

Artículo Original

***ESTUDIO CINÉTICO A PARTIR DEL CONTROL OPERACIONAL
EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO: ETAPA DE
DESULFURACIÓN***

***KINETIC STUDY FROM OPERATIONAL CONTROL IN THE PETROLEUM
INDUSTRY: DESULPHURIZATION STAGE***

Roxana Cortés Martínez¹ <https://orcid.org/0000-0002-2040-6548>

Erenio González Suárez^{2*} <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

Fernando Efrém Ramos Miranda³ <https://orcid.org/0000-0002-0601-6228>

¹ Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, San Luis de Potosí, México.

² Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

³ Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

Recibido: Septiembre 29, 2025; Revisado: Octubre 6, 2025; Aceptado: Noviembre 19, 2025

RESUMEN

Introducción:

En las refinerías de petróleo intervienen innumerables reacciones químicas. En el proceso de desulfuración del combustible la depuración alcalina es ampliamente utilizada en la eliminación de sulfuros y ácidos presentes.

Objetivo:

Obtener la cinética de las reacciones químicas que ocurren en el proceso.

Materiales y Métodos:

Se caracterizó la materia prima considerando que a la refinería entran varios tipos de crudos que son mezclados en diferentes proporciones. A partir de datos del control del proceso, se analizaron las reacciones ocurridas en la eliminación de los compuestos sulfurados en la nafta inestable en el proceso de obtención del gas licuado del petróleo (GLP) y en el turbo-combustible en el proceso de obtención del combustible de



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Erenio González, Email: erenio@uclv.edu.cu



aviación.

Resultados y Discusión:

Se obtuvieron las expresiones cinéticas de las reacciones que ocurren en los procesos de neutralización, tanto de la nafta virgen ligera inestable de entrada al proceso como del turbo-combustible, que incluyen las reacciones con H_2S y $R-SH$ en ambas etapas, las cuales reportaron bajos porcentajes de desviación, siendo respectivamente: 0,67 y 0,28 para la primera etapa y en la segunda: 0,00467 y 0,00265 para la segunda lo que permitirá utilizarlas en posteriores estudios.

Conclusiones:

Las expresiones cinéticas obtenidas describen adecuadamente los procesos que se llevan cabo en la instalación, permiten afirmar que el orden de las reacciones de neutralización de la nafta virgen ligera inestable y el turbo-combustible están en el intervalo de 1,35 a 5,16.

Palabras clave: cinética; desulfuración; neutralización.

ABSTRACT

Introduction:

Countless chemical reactions are involved in oil refineries. In the fuel desulphurization process, alkaline scrubbing is widely used to remove sulfides and acids.

Objective:

To obtain the kinetics of the chemical reactions that occur in the process.

Materials and Methods:

The raw material was characterized considering that several types of crude oil enter the refinery and are mixed in different proportions. Based on process control data, the reactions occurring during the removal of sulfur compounds from unstable naphtha in the Liquefied Petroleum Gas (LPG) production process and from jet fuel in the aviation fuel production process were analyzed.

Results and Discussion:

The kinetic expressions of the reactions occurring in the neutralization processes of both the unstable light virgin naphtha entering the process and the jet fuel were obtained. These reactions, including those with H_2S and $R-SH$ in both stages, showed low percentage deviations: 0.67 and 0.28 for the first stage, and 0.00467 and 0.00265 for the second stage, respectively. This data will allow for their use in future studies.

Conclusions:

The kinetic expressions obtained adequately describe the processes carried out in the plant and allow us to conclude that the order of the neutralization reactions of the unstable light virgin naphtha and the jet fuel is in the range of 1.35 to 5.16.

Keywords: kinetics; desulphurization; neutralization.

1. INTRODUCCIÓN

La introducción de los adelantos de la ciencia y la técnica en los procesos productivos, es una forma idónea de lograr avances en la competitividad de las empresas, y en ello

los métodos de investigación científica y la interdisciplinariedad han tenido, mediante la intensificación industrial, impacto económico y social (Cortés et al., 2021a) por ello, se han realizado ingentes esfuerzos para resolver problemas en la industria del petróleo cubana (Cortés et al., 2021b), (Alemán et al., 2021), (Alemán et al., 2022), (Bonachea et al., 2021), (Medina et al., 2023).

La cinética química tiene como finalidad medir la velocidad de las reacciones químicas y encontrar ecuaciones que la relacionen con variables experimentales. El uso de esta expresión es de gran utilidad cuando se requiere obtener una estimación muy cercana a lo que pudiera ocurrir en una determinada reacción, además provee información sobre el comportamiento de la concentración de los compuestos en cuestión durante un determinado tiempo, así como el grado de realización de la reacción (Cortés, 2023).

En la industria química, en muchos procesos de separación o depuración, está la presencia de las reacciones químicas por lo que es imprescindible conocer la cinética de estas reacciones. En muchas ocasiones la obtención de esta cinética se hace compleja debido a la falta de instrumentos de medición e incluso, por la falta de equipamiento en los laboratorios que permitan caracterizar el flujo de materia prima que se analiza. Debido a esto, es necesario recurrir a otras alternativas como la simulación de procesos que permita obtener esta información (Cortés, 2023).

Las refinerías de petróleo son industrias de procesos complejos donde intervienen innumerables reacciones químicas. Uno de estos procesos es la desulfuración del combustible. Los estudios muestran que los beneficios de la reducción de azufre, si bien la inversión requerida en refinación sigue siendo significativa, rebasan con mucho los costos (Cortés et al., 2019).

Este estudio se obtuvieron las expresiones cinéticas de las reacciones en la eliminación de los compuestos sulfurados presentes en la nafta virgen ligera inestable (NVLI) y el turbo-combustible, con una solución de sosa cáustica (NaOH) en la obtención de gas licuado del petróleo (GLP) y combustible de aviación (Jet-A1) respectivamente. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue obtener la cinética de las reacciones químicas que ocurren en el proceso

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La depuración alcalina, está destinada para eliminar, de los destilados, los compuestos ácidos y sulfuros (Graaff et al., 2011), (Ketu, 2013), (Olaremu et al., 2021), (Cortés, 2023), tales como:

- a. Los ácidos nafténicos, grasos y fenoles.
- b. Ácidos aparecidos en los destilados después de la depuración con ácido sulfúrico. Dentro de estos se pueden encontrar el ácido sulfúrico libre, ésteres ácidos del ácido sulfúrico, ácidos sulfónicos, etc.
- c. Sulfuro de hidrógeno y mercaptanos inferiores.

La extracción de ácidos nafténicos (RCOOH) se basa en la siguiente reacción de neutralización:



La sal sódica de ácido nafténico (RCOONa) que se forma permanece en la fase acuosa,

dejando así la fase orgánica, ya que las dos fases, orgánica y acuosa, son inmiscibles. Esta reacción ocurre rápidamente en un amplio intervalo de temperatura y es prácticamente independiente de la presión de operación. La extracción mejora con una elevada concentración de sosa pero a su vez aumenta la posibilidad de arrastres de sosa. También una elevada concentración de sosa da paso a la formación de emulsiones estables por lo que se recomienda utilizar bajas concentraciones de sosa (Cortés, 2023). Cuando el sulfuro de hidrógeno (H_2S) se absorbe en una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH), se considera que ocurren dos reacciones que tienen lugar en la fase líquida de la siguiente manera (Camizán, 2015), ecuaciones 2 y 3.



Los mercaptanos (R-SH) reaccionan con el álcali formando los mercaptidos (R-SNa) (Pino et al., 2020), ecuación 4.



Esta reacción se ve limitada con el aumento de la cadena carbonada debido a la disminución de las propiedades ácidas de estos compuestos.

Para obtener la cinética de las reacciones que tienen lugar en las etapas de neutralización de los procesos estudiados fue necesario, primeramente, realizar la simulación de la unidad de Destilación Atmosférica (S-100), para obtener la composición de la materia prima de la unidad de fraccionamiento de gases (S-400) y la planta de tratamiento cáustico del Jet-A1. Esto se debe a que en la refinería entra una gran variedad de crudos provenientes de diferentes lugares del mundo como Venezuela, Rusia y Argelia, estos son: Mesa 30 (Me30), Merey 16 (Me16), Ural (U), Sahara (S), Lagomar (L), entre otros, y estos son mezclados en diferentes proporciones, por consiguiente, la composición química de la NVLI y el turbo-combustible varían según la mezcla de crudo que se procese.

2.1. Simulación de la Sección-100

Para la simulación de la sección de la unidad de Destilación Atmosférica (S-100) para obtener la composición de la materia prima de la S-400 y la planta de tratamiento cáustico del turbo-combustible, de donde sale la NVLI y el turbo-combustible, se utilizó el simulador de procesos Petro-SIM. Este simulador, ampliamente utilizado en la simulación de procesos en refinerías de petróleo, tiene una interfaz completamente interactiva. Se pueden manipular fácilmente las variables del proceso y topología de operación de la unidad (KBC, 2005). Además, contiene el paquete termodinámico utilizado para estos tipos de procesos, el Peng-Robinson.

Las características de las corrientes de entrada se introducen en el simulador a través de la información brindada en el Assay del crudo y, las proporciones en que se mezclan los crudos, se introducen como se muestra en la figura 1.

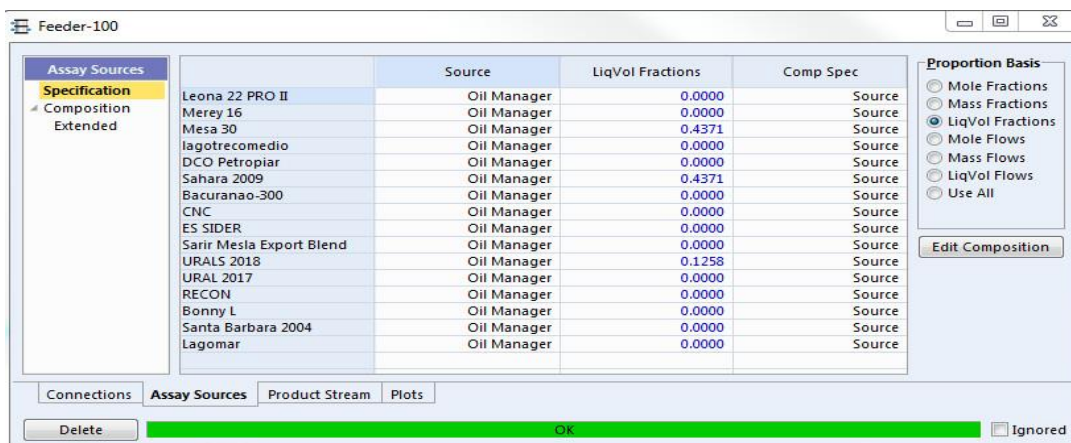


Figura 1. Ventana para introducir las proporciones de la mezcla de crudos.

Fuente: Cortés (2023)

Para obtener la constitución de los compuestos sulfurosos en la alimentación de la S-400 y la planta de tratamiento cáustico del Jet-A1 se simularon las mezclas que se muestran en la tabla 1 y 2.

Tabla 1. Proporciones de los crudos utilizados en el análisis de la NVLI

Crudo	Mezclas (% vol)									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Me30	100		54,65	25,25	43,71	19,13		57,8		73,21
Me16								12,78	30,04	
U		100	45,35		12,58	25,57	16,37			
S				74,75	43,71	10,9	5,56	29,94	69,96	
L						44,40	78,07			26,79

Tabla 2. Proporciones de los crudos utilizados en el análisis del turbo-combustible

Crudo	Mezclas (% vol)						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Me30	73,14	19		60,86	100		23,06
Me16		5	30,24				
S	26,86	76	69,76				23,06
L				39,14		100	53,88

2.2 Análisis de las etapas de neutralización

En los sistemas estudiados, el principal objetivo es disminuir el consumo de sosa cáustica y el costo total de producción unitario sin afectar la calidad de los productos finales. En estas etapas se mezclan la materia prima con sosa cáustica dando lugar a las reacciones de neutralización del H_2S , los mercaptanos ($R-SH$) y los ácidos nafténicos ($RCOOH$). En consecuencia, es necesario determinar, en primer lugar, las velocidades de reacción para cada una de las reacciones involucradas partiendo de la cinética pues ellas rigen el proceso. En este caso se tiene como dato experimental, obtenidos de los análisis del Laboratorio Central de la refinería, las concentraciones iniciales de sosa cáustica, así como el tiempo de agotamiento de esta, por lo que se puede obtener la

velocidad de agotamiento experimental de la sosa. Con estas velocidades de agotamiento, las concentraciones iniciales obtenidas en la simulación de H_2S , $R-SH$ y $RCOOH$, las expresiones generales de velocidad de reacción y la ecuación de Arrhenius (ecuación 5), se puede obtener el modelo matemático que define la velocidad de reacción de la sosa con estos dos compuestos sulfurosos, para estos sistemas de neutralización en particular.

$$K = k_0 e^{(-E_a/RT)} \quad (5)$$

Se obtendrán las ecuaciones de la cinéticas de la reacciones de neutralización utilizando el método diferencial que tiene como base las velocidades reales de las reacciones y mide las pendientes de las curvas concentración – tiempo. Esto permite que la modelación matemática tenga la posibilidad real de ser utilizada en estudios de procesos con reacción química (Pérez et al., 2022).

Estos sistemas son de reacciones irreversibles bimoleculares, con concentraciones diferentes iniciales de los reactantes. Entonces la ecuación cinética es del tipo (6):

$$(-r_{NaOH}) = k C_i^p C_{NaOH}^q \quad (6)$$

Donde $(-r_{NaOH})$ es la velocidad de agotamiento de la sosa en la reacción con H_2S , $R-SH$ y $RCOOH$, k la constante de velocidad, C_i son as concentraciones de H_2S , $R-SH$ y $RCOOH$ y C_{NaOH} es la concentración de $NaOH$.

Sustituyendo la ecuación 5 en la ecuación 6 y aplicando logaritmos a esta expresión se obtiene la (7):

$$\ln(-r_{NaOH}) = \ln k_0 + p \ln C_i + q \ln C_{NaOH} - \frac{E_a}{RT} \quad (7)$$

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (8)$$

Para el estudio, se codifican los valores de la variable temperatura, lo que facilita el procesamiento de los datos experimntales y en todos los casos se toman valores de 1 para altas temperaturas y -1 para bajas temperaturas. La única solución se obtiene mediante regresión polinomial.

$$\sum y = n a_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \quad (9)$$

$$\sum x_1 y = a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 \quad (10)$$

$$\sum x_2 y = a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^2 \quad (11)$$

El sistema de ecuaciones a resolver es:

$$\begin{vmatrix} n & \sum x_1 & \sum x_2 \\ \sum x_1 & \sum x_1^2 & \sum x_1 x_2 \\ \sum x_2 & \sum x_1 x_2 & \sum x_2^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum y \\ \sum x_1 y \\ \sum x_2 y \end{vmatrix} \quad (12)$$

Este sistema de ecuaciones se puede resolver recurriendo a los métodos numéricos. En este caso se utilizó el software MATLAB® pues este contiene un conjunto de herramientas que permiten resolver todo tipo de sistemas de ecuaciones. Después de obtenidos los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 se sustituyen en la expresión general y se tiene la expresión de la cinética de la reacción que se está analizando. Para comprobar la adecuación de los modelos se calculó el porcentaje de desviación a través de la ecuación 13.

$$\% \text{ desv.} = \left| \frac{\ln(-r_{\text{NaOH}})_{\text{calculado}} - \ln(-r_{\text{NaOH}})_{\text{experimental}}}{\ln(-r_{\text{NaOH}})_{\text{experimental}}} \right| * 100 \quad (13)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características de las corrientes de entrada

Las características de las corrientes de entrada se introducen en el simulador utilizando la información brindada en el Assay del crudo y las proporciones en que se mezclan los crudos. Después de haber corrido las diferentes mezclas de crudo se obtuvieron como resultado las composiciones de compuestos sulfurosos de la NVLI y del turbo-combustible, alimentación de la S-400 y la planta de tratamiento cáustico del Jet-A1 respectivamente. Las tablas 3 y 4 muestran la caracterización de estos productos para las diferentes mezclas de crudo.

Tabla 3. Composición de compuestos sulfurosos en la NVLI

<i>Propiedad</i>	<i>Mezclas</i>									
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>	<i>M5</i>	<i>M6</i>	<i>M7</i>	<i>M8</i>	<i>M9</i>	<i>M10</i>
Mercaptanos (% peso)	0	3,6 ⁻³	1,6 ⁻³	0	3,0 ⁻⁴	0	0	0	1,0 ⁻⁴	0
Azufre (% peso)	2,0 ⁻³	5,5 ⁻³	3,6 ⁻³	1,9 ⁻³	2,3 ⁻³	2,3 ⁻³	1,7 ⁻³	2,9 ⁻³	3,8 ⁻³	1,7 ⁻³

Tabla 4. Composición de compuestos sulfurosos en el turbo-combustible

<i>Propiedad</i>	<i>Mezclas</i>						
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>	<i>M5</i>	<i>M6</i>	<i>M7</i>
Mercaptanos (% peso)	0,0005	0,0002	0,0005	0	0,0008	0	0
Azufre (% peso)	0,0632	0,0237	0,0446	0,1041	0,0893	0,1241	0,0876
Acidez (mg KOH/g)	7,21 ⁻²	2,07 ⁻²	2,09 ⁻²	7,38 ⁻²	0,1033	3,38 ⁻²	3,99 ⁻²

Con estos datos y los obtenidos en los análisis de laboratorio en cuanto a la concentración de sosa cáustica, se procede a la obtención de la cinética de las reacciones que tienen lugar en las etapas de neutralización estudiadas.

3.2 Neutralización de la NVLI

Reacción con H₂S

Partiendo de los datos iniciales que se muestran en la tabla 5 y aplicando regresión polinomial (ecuación 12) se obtuvo que:

$$a_0 = \ln k_0 = -9,19 \quad a_1 = p = 0,4 \quad a_2 = q = 3,95 \quad a_3 = -Ea/R = -0,02$$

Quedando la expresión cinética como muestra la (14):

$$(-r_{NaOH})_1 = 1,02 * 10^{-4} * e^{(-0,02/T)} * C_{H_2S}^{0,4} * C_{NaOH}^{3,95} \quad (14)$$

Tabla 5. Datos experimentales iniciales para la reacción con H₂S

$\ln(-r_{NaOH})$	$\ln(C_{H_2S})$	$\ln(C_{NaOH})$	$1/T$
-7,05	-7,82	1,35	1
-6,86	-7,81	1,38	-1
-7,51	-7,90	1,21	-1
-6,96	-7,91	1,36	1
-7,06	-8,03	1,34	1
-7,69	-8,02	1,16	-1

Reacción con R-SH

Utilizando los datos que se muestran en la tabla 6:

Tabla 6. Datos experimentales iniciales para la reacción con R-SH

$\ln(-r_{NaOH})$	$\ln(C_{R-SH})$	$\ln(C_{NaOH})$	$1/T$
-8,44	-12,11	1,21	1
-7,48	-7,87	1,36	-1
-5,49	-8,78	1,20	1
-10,22	-10,96	1,43	-1

Se obtuvo:

$$a_0 = \ln k_0 = -0,67 \quad a_1 = p = 0,896 \quad a_2 = q = 1,27 \quad a_3 = -Ea/R = 1,53$$

Quedando la expresión cinética de la siguiente manera (15):

$$(-r_{NaOH})_2 = 0,51 * e^{(1,53/T)} * C_{R-SH}^{0,896} * C_{NaOH}^{1,27} \quad (15)$$

En este proceso, teniendo en cuenta que $R = 8,31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$, la energía de activación de la primera reacción es $Ea_1 = 0,827 \text{ J/mol}$ y de la segunda es $Ea_2 = 2,674 \text{ J/mol}$. Al comparar los valores de las energías de activación se puede determinar que el NaOH tiene mayor afinidad con el H₂S que con los mercaptanos. La eficiencia de absorción de

H₂S permanece cercana al 100 % hasta que la solución de NaOH se agota casi por completo.

3.3 Desulfuración del turbo-combustible

Reacción con H₂S

Aquí ocurre lo mismo que en la neutralización de la NVLI, es decir, la etapa controlante de la reacción es la segunda. Entonces, utilizando los datos de la tabla 7 y siguiendo el mismo procedimiento se obtiene que:

$$a_0 = \ln k_0 = 5,83 * 10^{-5} \quad a_1 = p = 1,22 \quad a_2 = q = 3,94 \quad a_3 = -Ea/R = -0,03$$

Por tanto:

$$(-r_{NaOH})_3 = 1,000058 * e^{(-0,03/T)} * C_{H_2S}^{1,22} * C_{NaOH}^{3,94} \quad (16)$$

Tabla 7. Datos experimentales iniciales para la reacción con H₂S

$\ln(-r_{NaOH})$	$\ln(C_{R-SH})$	$\ln(C_{NaOH})$	$1/T$
-8,1996	-4,2080	-0,7765	-1
-8,0062	-3,6998	-0,8675	1
-7,5190	-3,8568	-0,7134	-1
-9,3230	-5,1996	-0,7339	1
-9,9490	-4,5662	-1,1087	-1
-6,9572	-3,5312	-0,6539	1

Reacción con R-SH

Utilizando los datos que se muestran en la tabla 8:

Tabla 8. Datos experimentales iniciales para la reacción con R-SH

$\ln(-r_{NaOH})$	$\ln(C_{R-SH})$	$\ln(C_{NaOH})$	$1/T$
-8,5258	-9,6395	-0,77	1
-8,3986	-10,5659	-0,73	-1
-9,3618	-9,6458	-1,10	-1
-8,0185	-9,1629	-0,71	1

Se obtuvo que:

$$a_0 = \ln k_0 = 1,96 * 10^{-6} \quad a_1 = p = 0,545 \quad a_2 = q = 3,91 \quad a_3 = -Ea/R = -0,23$$

Por tanto:

$$(-r_{NaOH})_4 = 1,0000019 * e^{(-0,23/T)} * C_{R-SH}^{0,545} * C_{NaOH}^{3,91} \quad (17)$$

Reacción con RCOOH

Utilizando los datos que se muestran en la tabla 9:

Tabla 9. Datos experimentales iniciales para la reacción con RCOOH

$\ln(-r_{NaOH})$	$\ln(C_{R-COOH})$	$\ln(C_{NaOH})$	1/T
-8,5392	-32,0701	-0,77	-1
-8,3288	-32,0663	-0,86	1
-8,4466	-31,9983	-0,71	-1
-8,1967	-32,1885	-0,73	1
-8,9659	-32,1881	-1,10	-1
-8,0934	-32,1583	-0,65	1

Se obtuvo que:

$$a_0 = \ln k_0 = -1,15 * 10^{-7} \quad a_1 = p = 0,23 \quad a_2 = q = 1,20 \quad a_3 = -E = 0,15$$

Por tanto:

$$(-r_{NaOH})_5 = 0,99 * e^{(0,23/T)} * C_{RCOOH}^{1,20} * C_{NaOH}^{0,15} \quad (18)$$

Las energías de activación de las reacciones que tienen lugar son $E_{a3} = 0,546$ J/mol, $E_{a4} = 0,544$ J/mol y $E_{a5} = 0,535$ J/mol. Comparando los 44 valores obtenidos se observa que los ácidos nafténicos necesitan menor energía que el resto de las reacciones.

En la tabla 10 se muestra el promedio de los porcentajes de desviación para cada ecuación cinética calculada.

Tabla 10. Por ciento de desviación

Ecuación cinética	% Desviación
$(-r_{NaOH})_1$ Ec. 14	0,67
$(-r_{NaOH})_2$ Ec. 15	0,28
$(-r_{NaOH})_3$ Ec. 16	$4,67^{-3}$
$(-r_{NaOH})_4$ Ec. 17	$2,65^{-3}$

En los dos procesos analizados los porcentajes de desviación de las velocidades de reacción tienen valores bajos. Por tanto, se considera que los modelos obtenidos de la cinética son adecuados y pueden utilizarse en el análisis de estos procesos.

4. CONCLUSIONES

1. Las expresiones cinéticas obtenidas a partir de datos del control operacional de una unidad de procesos, describen adecuadamente las reacciones que transcurren en la instalación.
2. El análisis de las expresiones cinéticas obtenidas a través del método diferencial permiten afirmar que el orden de las reacciones de neutralización de la NVLI y el turbo-combustible están en el intervalo de 1,35 a 5,16.
3. La energía de activación de todas las reacciones químicas estudiadas están por debajo de 1 J/mol por lo que se necesita poco tiempo para que ocurran las reacciones, lo que concuerda con lo reportado en la literatura.
4. Las cinco ecuaciones cinéticas de las etapas de neutralización de la NVLI y el

turbo-combustible presentan, en todos los casos, porcentajes de desviación con respecto a los datos experimentales por debajo del 1 % lo que demuestra su validez.

REFERENCIAS

- Alemán, L., Hernández, C. B., Santos, R., Fleites, Y., & González, E. (2021). Optimización de la ganancia en una instalación industrial mediante inversiones que incrementen su disponibilidad operativa. *Tecnología Química*, 41(2), 296-310. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v41n2/2224-6185-rtq-41-02-296.pdf>
- Alemán, L., Muto, D., González, E., & Hernández, C. B. (2022). Procedimiento para minimizar costos e prazo de investimento em uma Refinaria de Petróleo. *Universidade y Sociedad*, 14(3), 373–381. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2881>
- Bonachea, M., Pérez, O., Pedraza, J., & González, E. (2021). Procedimiento de evaluación y adaptación de tecnología para el incremento de la producción de líquido asfáltico. *Centro Azúcar*, 48(3), 98-107. https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/670
- Camizán, A. J. (2015). *Estudio del tratamiento de emisiones gaseosas de sulfuro de hidrógeno a nivel piloto e industria*. [Tesis de Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://core.ac.uk/download/pdf/323348105.pdf>
- Cortés, R. (2023). *Intensificación de procesos para disminuir la generación de agua sulfurosa alcalina en la Refinería Cienfuegos S.A.* [Tesis de Doctorado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba].
- Cortés, R., Concepción, D. N., Ramos, F., López, E. J., & González, E. (2021a). Los métodos de investigación científica y la interdisciplinariedad en la intensificación industrial: impacto económico y social. *Universidade y Sociedad*, 13(3), 110-117. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000300110
- Cortés, R., Font, D. Y., Lobelles, G. O., González, E., & Ramos, E. (2021b). Mejoras operacionales para disminuir efluentes sulfurosos alcalinos en la Refinería Cienfuegos S.A. *Centro Azúcar*, 48(2), 78-88. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/656
- Cortés, R., Lobelles, G. O., & López, E. J. (2019). Propuesta de mejora tecnológica en la recuperación de azufre de la refinería de petróleo de Cienfuegos. *Tecnología Química*, 39(1), 160-182. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v39n1/2224-6185-rtq-39-01-160.pdf>
- Graaff, M. D., Bijmans, M. F. M., Abbas, B., Euverink, G.J., Muyzer, G., & Janssen, A. J. H. (2011). Biological treatment of refinery spent caustics under halo-alkaline conditions. *Bioresource Technology*, 102(15), 7257-7264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.095>
- KBC, A. T. (2005). Petro-SIM. User Guide. United Kingdom: KBC Process Technology Plc. <https://www.kbc.global/resources/downloads/petro-sim-upstream-and-midstream.pdf>
- Ketu, J. (2013). *Treatment and Disposal of Spent Caustic at Tema Oil Refinery*. M.S. thesis [Tesis de Maestría, Universidad de Ciencia y Tecnología Kwame
-

- Nkrumah]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108851061>
- Medina, A. A., Díaz, C. E., López, N., & González, E. (2023). Impacto de variar la mezcla sobre los resultados del proceso de destilación en la Refinería Sergio Soto. *Centro Azúcar*, 50(2), e1014. https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/2019-01-01/850
- Olaremu, A. G., Adedoyin, W. R., Ore, O. T., & Adedapo, O. (2021). Sustainable development and enhancement of cracking processes using metallic composites. *Applied Petrochemical Research*, 11, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s13203-021-00263-1>
- Pérez, O., González, E., Martí, C. A., Guzmán, M., & Albernas, Y. (2022). Contribución metodológica de la modelación matemática de reactores químicos y biológicos al desarrollo de procesos. *Universidad y Sociedad*, 14(1), 618-630. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2594>
- Pino, E., Montalvo, S., Huiliñir, C., Cubillos, F., & Gacitúa, J. (2020). Characteristics and Treatment of Wastewater from the Mercaptan Oxidation Process: A Comprehensive Review. *Processes*, 8(4), 425. <https://doi.org/10.3390/pr8040425>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Roxana Cortés Martínez. Investigación, software, conservación de datos, redacción - primera redacción, visualización.
 - Dr.Sc. Erenio González Suárez. Conceptualización, metodología, supervisión.
 - Dr.C. Fernando Efren Ramos Miranda. Gestión de proyectos, redacción - revisión y edición.
-