

# EVALUACIÓN DE LA BAUXITA COMO DECOLORANTE DE ALQUILATOS EN UNA PLANTA PILOTO Y ESCALAMIENTO INDUSTRIAL DEL PROCESO DE ADSORCIÓN

## EVALUATION AS BLEACHING ALKYLATE BAUXITE IN A PILOT PLANT AND INDUSTRIAL PROCESS SCALE UP ADSORPTION

**Carlos Hernández <sup>(1)</sup>, Edgar Morán <sup>(1)</sup>, Zulay Niño-Ruiz <sup>(2)</sup>, y Alberto Mieres-Pitre <sup>(1)</sup>.**

*(1) Escuela de Ing. Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela, Ecuador, email: carherna@uc.edu.ve; carherna02@gmail.com*

*(2) Departamento de Investigación. Universidad Estatal de Bolívar, e-mail: znino@uc.edu.ve*

---

**Resumen:** *el objetivo de la investigación fue evaluar en una planta piloto, el comportamiento de la bauxita como decolorante de alquilatos y hacer el escalamiento industrial del proceso de adsorción. Se determinó la relación de absorbancia por espectroscopía UV-visible, tensión interfacial, humedad Karl Fisher, tensión de ruptura y factor de potencia, utilizando normas Covenin y Fondonorma, para tiempos de regeneración de bauxita (TRB) de 4 y 8 horas, para un total de 9 regeneraciones. El escalamiento industrial se realizó con los datos obtenidos en planta piloto, siguiendo el método de similitud geométrica. El diseño industrial de la columna de adsorción arrojó que la misma debe tener una altura total de 12,5330 metros. Las variables utilizadas para la evaluación de la bauxita, indicaron la efectividad en la remoción de los elementos que aportan color en el alquilato, siendo el TRB de 8 horas el más conveniente.*

**Palabras clave:** *bauxita, alquilatos, planta piloto, escalamiento, adsorción.*

**Abstract:** *the objective of the research was to evaluate in a pilot plant, bauxite behavior as bleaching alkylate and make industrial upgrading of the adsorption process. The ratio of absorbance spectroscopy UV-visible, interfacial tension, moisture Karl Fisher, breakdown voltage and power factor was determined using Covenin and Fondonorma standards, for regeneration times bauxite (TRB) of 4 and 8 hours for a total 9 regenerations. Industrial upgrading was performed using data from pilot plant, following the method of geometric similarity. The industrial design of the adsorption column showed that it must have an overall height of 12.5330 meters. The variables used for the evaluation of bauxite, indicated the effectiveness in removing the elements that will color in the alkylate, being the TRB 8 hours more convenient.*

**Keywords:** *bauxite, alkylates, pilot plant, scale up, adsorption.*

---

## I. INTRODUCCIÓN

La bauxita fue identificada por primera vez en 1821 por Berthier en la localidad de Le Baux en el sur de Francia y es en cierta forma una alúmina hidratada natural que debe activarse mediante la aplicación de calor a temperaturas que varían entre 450 a 1500°F, con el fin de recuperar su capacidad de adsorción. Se utiliza para decolorar productos del petróleo y para secar gases; se puede regenerar con calor para su reutilización (Treybal, 1998).

La adsorción de contaminantes de un líquido en un adsorbente es un fenómeno de superficie que alcanza un punto de equilibrio y que sigue una determinada trayectoria cinética para alcanzarlo. El primer paso de este fenómeno involucra la difusión del soluto (en este caso el contaminante) en la estructura porosa del adsorbente. Las moléculas del soluto son atraídas a la superficie interna de los poros por fuerza que pueden ser debidas a atracciones electrostáticas débiles (fuerzas de Van der Waals), en cuyo caso se habla de adsorción física, la cual es reversible; o pueden ser de tipo químico, las cuales son mucho más fuertes que las anteriores, en cuyo caso se habla de una adsorción química, la cual es irreversible. La adsorción puede realizarse en continuo o por lotes (Trejo y Hernández, 2007). En un sistema de lecho fijo son importantes las resistencias a la transferencia de masa, siendo que la eficiencia de este método dependerá de la dinámica global del sistema, y no sólo de las consideraciones de equilibrio (Geankoplis, 2003).

Se define como Planta Piloto al proceso que consiste en partes específicas ensambladas que operan como un todo armónico con el propósito de reproducir, a escala, procesos productivos. También facilita la posterior operación y aplicación a nivel industrial o en algún área de trabajo determinada; sirve además para la confrontación de la teoría (modelos) con la práctica y la experimentación en las áreas del conocimiento antes mencionadas (Baasel, 1990). El escalamiento es el proceso mediante el cual se desarrollan los criterios y las reglas de asignación numérica que determinan las unidades de medida significativas para llevar de un tamaño dado a otro tamaño mayor o menor una

operación u objeto. Escalar un proceso o equipo es convertirlo de su escala de investigación (laboratorio o piloto) a escala industrial (Anaya y Pedroza, 2008).

Villanueva (2011) trabajó en el escalamiento de un proceso de adsorción para hidrocarburos pesados y regeneración del adsorbente. El objetivo principal fue el escalamiento de la unidad de adsorción dinámica para la remoción de compuestos nitrogenados en el gasóleo pesado. La metodología empleada para el cambio de escala se basó en la teoría de Vermeulen y sus colaboradores, dejando la velocidad espacial fija y manteniendo constante la relación gasóleo-adsorbente, para lo que se obtuvo una alta correspondencia teórico experimental, con una desviación menor al 10% entre el valor mínimo esperado y el alcanzado.

En el proceso de alquilación, se obtienen alquilbenceno lineal (LAB) y ramificado (BAB), haciendo reaccionar benceno con olefinas lineales (OLP) ó ramificadas (PTM), en presencia de ácido fluorhídrico (HF) como catalizador, éstos son separados como alquilatos livianos y pesados, que pueden ser lineales o ramificados según las olefinas que se empleen como materia prima. Los alquilbencenos son utilizados como materia prima para la elaboración de detergentes sintéticos, previa sulfonación y neutralización, con una base fuerte como el sulfonato de sodio, que es el más utilizado. Los alquilatos tienen bajo rango de aplicación industrial debido al gran contenido de sustancias que aportan color y polaridad, convirtiéndolos en hidrocarburos de bajo valor comercial y físicamente poco atractivos, ocasionando problemas en su comercialización como materia prima de otros productos. Es por ello que es de suma importancia el blanqueo y tratamiento a mayor medida de estos productos para lograr satisfacer las necesidades de sectores industriales dedicados a la fabricación de gran número de productos en el ramo de aceites lubricantes especiales, entre otros, mejorando así la comercialización de los alquilatos (Morán, 2013). En tal sentido, el objetivo de esta investigación fue caracterizar la bauxita como adsorbente de elementos que aportan color a los alquilatos, utilizando una columna de adsorción a escala piloto y hacer el escalamiento industrial del sistema partiendo de los datos recogidos.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Características de la planta piloto

La planta piloto que se empleó para el desarrollo de las pruebas de adsorción cuenta con un sistema de control automático, manejado por un software, de las variables de proceso tales como temperatura de la torre, presión del sistema, flujo másico de la sustancia, control de nivel en el separador, así como también cuenta con balanzas en los tanques de almacenamiento y recepción de producto procesado. La Fig. 1, muestra los equipos instalados en la planta piloto: (1) tanque de almacenamiento de materia prima, (2) sistema de bombeo, (3) columna empacada, (4) separador líquido-gas y (5) tanque recolector de producto tratado.

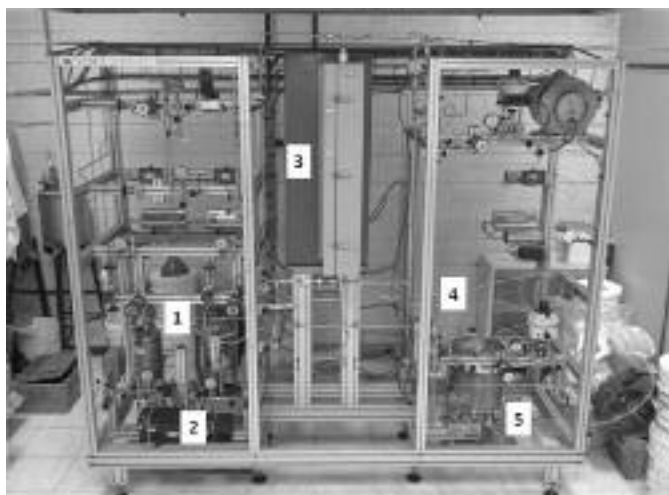


Fig. 1. Planta piloto empleada para las pruebas de caracterización de bauxita

El tanque de almacenamiento de materia prima tiene una capacidad de 10 L y cuenta con una balanza electrónica con capacidad máxima de 34 kg para registrar

la masa durante su operación. El sistema de bombeo consta de una bomba de desplazamiento positivo, que puede manejar un caudal de (48 - 480) cm<sup>3</sup>/h; adosado a la descarga de la bomba se cuenta con un controlador de flujo másico programable en un rango entre (0 - 425) g/h.

La columna empacada es un cilindro de acero inoxidable (AISI 316) cuya temperatura máxima de operación es de 350 °C. Cuenta con aislamiento térmico y un sistema de calentamiento por resistencia eléctrica controlado por el software. El separador líquido-gas consta de un recipiente cilíndrico con un sistema de control por presión diferencial que permite la separación del líquido, a la salida de la torre empacada, del gas inerte empleado para presurizar el sistema. Dicho control se hace en conjunto a una válvula automática colocada en la línea de fondo del separador, que dirige el producto de fondo hacia el tanque de almacenamiento de producto tratado. En la línea del tope del separador líquido-gas se encuentra un indicador de presión y luego una válvula automática que regula la presión del sistema, ambos conectados al equipo de control principal manejado por el software. El tanque recolector de producto tratado posee una capacidad de 20 litros y cuenta con una balanza electrónica con capacidad máxima de 34 kg.

### B. Establecimiento y selección de las variables operacionales y la variable de control del experimento

De las investigaciones de López (2009) y Meier (2012) se tomaron las variables operacionales, que por experiencia previa son las condiciones ideales para que el sistema funcione de la mejor manera. La Tabla I, presenta las condiciones para la experimentación.

TABLA I.  
CONDICIONES OPERACIONALES EMPLEADAS EN EL EXPERIMENTO  
DE TORRE DE ADSORCIÓN

Variable	Condición operacional
Presión del sistema (P±0,1) bar	15,0
Flujo másico ( $\dot{m}$ ±1) g/h	50
Temperatura del sistema (T±0,1) °C	80,0
Tiempo de operación (t±1) h	60

*C. Procedimiento utilizado en el proceso adsorción en la planta piloto*

Las pruebas de adsorción de alquilatos con el relleno seleccionado permitieron determinar su capacidad y eficiencia como agente adsorbente en el blanqueo de estos hidrocarburos. El procedimiento que se cumplió fue el siguiente:

1. Se pesó en la balanza analítica la cantidad de relleno a ser empacado en la torre. Se activó el relleno colocándolo a la temperatura de 250 °C en una estufa para eliminarle la humedad. Junto al relleno también se secan las perlas de vidrio usadas como soporte.
2. Se empacó la torre de la planta piloto, asegurándose que el relleno quede en el centro de la torre. Para ello se usó como soporte perlas de vidrio y lana de vidrio para mantener el relleno junto y evitar que se permee entre las perlas.
3. Se cargó el tanque de alimentación con alquilato virgen, garantizando que tenga una humedad Karl Fisher menor a 10 mg/kg.
4. Mediante la presurización con gas nitrógeno UAP del sistema, se verificó la no existencia de fugas en las uniones e instrumentos de la planta piloto.
5. Se programó una rampa de calentamiento de 210 °C/h hasta alcanzar dicha temperatura en la columna empacada y se mantuvo durante tres horas junto a un

flujo de nitrógeno UAP de 5 NI/h a una presión de 2 barg.

6. Con la ayuda del software de control se fijaron las variables operacionales, presión y flujo de nitrógeno UAP, flujo de alquilato, temperatura de la torre, y nivel de líquido en el separador. Se encendió la bomba y se estabilizó la presión de bombeo con ayuda de la válvula reguladora dispuesta en la línea de retorno al tanque de alimentación.
7. Se operó de forma continua tomando muestras del producto tratado hasta que se cumplió el tiempo estipulado para la prueba. Por último se midió la absorbancia a 386 nm de longitud de onda empleando el espectroscopio de absorción.
8. Se detuvo operación de la planta piloto, cerrando el flujo de alquilato, al igual que el flujo de nitrógeno UAP y apagando el calentamiento de la torre. Se secó el relleno a una temperatura aproximada de 100 °C durante cuatro horas, empleando una estufa. Usando una cápsula de porcelana resistente a altas temperaturas, se regeneró el relleno durante un tiempo estipulado, a una temperatura no menor a 700 °C, empleando una mufla de incineración. Se dejó enfriar la cápsula con el relleno regenerado y se pesó de nuevo en la balanza analítica.

El experimento anterior se aplicó a dos porciones distintas del mismo relleno, que en lo sucesivo se denominaran pruebas A1 y pruebas A2. Las condiciones

de operación para cada serie fueron idénticas, la diferencia es el tiempo empleado para la regeneración del adsorbente, que en el caso de las pruebas A1 fue de cuatro horas y para las pruebas A2 fueron ocho horas de incineración en la mufla. Esto con la finalidad de determinar la influencia de la duración del proceso de regeneración en la eficiencia de la bauxita. Cada experimento involucró un total de 10 corridas con una duración de 60 horas de operación continua, representando nueve regeneraciones del adsorbente. Las muestras, conformadas por una porción aproximada de 30 mL, fueron analizadas con el espectrofotómetro para medir su absorbancia a 386 nm y determinar así la diferencia respecto al alquilato sin tratamiento. De acuerdo a ensayos realizados por Morán (2013), 386 nm es la máxima longitud de onda encontrada en la medición de la absorbancia de las muestras de alquilato. Igualmente, Morán (2013) determinó a través de una correlación entre la determinación del color Saybolt y la absorbancia, que la técnica de espectroscopía para la determinación del color es muy útil y confiable.

Después de completar cada una de las corridas, la muestra resultante de alquilatos tratados y recogidos en el tanque de producto terminado de la planta piloto, fueron pre tratadas antes de ser analizadas con cada uno de los métodos estándares. El tratamiento se basó en un filtrado al vacío empleando filtros de papel de  $8,0 \mu\text{m}$  y por último secado con burbujeo de gas nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) de alta pureza. Esta última práctica se hizo con la finalidad de reducir la humedad contenida en los alquilatos. Las trazas de agua en los hidrocarburos aumentan su polaridad, lo que afecta las propiedades dieléctricas de la sustancia. Es por ello que fue preciso disminuir su contenido para eliminar la interferencia en los resultados de las pruebas. Se empleó el método Karl Fisher (NVC 1009:1982) para determinar la humedad de los alquilatos

Se procedió con los ensayos de laboratorio normalizados, para demostrar el cambio logrado en el producto tratado con el sistema de adsorción. Los análisis que se realizaron debido a la relación que guardan con las sustancias que se desean eliminar, se listan a continuación.

#### *D. Espectroscopía UV-visible*

Es una técnica instrumental que tiene por objeto determinar la absorción de luz visible por una muestra, que puede ser una sustancia pura o bien una mezcla o disolución, a una longitud de onda determinada. El instrumento que se utilizó fue un espectrofotómetro, que posee: fuente de radiación (luz blanca), sistema dispersivo (rendijas de entrada y salida, y red de difracción), detector (fototubo que transforma la señal luminosa en una señal eléctrica) y sistema de medida de la absorción, una vez amplificada (convertidor digital). La absorción de radiación por una muestra en la región visible, así como en cualquier región del espectro, está regida por la ley de Beer-Lambert, que establece que la fracción de luz absorbida por una muestra es tanto mayor cuanto más grande es el número de moléculas sobre las que incide la radiación; por lo que se utilizó esta técnica para determinar la absorbancia de las sustancias presentes (cromóforos), y a su vez asociarla al contenido de las mismas, obteniéndose entonces una medida empírica del color de las muestras (Skoog et al. 2013).

#### *E. Humedad Karl Fisher*

El método se basó en una titulación potenciométrica de la muestra problema en presencia del reactivo Karl Fisher (Norma Venezolana Covenin 1009:1982).

#### *F. Tensión interfacial*

El equipo empleado fue un tensiómetro con el principio Du Nouy, según el método Determinación de la tensión interfacial del aceite frente al agua, método del anillo (Norma técnica Fondonorma 1180:2011). Esta norma establece la determinación de la tensión interfacial entre el aceite mineral y el agua, bajo condiciones de no equilibrio. La tensión interfacial se determinó midiendo la fuerza necesaria para separar un anillo plano de alambre de platino de la superficie del líquido de mayor tensión superficial; es decir, hacia arriba desde la interfase agua-aceite. Para calcular la tensión interfacial, la fuerza medida es corregida por medio de un factor calculado de forma empírica, que depende de la fuerza aplicada, las densidades del agua del aceite y las dimensiones del anillo.

### *G. Tensión de ruptura de electrodos de disco*

La tensión de ruptura es el voltaje donde se produce una descarga entre dos electrodos que se encuentran aislados con la sustancia problema. El equipo empleado fue un analizador de tensión de ruptura, “Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura en líquidos aislantes utilizando electrodos de disco” (Norma Venezolana Covenin 1403:1979).

### *H. Factor de potencia*

Se empleó el método de ensayo para determinar el factor de potencia y la constante dieléctrica de líquidos aislantes (Norma técnica Fondonorma 3832:2011). La prueba de comprobación del factor de potencia del líquido en el aceite del transformador, se aplicó a 25 °C y 100 °C, ya que esta última, en muchas ocasiones, es más sensible a los pequeños cambios que se presenten en las características del aceite.

### *I. Análisis de los datos*

Se utilizó el método de múltiples comparaciones de Tukey, el cual compara las medias para cada par de niveles de factor, utilizando un nivel de significancia por familia, para controlar la tasa de errores de tipo de I (concluir que existe una diferencia cuando no existe ninguna). El nivel de significancia por familia es la probabilidad de cometer uno o más errores de tipo I para todo el conjunto de comparaciones (Gutiérrez y De la Vara, 2008). Los resultados obtenidos del análisis de significancia con la prueba t se basaron en la existencia de diferencias significativas entre los valores absorbancia, humedad Karl Fisher, tensión interfacial, tensión de ruptura y factor de potencia a las diferentes condiciones de regeneración de la bauxita (4 y 8 horas), evaluando cuando el valor de t calculado es mayor al teórico (Miller y Miller, 2002). Este análisis solo se hizo para la prueba 10, la cual corresponde a la novena regeneración del adsorbente.

### *J. Diseño final del sistema de adsorción de lecho empacado*

El método de diseño de la torre de adsorción consiste en un escalamiento físico, tomando como referencia

la técnica de escalamiento por similitud geométrica, descrita por Anaya y Pedroza (2008). El procedimiento se basó en fijar la velocidad espacial, lo que permite mantener la relación existente entre el caudal de producto a tratar y el volumen geométrico de la sustancia adsorbente. Otro detalle importante fue que la relación diámetro/altura del relleno permanezca constante, permitiendo la proporcionalidad geométrica de la columna a diseñar con la columna empleada en la planta piloto. Las variables importantes para cumplir con el escalamiento fueron diámetro interno piloto, volumen de adsorbente, flujo másico piloto, densidad del alquilato, flujo másico de diseño y el factor de sobre diseño. Los criterios de diseño del sistema de adsorción se basan en el escalamiento proporcional de la torre piloto empleada en esta investigación. La velocidad espacial no es más que la cantidad de sustancia en la alimentación que puede tratarse por unidad de tiempo medidos en volúmenes del empaque. La forma más sencilla de calcularlo es dividiendo el caudal de la sustancia a tratar entre el volumen geométrico del empaque, dando como unidad el recíproco del tiempo (Smith, 2001). La relación de diámetro/altura del empaque es la herramienta para mantener la geometría dimensional del empaque dentro de la torre. Se calcula dividiendo el diámetro del empaque o el diámetro interno de la torre entre la altura de dicho empaque en unidades equivalentes, lo que da un factor adimensional.

Para llevar a escala industrial la torre empacada se consideraron constantes la velocidad espacial y la relación diámetro/altura del sistema piloto, y con la capacidad de producción requerida de alquilatos tratados se obtuvo el dimensionamiento final del sistema de adsorción. La capacidad mensual de producción deseada que debe manejar el sistema de adsorción es de 600 TM de alquilatos tratados. Basándose en esta cifra y partiendo de la premisa de jornadas laborales de 16 horas diarias con 20 días de trabajo mensual, se estimó un flujo másico de 1875 kg/h de alquilatos tratados en el sistema a ser escalado.

La velocidad espacial se calculó convirtiendo el flujo másico de la sustancia establecido como variable operacional en 50 g/h, en caudal mediante la densi-

dad a 25 °C de los alquilatos dada por 0,8526 g/mL, determinada según el método estándar ASTM D4052-2009. El esquema del cálculo empleado para

el cambio de escala de la torre de adsorción se presenta en la Figura 2.

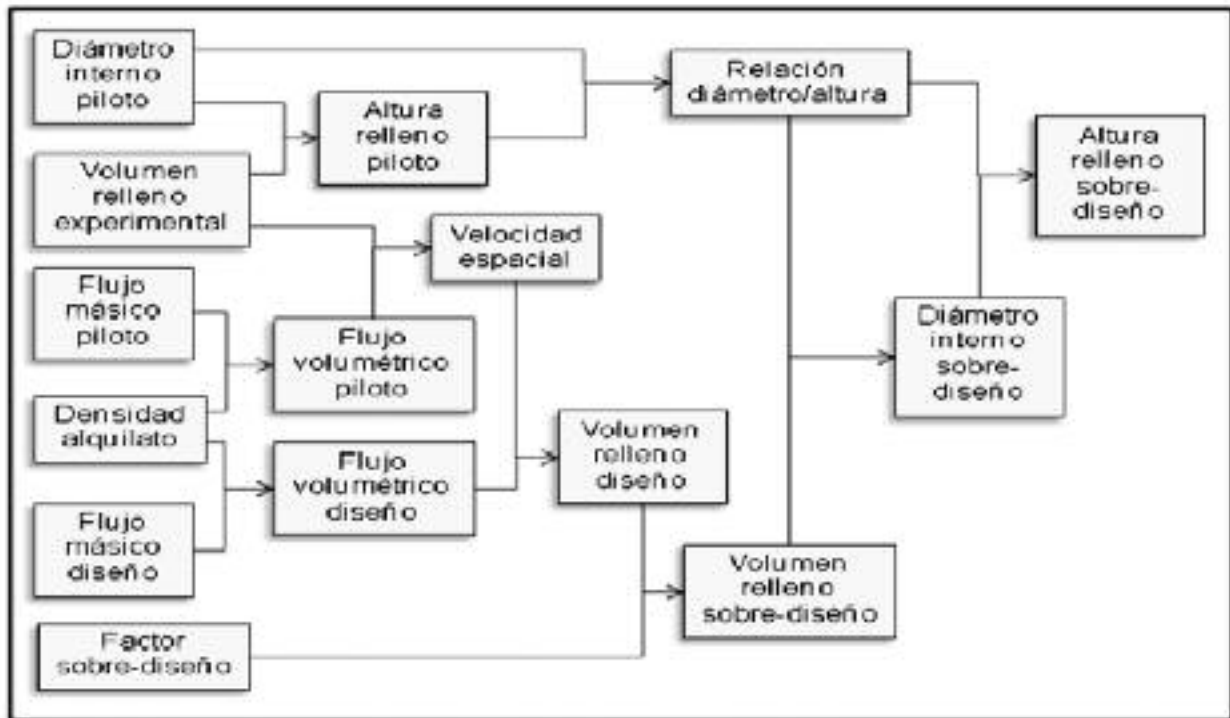


Fig. 2. Esquema de cálculo para el escalamiento de la torre de adsorción

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas realizadas en la caracterización de la bauxita fueron a 4 y 8 horas de regeneración (A1 y A2 respectivamente). En ambos grupos se evidencia una disminución del color del alquilato tratado. Se emplearon alquilatos de distintos lotes, por lo que se tienen distintos valores de color en la muestra sin tratamiento. Por otro lado, observando el comportamiento de las relaciones de absorbancias, se evidencia que a medida que transcurren las pruebas, dicho valor tiende a la unidad, lo que era de esperarse porque es indicativo del deterioro del adsorbente a medida que se somete a regeneraciones sucesivas (Trejo y Hernández, 2007). En las Tablas II y III, se muestra la relación de absorbancia para los ensayos A1 y A2.

Existe otro grupo de ensayos, que se enfoca en las características físico-eléctricas relacionadas directamente con el contenido de sustancias que aportan polaridad a los alquilatos. La tensión interfacial, de

ruptura y factor de potencia, forman parte de las pruebas aplicadas a los alquilatos antes y después de su procesamiento. En las tablas IV y V se observan los resultados obtenidos en los ensayos de tensión interfacial y de ruptura, así como también los resultados de las pruebas de humedad Karl Fisher. La humedad en todas las muestras tratadas está por debajo de 10 mg/kg, a fin de disminuir las interferencias que el contenido de agua produce. Para disminuir la humedad se debió burbujear gas nitrógeno (N<sub>2</sub>) de alta pureza e ir midiendo la humedad mediante el método Karl Fisher (NVC 1009, 1982).

Contenidos bajos de agua permanecen en solución y no cambian el aspecto de las sustancias orgánicas. Cuando el contenido de agua supera el valor de saturación, aparece agua libre en forma de turbidez o gotas decantadas. El agua disuelta afecta las propiedades dieléctricas de los aceites, lo que interfiere directamente en las medidas de estas propiedades, obteniendo valores no deseados.

TABLA II.  
 ABSORBANCIA DE LAS MUESTRAS A1  
 DE ALQUILATOS SIN TRATAR Y TRATADOS  
 CON BAUXITA

Prueba	Absorbancia a 386 nm (ABS±0,001) adim.		Relación de absorbancias (ABS/ABS <sub>0</sub> ± 0,003) adim.
	Alquilato sin tratar ABS <sub>0</sub>	Alquilato tratado ABS	
1	0,941	0,613	0,651
2	0,951	0,715	0,752
3	0,978	0,794	0,812
4	0,969	0,801	0,827
5	0,975	0,827	0,848
6	0,951	0,798	0,839
7	0,954	0,814	0,853
8	0,950	0,829	0,873
9	0,768	0,661	0,861
10	0,722	0,709	0,982

TABLA III.  
 ABSORBANCIA DE LAS MUESTRAS A2  
 DE ALQUILATOS SIN TRATAR Y TRATADOS  
 CON BAUXITA

Prueba	Absorbancia a 386 nm (ABS±0,001) adim.		Relación de absorbancias (ABS/ABS <sub>0</sub> ± 0,002) adim.
	Alquilato sin tratar ABS <sub>0</sub>	Alquilato tratado ABS	
1	0,942	0,608	0,645
2	0,954	0,697	0,731
3	0,968	0,829	0,856
4	0,975	0,856	0,878
5	0,990	0,846	0,855
6	0,950	0,823	0,866
7	0,945	0,843	0,892
8	0,761	0,721	0,947
9	0,752	0,705	0,938
10	0,727	0,691	0,950

La tensión de ruptura de un líquido aislante tiene importancia como índice de su capacidad de resistir esfuerzos eléctricos. Dicha tensión sirve también para indicar la presencia de agentes contaminantes como agua, suciedad o partículas conductoras, que pueden estar presentes cuando en las pruebas de rigidez dieléctrica se obtienen tensiones de ruptura bajas.

La tensión interfacial se relaciona con el contenido de pequeños contaminantes polares solubles y del contenido de sustancias de oxidación en el aceite. Un valor elevado indica la ausencia de dichos contaminantes. En todas las pruebas se puede observar que se incrementa la tensión interfacial en las muestras tratadas, lo que se traduce en la disminución de las sustancias polares de los alquilatos procesados con el sistema de adsorción.

La tensión de ruptura es un índice de la capacidad de la muestra de resistir esfuerzos eléctricos. Dicha tensión sirve también para indicar la presencia de contaminantes como agua, suciedad, o partículas conductoras, que pueden estar presentes cuando se registren valores bajos de este ensayo. El grupo de ensayos aplicados a las muestras tratadas revelan que en todos los casos la tensión de ruptura aumenta con relación al valor inicial obtenido de las muestras vírgenes. Este comportamiento indica que el proceso de adsorción está disminuyendo las sustancias polares presentes en los alquilatos.

TABLA IV.  
 HUMEDAD KARL FISHER, TENSIÓN  
 INTERFACIAL Y DE RUPTURA DE LAS  
 MUESTRAS A1 DE ALQUILATOS SIN TRATAR  
 Y TRATADOS CON BAUXITA

Prueba	Humedad Karl Fisher (HKF±0,1) mg/kg	Tensión interfacial (TI±0,1) Dinas/cm <sup>2</sup>		Tensión de ruptura (TR±0,1) KV	
		Secada con N <sub>2</sub>	Muestra sin tratar	Muestra tratada	Muestra sin tratar
1	7,0	48,2	51,4	30,8	46,0
2	5,0	48,2	52,0	30,8	49,2
3	4,0	46,9	53,9	37,4	47,2
4	3,0	46,9	50,6	37,4	51,2
5	3,0	46,9	51,4	37,4	50,0
6	4,1	46,9	51,1	37,4	49,4
7	4,6	46,9	49,0	37,4	48,2
8	5,8	46,9	49,5	37,4	50,0
9	5,6	44,4	52,8	39,6	45,2
10	3,9	44,4	53,8	39,6	48,0

TABLA V.  
 HUMEDAD KARL FISHER, TENSIÓN  
 INTERFACIAL Y DE RUPTURA DE LAS  
 MUESTRAS A2 DE ALQUILATOS SIN TRATAR  
 Y TRATADOS CON BAUXITA

Prueba	Humedad Karl Fisher (HKF±0,2) mg/kg	Tensión interfacial (TI±0,2) Dinan/cm <sup>2</sup>		Tensión de ruptura (TR±0,2) KV	
		Secada con N <sub>2</sub>	Muestra sin tratar	Muestra tratada	Muestra sin tratar
1	4,0	48,2	49,5	30,8	47,6
2	7,0	48,2	51,0	30,8	48,6
3	5,0	46,9	52,6	37,4	45,8
4	5,0	46,9	52,0	37,4	49,3
5	7,0	46,9	51,6	37,4	47,4
6	3,0	46,9	50,1	37,4	51,0
7	3,7	46,9	51,6	37,4	50,8
8	2,8	46,9	53,3	37,4	44,4
9	8,2	44,4	53,5	39,6	45,2
10	2,8	44,4	53,3	39,6	45,4



En las Tablas VI y VII, se muestran los resultados de los ensayos de factor de potencia a 25 °C y a 100 °C aplicados tanto a las muestras sin tratamiento como a las muestras tratadas con bauxita en la planta piloto. El factor de potencia se relaciona de forma directa con las sustancias contaminantes que aportan polaridad, humedad y pueden, de cierta manera, conducir electricidad. Valores altos indican presencia de este tipo de contaminantes. La temperatura de ensayo juega un papel importante debido a que el factor de potencia a mayor temperatura es más crítico; es por ello que en las pruebas se obtienen valores más elevados a 100 °C.

TABLA VI.

FACTOR DE POTENCIA A 25 °C Y A 100 °C DE LAS MUESTRAS A1 DE ALQUILATOS SIN TRATAR Y TRATADOS CON BAUXITA

Prueba	Factor de potencia a 25 °C (FP <sub>25°C</sub> ±0,001) %		Factor de potencia a 100 °C (FP <sub>100°C</sub> ±0,002) %	
	Muestra sin tratar	Muestra tratada	Muestra sin tratar	Muestra tratada
1	0,030	0,000	1,127	0,079
2	0,030	0,000	1,127	0,087
3	0,013	0,000	0,328	0,009
4	0,013	0,000	0,328	0,079
5	0,013	0,000	0,328	0,037
6	0,013	0,000	0,328	0,066
7	0,013	0,000	0,328	0,031
8	0,013	0,000	0,328	0,023
9	0,019	0,000	0,540	0,003
10	0,019	0,000	0,540	0,004

TABLA VII.

FACTOR DE POTENCIA A 25 °C Y A 100 °C DE LAS MUESTRAS A2 DE ALQUILATOS SIN TRATAR Y TRATADOS CON BAUXITA

Prueba	Factor de potencia a 25 °C (FP <sub>25°C</sub> ±0,002) %		Factor de potencia a 100 °C (FP <sub>100°C</sub> ±0,004) %	
	Muestra sin tratar	Muestra tratada	Muestra sin tratar	Muestra tratada
1	0,030	0,000	1,127	0,082
2	0,030	0,000	1,127	0,047
3	0,013	0,000	0,328	0,021
4	0,013	0,000	0,328	0,025
5	0,013	0,000	0,328	0,011
6	0,013	0,000	0,328	0,016
7	0,013	0,000	0,328	0,013
8	0,013	0,000	0,328	0,001
9	0,019	0,000	0,540	0,006
10	0,019	0,000	0,540	0,008

Cuando un líquido dieléctrico como el aceite del transformador se somete a campos de corriente alterna (CA), se producen pérdidas dieléctricas que

causan dos efectos. La corriente resultante se desfasa ligeramente debido al campo de CA aplicado y la energía de las pérdidas se disipa en forma de calor. El aceite nuevo, limpio y seco presenta un valor bastante pequeño de factor de potencia. La contaminación del aceite por causa de la humedad o por muchos otros contaminantes aumentará el factor de potencia del líquido. El envejecimiento y la oxidación del aceite también elevarán los valores del factor de potencia del líquido. Analizando los resultados se evidencia una mejora considerable en los factores de potencia para ambas temperaturas. Esto indica que el proceso de adsorción beneficia de forma considerable los resultados de factor de potencia.

En términos generales, es de notarse la mejora de los alquilatos procesados con el sistema de adsorción. A pesar de evidenciarse un agotamiento gradual de los adsorbentes en cada una de las pruebas, los alquilatos ya procesados tienen propiedades mejoradas con respecto a las muestras antes de ser tratadas con el sistema de adsorción.

En relación a la aplicación del método de Tukey para la determinación de la significancia o no (P=0,05) del tiempo de regeneración de la bauxita (4 o 8 horas) sobre los diferentes parámetros evaluados, se encontró que la absorbancia, la cual indica la remoción de elementos cromóforos presentes en el alquilato, presenta diferencias significativas, es decir, el menor valor de la relación de absorbancia, la cual indica mayor poder decolorante, se correspondió con un tiempo de regeneración de 8 horas, con 0,950, menor a 0,982, obtenida ésta última con 4 horas de regeneración. Estos valores se reportan en las tablas II y III. En el mismo orden de idea, la humedad Karl Fisher, es significativamente menor para un tiempo de regeneración de 8 horas, lo que indica que a mayor exposición al calor por parte de la bauxita, menor aporte de humedad residual durante el tratamiento del alquilato. Con respecto a los parámetros tensión de ruptura y factor de potencia (100°C), se encontraron diferencias significativas (P=0,05) para los tiempos de regeneración estudiados, siendo 4 horas las que arrojó el mejor desempeño para estas variables. Como se observa en las tablas IV y V, la tensión de ruptura es significativamente más elevado (48,0 KV) a 4 horas de

regeneración de la bauxita que a 8 horas (45,4 KV), valores correspondientes a la prueba 10, que representa la novena regeneración. Un análisis similar ocurre con el factor de potencia. En las Tablas VI y VII se muestra que el menor valor fue de 0,004%, ocurriendo ello para un tiempo de 4 horas (Pruebas A1).

Con respecto a la tensión interfacial determinado para el alquilato en estudio, no se encontraron diferencias significativas para los tiempos de regeneración del adsorbente estudiados.

#### A. Escalamiento industrial a partir de los ensayos en planta piloto

La velocidad espacial se calculó convirtiendo el flujo másico de la sustancia establecido como variable operacional en 50 g/h, en caudal mediante la densidad a 25°C de los alquilatos dada por 0,8526 g/mL. Éste se dividió entre el volumen del relleno empaçado empleado en cada corrida (70 mL), obteniéndose una velocidad espacial de 0,8378 h<sup>-1</sup>. La columna de la planta piloto tiene un diámetro interno de 1,79 cm. Para determinar la altura del empaque se hizo mediante la ecuación del volumen de un cilindro, conocido el diámetro y la cantidad de relleno, despejando la altura se obtuvo un valor de 27,79 cm. Para una relación de diámetro/altura del empaque de 0,0644 adim. La Tabla VIII muestra las variables empleadas para hacer el escalamiento a escala industrial, partiendo de esos valores.

TABLA VIII.  
VARIABLES EMPLEADAS EN EL ESCALAMIENTO DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN

Variable	Valor
Diámetro interno piloto (cm)	1,79
Volumen relleno experimental (mL)	70
Flujo másico piloto (g/h)	50
Densidad del alquilato (g/mL)	0,8526
Flujo másico de diseño (kg/h)	1875
Factor de sobre diseño (adim.)	1,25

Cumpliendo con el esquema de cálculo descrito en la Fig. 2, se obtuvieron las dimensiones del sistema a gran escala, donde el diámetro viene dado por 0,6457 m y la altura del empaque es de 10,0264 m. Con la

premisa que el empaque ocupa el 80% de la longitud total de la torre, entonces la altura total debiese ser de 12,5330 m.

## IV. CONCLUSIONES

La sustancia adsorbente puesta a prueba, la cual fue la bauxita, soporta al menos 9 regeneraciones de 4 y 8 horas, siendo aun efectiva en la remoción de sustancias polares. Los dos tiempos de regeneración probados arrojaron mejoras en las propiedades del alquilato, con respecto al alquilato sin tratamiento. En relación a la prueba de significancia con el método de Tukey, se determinó que el mayor poder decolorante de la bauxita corresponde a tiempos de regeneración del adsorbente de 8 horas, sin embargo otras variables como tensión de ruptura y factor de potencia a 100°C, resultaron mejores a 4 horas de regeneración. En relación al estudio de todas las variables, se concluye que como todas las pruebas presentaron mejoras, en relación al alquilato sin tratamiento, se toma como mejor tiempo de regeneración de la bauxita 8 horas. La velocidad espacial recomendada para el sistema de adsorción es de 0,8378 h<sup>-1</sup> con una relación de diámetro-altura de 0,0644. El dimensionamiento de la torre de adsorción se basó en un escalamiento de la columna de la planta piloto empleada para esta investigación, fijando como parámetro de diseño la capacidad de producción deseada de alquilato tratado. La torre de adsorción diseñada tiene un diámetro interno de 0,6457 m, con una altura empacada de 10,0264 m y la altura total de 12,5330 m.

## V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la SENESCYT, a través del programa Prometeo, por el financiamiento para la participación de la Dra. Zulay Niño.

## VI. REFERENCIAS

- Anaya, A. y H. Pedroza. (2008): "Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina". *Revista Tecnología, Ciencia, Educación*. 23(1): 31-39.
- ASTM D-4052. (2011): Determinación de la densi-

- dad, densidad relativa y gravedad API de líquidos mediante el densímetro digital. EEUU.
- ASTM D-445. (2012): Método para determinar la viscosidad cinemática de líquidos opacos y transparentes (y el cálculo de la viscosidad dinámica). EEUU.
- Baasel, W. D. (1990): *Preliminary Chemical Engineering Plant Design*. 2da. edición. Van Nostrand Reinhold. Nueva York, NY, EEUU.
- Chami, J. (2001): *Estrategias de desarrollo de clusters basados en recursos naturales: el caso de la bauxita en el norte de Brasil*. Serie desarrollo productivo. CEPAL, Naciones Unidas. Santiago de Chile – Chile.
- Geankoplis, C. (2003): *Transport Processes and Separation Process Principles*. Cuarta edición. Prentice Hall. USA.
- Gutiérrez, H. y R. De la Vara. (2008): *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda edición. McGraw Hill. México D.F.
- López, F. (2009): *Uso de diversos adsorbentes para la decoloración de corrientes de hidrocarburos en proceso continuo de lecho fijo*. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
- Meier, J. (2012): *Mejora del proceso de fabricación de aceite lubricante*. Informe de pasantía. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Miller, J.C. y Miller, J.N., (2002): *Estadística y Qui-miometría para Química Analítica*. Cuarta edición. Pearson Educación. Madrid, España.
- Morán, E. (2013): *Diseño de una torre de adsorción de lecho empacado para el blanqueo de alquilatos en industrias Venoco, C.A.* Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
- Norma Fondonorma NTF-1180. (2011): Líquidos dieléctricos. Determinación de la tensión interfacial del aceite frente al agua. Método del anillo. Caracas, Venezuela.
- Norma Fondonorma NTF-3832. (2011): Líquidos dieléctricos. Determinación de la permitividad relativa, factor de pérdidas dieléctricas y resistividad (en corriente continua). Caracas, Venezuela.
- Norma Venezolana Covenin NVC-1009. (1982): Productos derivados del petróleo. Método de ensayo para determinar el contenido de humedad en hidrocarburos líquidos. Método Karl Fisher. Caracas, Venezuela.
- Norma Venezolana Covenin NVC-1403. (1979): Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura para líquidos aislantes utilizando electrodos de disco. Caracas, Venezuela.
- Skoog, D., D. West, J. Holler and S. Crouch. (2013): (2013): *Fundamentals of Analytical Chemistry*. Novena edición. Brooks Cole Pub Co. USA.
- Smith, J. (2001): *Ingeniería de las reacciones químicas*. (2da ed.). Reverté S.A. Barcelona, España.
- Trejo, R. y V. Hernández. (2007): Selección preliminar de adsorbentes para remover fluoruros del agua. *Conciencia Tecnológica*. 33 (2): 7-11.
- Treybal, R. (1998): *Operaciones de transferencia de masa*. (2da ed.). McGraw-Hill. México D.F
- Villanueva, E. (2011): *Escalamiento de un proceso de adsorción para hidrocarburos pesados y regeneración del adsorbente*. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.