el tiempo de reacción; allí se ve con claridad, que son necesarias más altas concentraciones molares de catalizador ácido, comparadas con el catalizador básico de tal forma que se obtenga valor de velocidad de reacción similares.

Conversión final

Los resultados de conversión final que se hallaron para cada corrida se muestran en las tablas 7 y 8.

Estos datos arrojaron la siguiente regresión multivariable:

$$X = 64.5593 + 1.13056 \times Cc + 3.216679 \times Rm - 0.090131 \times T$$

X = Conversión

Ce = Contenido de catalizador

Rm = Relación molar de alimentación de etanol

T = Temperatura

Análisis fisicoquímico del biodiesel

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico realizado al biodiesel, que

Tabla 7 Conversiones finales con el catalizador básico

% de catalizador	temperatura (°C)	R.M. de Et-OH	X (%)
3	40	5,34	83,70
3	50	5,34	80,43
3	70	5,34	79,35
3	40	6,67	84,78
3	50	6,67	82,61
3	70	6,67	81,52
3	40	8,00	91,30
3	50	8,00	89,67
3	70	8,00	88,04
1	40	5,34	80,43
1	50	5,34	78,26
1	70	5,34	76,09
1	40	6,67	81,52
1	50	6,67	79,90
1	70	6,67	78,26
1	40	8,00	89,13
1	50	8,00	87,50
1	70	8,00	86,96

Tabla 8 Conversiones finales con el catalizador ácido

% de catalizador	temperatura (°C)	R.M. de Et-OH	X (%)
3	40	5,34	3,26
3	50	5,34	4,35
3	70	5,34	7,61
3	40	6,67	4,35
3	50	6,67	7,61
3	70	6,67	9,78
3	40	8,00	6,52
3	50	8,00	8,70
3	70	8,00	11,90
1	40	5,34	2,17
1	50	5,34	3,26
1	70	5,34	6,52
1	40	6,67	2,17
1	50	6,67	4,35
1	70	6,67	7,61
1	40	8,00	3,26
1	50	8,00	5,42
1	70	8,00	8,70

presenta las propiedades principales que lo caracterizan se muestran en la tabla 9.

Discusión de resultados

- De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico realizado al aceite de palma, se determinó que la variación de sus propiedades fisicoquímicas era despreciable; es decir, éstas permanecían aproximadamente cons-

Tabla 9 Resumen del análisis fisicoquímico del Biodiesel vs aceite

Propiedad	Aceite	Biodiesel
Viscosidad (cp)	846.670	9
Punto de fusión (°C)	19	3
Densidad (gr/ml) a 20(°C)	1,25	0,882
pH (30°C)	6,83	8,92
Punto de congelación (°C)	-	2,5
Calor de combustión (KJ/Kg)	-	40050
Punto de inflamación (°C)	-	48
Punto de combustión (°C)	-	62

tantes sin importar la muestra tomada, esto se observa con más claridad en los resultados del índice de refracción (Tabla 4), los cuales son casi constantes, así como lo son los de viscosidad y densidad (Tabla 5), las cuales son propiedades constitutivas. Por tanto es válido el concepto de tomar como mezcla homogénea el aceite de palma con el que se experimentó.

- Gráficos de energía libre de Gibbs en función de la temperatura. De las entalpías de reacción se pudo establecer que la transesterificación entre el aceite de palma y el etanol es una reacción exotérmica, por tanto se favorece a temperaturas de reacción bajas; esto se reafirma al observar las figuras 2 y 3, que muestran la variación de la energía libre de Gibbs en función de las temperaturas de operación a presión, reactivos y constantes; en éstas se observa que a medida que la temperatura es menor, el Gibbs se hace más negativo, ampliando la factibilidad teórica de la reacción.
- Gráficos de variación de la conversión teórica, con respecto a la temperatura y la razón molar de alimentación de etanol. Las figuras 4 y 5 permiten observar la variación de la conversión con respecto a la temperatura y la razón molar de alimentación de etanol; de éstas se puede establecer que la razón molar de alimentación de etanol es la variable que más afecta el equilibrio de la reacción. Esto se visualiza en los datos obtenidos por los experimentos, los cuales muestran que con RM de etanol las conversiones altas se afectan positivamente.
- Gráficos de la variación de las constantes de equilibrio con respecto a la temperatura. En las figuras 6 y 7 se puede observar que

las constantes de equilibrio son altas a temperaturas bajas; sin embargo, al incrementar la temperatura éstas disminuyen, lo que es de esperarse debido al carácter exotérmico de la reacción (principio de Le Chatelier's).

- La velocidad de reacción varía más con la temperatura que con el contenido de catalizador; cuando éste se encuentra en bajas proporciones. Esto se debe a que la velocidad de reacción aumenta o disminuye con la temperatura, si ésta se incrementa o se reduce. respectivamente, y al existir poca cantidad de catalizador la velocidad de reacción se ve afectada más por este efecto.
- Al aumentar la relación molar de alimentación de etanol (RMA), la conversión a biodiesel aumenta; esto se explica gracias a la teoría de las colisiones, ley de acción de masas y al principio de Le Chatelier's. Ello se visualiza en las conversiones obtenidas con relaciones de alimentación de etanol altas, por ejemplo para $RM = 8$, la conversión fue de 91,3% (con $T = 40^{\circ}C$ y 3% de catalizador básico), mientras que para una $RM = 5.34$, a las mismas condiciones fue de 83,7%.
- Para temperaturas superiores a los $70^{\circ}C$, el reflujo es lento, por tanto, para mantener la conversión de equilibrio invariable, se debe alimentar una relación molar de etanol muy alta, aproximadamente del 100% (12 moles de RMA).
- De la regresión multivariable realizada a los datos de conversión de reacción utilizando el catalizador básico; ésta se favorece a temperaturas bajas, relaciones molares de alimentación etanol y porcentajes catalizador grandes.
- La pendiente de la variación de la relación molar de alimentación

sobre volumen total por tiempo de reacción ($RMV/Vt*trxn$), utilizando el catalizador ácido, permanece aproximadamente con la misma tendencia. Esto expresa que el contenido de catalizador es tan pequeño en cualquiera de los casos, que la reacción avanza por sí sola; es decir, con una velocidad de reacción muy baja, haciendo presumir que para obtener la conversión deseada se necesitan tiempos de reacción muy largos.

- Los resultados del análisis de calor de combustión al biodiesel (Tabla 9), representan la buena calidad del mismo; sin embargo, los valores de punto de combustión, punto de inflamación y pH, exponen la necesidad de realizar lavados más rigurosos, esto con el fin de eliminar la mayor cantidad de etanol y KOH presentes en el biodiesel; esto permitiría aumentar el punto de inflamación, de combustión y disminuir el pH.
- Los bajos puntos de combustión y de inflamación no necesariamente representan un problema, más bien pueden ser una solución al conflicto que generan estos puntos cuando son muy altos, debido a que entre más altos, mayor aire se necesita para quemarlos, de allí que en algunos países se utilicen aditivos para disminuirlos.

Conclusiones

A pesar de la suposiciones hechas la conversión máxima obtenida fue del 91,3%; muy alta si conversión de equilibrio teórica es del 96.77% a las mismas condiciones ($T = 40^{\circ}C$, $RMA = 8$), esto quiere decir que se hizo una buena aproximación. Las condiciones que mejores resultados presentaron con el catalizador básico son: $T = 40^{\circ}C$, 3% de catalizador y $RMA = 8$; mientras que para el catalizador ácido son:

T = 70°C, 3% de catalizador y RMA = 8; a presión atmosférica, velocidad de agitación = 200 R.P.M. Con tiempo de reacción = 2 horas.

- El cambio en la viscosidad, la densidad, el índice de refracción (Tabla 9); entre otras propiedades, comprueban el buen resultado de la transesterificación.
- El proceso más rentable desde el punto de vista de la ingeniería, es la transesterificación vía catálisis básica, ya que las condiciones de operación, no son tan exigentes como con el catalizador básico, además las conversiones son mucho más altas como se pudo observar.

Agradecimientos

A mi familia por darme todas las oportunidades y medios que han

hecho posible lo que soy ahora y lo que he hecho.

A Carolina Cardona, por estar a mi lado cuando más le he necesitado. brindándome inspiración y motivación.

Al profesor Javier Fontalvo por sus excepcionales asesorías en el desarrollo de este trabajo.

A la profesora Alneira Cuéllar por su valiosa asesoría y dirección de este trabajo.

Al ingeniero Adamo Alexander. por su incalculable ayuda y asesoría en el desarrollo experimental del trabajo.

A Rafael Muñoz, por la enorme colaboración en los programas realizados en Matlab.

A software Matlab puesto que gracias a este programa, se pudieron visualizar los efectos termodinámicos deseados.

Bibliografía

- Alzate S. R. 1994. Análisis orgánico cualitativo. Universidad Nacional. Facultad de Ciencias y Administración. Departamento de Ciencias. Septiembre.
- Fanguri Ma; Clemens. D. 1999. The effect of mixing on transesterification of beef tallow. *Biore-source Technology* 69.
- Freedman, B; Butterfield. R. 1986. Transesterification kinetics of Soybean Oil. *Jacos*. 63 (10). Octubre.
- Fogler. S. *Elements of Chemical Reactions for engineering*.
- Ingaramo J; Sierra, EM; Costa, R. 2001. Puesta en marcha de un proyecto de mecanismos de desarrollo limpio en el tema del biodiesel. Buenos Aires. Diciembre 4.
- Korus. RA; Dwight. S. H; Narendra Barn; Peterson, CL; Drown. DC. 1991. Transesterification process to manufacture ethyl ester of 'rape oil. Department of Chemical Engineering. University of Idaho.
- Mamad. Al-Widyan. 2002. Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into Biodiesel. *Biore-source Technology*. 85.
- Moreno B, JL; Gutiérrez. M. GC. 2002. Obtención de biodiesel a partir de aceite de higuera. Tesis. Universidad Nacional de Colombia.
- Murillo V. JE. 2003. Producción de biodiesel a partir de aceite de palma. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Agosto
- Newland. C. 2000. Biodiesel en Argentina. Santa Fe. Agosto.
- Smith, JM; Vanness, H. 1989. Introducción a la termodinámica. 61 ed. Mc Graw - Hill.
- Valencia. BH. Balances de materia y energía. Tomo II. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- www.sagpya.mecon.gov.ar/aqricu/publicaciones/aceitepalma/.html