

**REMOCIÓN DE ÁCIDOS NAFTÉNICOS DE UN JET 1A UTILIZANDO
COLUMNAS DE INTERCAMBIO IÓNICO**

CAMILO ANDRÉS CAJICÁ MUÑOZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2010**

**REMOCIÓN DE ÁCIDOS NAFTÉNICOS DE UN JET 1A UTILIZANDO
COLUMNAS DE INTERCAMBIO IÓNICO**

CAMILO ANDRÉS CAJICÁ MUÑOZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Químico

Director

Ph.D DIONISIO LAVERDE CATAÑO

Doctor en Ingeniería Industrial

Codirectores

Ph.D HAYDEE QUIROGA BECERRA

Doctora en Ingeniería Química

M.sc. CARLOS MEJÍA MIRANDA

Magíster en Ingeniería de Materiales

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2010

Este trabajo está dedicado a Dios, que es el primero en mi vida

A mis padres Fabio Cajicá y Stella Muñoz por su comprensión, apoyo y orientación, por ese esfuerzo incansable por la familia y espero que esté logro los llene de alegría.

A mis hermanos por su paciencia y compañía a lo largo de mi vida.

Y a mis amigos y compañeros que me apoyaron en los momentos difíciles

Gracias a todos

CAMILO ANDRÉS CAJICÁ MUÑOZ

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por su formación profesional, al Director, profesores, técnicos y personal administrativo de la escuela de ingeniería química por su colaboración durante toda mi carrera.

Especialmente a todos los miembros del semillero de investigación en corrosión, porque con ellos crecí como profesional y pude adquirir todos los conocimientos necesarios para que este logro fuera posible. Al Doctor Darío Peña por darme la posibilidad de pertenecer al semillero, por su apoyo y comprensión

Al profesor Custodio Vásquez por su tiempo, dedicación y orientación.

A la Doctora Haydee Quiroga por su comprensión y por exigirme; gracias por permitirme aprender de su gran experiencia.

Al M.Sc. Carlos Mejía por su orientación, su paciencia; el cual permitió la realización y culminación de este proyecto.

A mis compañeros del GIC que me permitieron sentirme como en casa, en el laboratorio

Al Doctor Dionisio Laverde por sus grandes aportes al proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
2. MARCO REFERENCIAL	15
2.1 Ácido nafténico.	15
2.2 Jet 1A	16
2.3 Adsorción	17
2.4 Columnas de adsorción de lecho fijo para extracción de ácidos	18
2.5 Intercambio iónico	19
2.5.1 Rapidez del intercambio	21
2.5.2 Resinas de intercambio iónico	21
2.5.3 Resina Lewatit MP 62	21
2.6 Hinchamiento de la resina	22
3. METODOLOGÍA.	23
3.1 Revisión Bibliográfica	23
3.2 Materiales y reactivos.	24
3.3 Selección del procedimiento de la activación de la resina	24
3.4 Diseño y construcción de la columna de intercambio iónico	24
3.5 Estudio en la columna de intercambio iónico	25
3.5.1 Determinación de la capacidad de la columna	27
3.6 Desorción de la resina	28

3.7 Hinchamiento de la resina	28
3.8 Escalado del proceso de intercambio iónico en lecho fijo	29
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	30
4.1 Selección del procedimiento de la activación de la resina	30
4.2 Estudio en la columna de intercambio iónico	30
4.2.1 Efecto de la altura del lecho	33
4.2.2 Efecto del caudal	34
4.2.3 Efecto de la concentración	34
4.3 Desorción de la resina	35
4.4 Hinchamiento de la resina	36
4.5 Escalado del proceso de intercambio iónico en lecho fijo	36
5. CONCLUSIONES	38
6. RECOMENDACIONES	39
7. BIBLIOGRAFÍA	40
8. ANEXOS	43

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1: Variables de las pruebas en la columna de intercambio iónico	25
Tabla 2: condiciones de operación de cada prueba	26
Tabla 3: Condiciones de operación de la columna de intercambio iónico	26
Tabla 4. Resultados obtenidos en las pruebas de activación	30
Tabla 5: Resultados de la capacidad de la columna para cada curva.	31

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Estructura típica de los ácidos nafténicos	15
Figura 2: Diagrama de la curva de ruptura ideal	19
Figura 3: Reacción entre el ácido y la resina con enlace Van der Waals	20
Figura 4: Formas de captación dentro de la partícula del intercambio iónico	20
Figura 5: Diagrama de la Metodología	23
Figura 6: Esquema del montaje a nivel de laboratorio	25
Figura 7: Curva de ruptura con una longitud de 15 cm, 2 mL/min y 0.955 TAN	31
Figura 8: Curva de ruptura con una longitud de 10 cm, 2 mL/min y 0.955 TAN	32
Figura 9: Curva de ruptura con una longitud de 10 cm, 2 mL/min y 1.18 TAN	32
Figura 10: Curva de ruptura con una longitud de 10 cm, 5 mL/min y 1.18 TAN	33
Figura 11: Curva de ruptura con una longitud de 10 cm, 5 mL/min y 0.95 TAN	33
Figura 12: Espectro de infrarrojo de la desorción con Etanol y MEA	35
Figura 13: Curva de ruptura para el proceso a escala industrial	36
Figura 14: Diagrama de columnas de intercambio iónico a nivel industrial	37

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO 1. Estructura de los ácidos nafténicos	43
ANEXO 2. Características fisicoquímicas de los ácidos nafténicos	44
ANEXO 3. Propiedades comerciales de algunos ácidos nafténicos.	45
ANEXO 4. Características comerciales de un Jet 1A	46
ANEXO 5. Diagrama del proceso de obtención del Jet 1A dentro de la refinería	47
ANEXO 6. Espectro de infrarrojo de la desorción con Etanol y MEA comparado con ácidos nafténicos comerciales	48

RESUMEN

TITULO: REMOCIÓN DE ÁCIDOS NAFTÉNICOS DE UN JET 1A UTILIZANDO COLUMNAS DE INTERCAMBIO IÓNICO*

AUTOR: CAMILO ANDRÉS CAJICÁ MUÑOZ**

PALABRAS CLAVES: Intercambio iónico, Ácidos Nafténicos, Jet 1A, Curvas de ruptura.

DESCRIPCIÓN:

Durante los últimos años, la producción de crudo pesado en Colombia ha aumentando, estos crudos tienen alto contenido de ácidos nafténicos, lo cual genera graves problemas en las refinерías. Cuando se procesa crudo pesado, se produce Jet 1A con alto TAN (Número Total de Ácidos). Las resinas de intercambio iónico son una alternativa de solución para disminuir la acidez de este turbocombustible. En este trabajo se estudió la viabilidad de utilizar columnas de intercambio iónico para la remoción de ácidos nafténicos y se determinó las dimensiones de dicha columna a nivel industrial; para estas pruebas se diseñó y construyó una columna de intercambio iónico a nivel de laboratorio. Se realizaron pruebas de desorción con etanol analítico y con una solución de etanol-MEA al 0.16% V/V, se demostró que la regeneración de la resina es más efectiva con la monoetanolamina, se calculó el grado de hinchamiento de la resina después de la regeneración y las dimensiones de una columna de intercambio iónico para procesar 14000 BPD de Jet 1A con un periodo de saturación de 35 días. Se determinó que a nivel industrial se debe operar con un sistema de 3 columnas para obtener un proceso continuo y permitir que el tiempo de regeneración sea el adecuado. Se concluyó que es viable utilizar las resinas de intercambio iónico a nivel industrial y se recomienda determinar costos reales de operación.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Ph.D Dionisio Laverde Cataño. Codirectores Ph.D Haydee Quiroga Becerra, M.Sc. Carlos Mejía Miranda

ABSTRACT

TITLE: REMOVAL OF A NAPHTHENIC ACIDS JET 1A USING ION EXCHANGE COLUMNS*

AUTHOR: CAMILO ANDRÉS CAJICÁ MUÑOZ**

KEY WORDS: Ion exchange, acid naphthenic, Jet 1A, Breakthrough curves.

DESCRIPTION:

During the last years, heavy oil production in Colombia has increased, these oils present naphthenic acids high contented, which creates serious problems in the refineries. When processing heavy crude, Jet 1A occurs at high TAN (Total Acid Number). Ion exchange resins are an alternative solution to reduce the acidity of the fuel heater. In this investigation, the feasibility of using ion exchange columns for removal of naphthenic acids and determined the dimensions of the column on an industrial level, for these tests was designed and built an ion exchange column in the laboratory. Desorption tests were conducted with ethanol and with an analytical solution of ethanol-MEA at 0.16% V/V, it was shown that the regeneration of the resin is more effective with the monoethanolamine, was calculated the degree of swelling of the resin after regeneration and the size of an ion exchange column to process 14,000 BPD of Jet 1A with a saturation period of 35 days. It was determined that at the industry level must operate with a system of three columns to obtain a continuous process and allow the regeneration time is appropriate. Concluded that it is feasible to use ion exchange resins on an industrial scale and recommended determine real costs of operation.

* Graduate work.

** Faculty of Physical and Chemical engineering. School of Chemical Engineering. Ph.D. Dionisio Laverde Cataño. Codirectores Ph.D Haydee Quiroga becerra, M.Sc. Carlos Mejía Miranda.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el procesamiento de crudo pesado ha generado graves problemas en las refinerías colombianas debido a la presencia de niveles altos de ácidos nafténicos en los crudos. Estos ácidos se presentan como ácidos monocarboxílicos, monocíclicos o bicíclicos.

Debido a la alta acidez en los crudos, se ha visto la necesidad de estudiar el comportamiento de los ácidos nafténicos y además implementar nuevos procesos que sean más óptimos en la eliminación de estos ácidos, con el fin de obtener productos con altos estándares de calidad. Se han desarrollado diversas alternativas para controlar las problemáticas causadas por los ácidos nafténicos, la primera de ellas es una mezcla de crudos para lograr un TAN aceptable a la refinería (Blending), lo cual disminuye la producción, el segundo es cambiar la metalurgia, con el fin de tener equipos más resistentes a los ácidos (upgrade), pero aumentaría los costos de forma excesiva, la tercera es agregar aditivos con el fin de contrarrestar las acciones del ácido, pero estos solo pueden actuar bajo ciertos parámetros, por último se tiene la remoción de los ácidos nafténicos, la cual se presenta como una alternativa viable para enfrentar esta problemática, debido a que se lograrían dos objetivos, reducir la problemática que se presenta dentro de la refinería y cumplir con las especificaciones de los productos, que por lo general exigen un número de TAN bajo.

La remoción de estos ácidos con resinas de intercambio iónico, han demostrado ser una posible alternativa, debido a que tiene una gran capacidad de adsorción para estas moléculas, pero es necesario realizar investigación para determinar si es posible implementarlo a nivel industrial. En este trabajo se pudieron determinar algunos parámetros de diseño, que permiten plantear un proceso de extracción de estos ácidos de forma continua a gran escala.

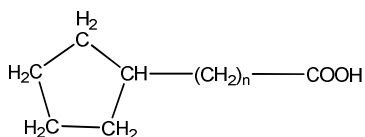
2. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se muestran algunos aspectos teóricos que se tuvieron en cuenta para la realización del trabajo.

2.1 Ácido nafténico.

Los ácidos nafténicos se encuentran en la gran mayoría de crudos colombianos, pero ocasionan problemas, como la corrosión, cuando están en altas concentraciones. Es necesario estudiar estos ácidos para general alternativas que permitan disminuir la acidez dentro de las refinerías. El nombre de ácidos nafténicos se derivó de la acidez observada en los crudos de base nafténica en la región de Baku[1], consisten principalmente en ácidos carboxílicos con anillos cíclicos saturados, en los cuales el grupo carboxilo se encuentra en una ramificación parafínica, su formula química puede ser $R(CH_2)_nCOOH$ donde R es un anillo ciclohexano o un ciclopentano[2], su forma típica se presenta en la Figura 1, de la cual se puede variar su estructura como se muestra en el anexo 1, sus puntos de ebullición pueden variar entre 200°C y 35 0°C, dependiendo de su peso molecular, algunos de estos ácidos se presentan en el anexo 2 con sus características fisicoquímicas.

Figura 1: Estructura típica de los ácidos nafténicos



Fuente: Fenómenos de corrosión en plantas de crudo (J. Ramírez)

Los ácidos nafténicos se presentan como un líquido viscoso, su color va desde un amarillo claro hasta un ámbar oscuro, que contiene compuestos fenólicos e impurezas de azufre, de los cuales se obtiene su olor característico [3].

Dependiendo del grado de refinación se obtienen sus propiedades, algunos de éstos se exponen en el anexo 3. Estos ácidos se obtienen de varias fracciones de destilación del petróleo crudo como el queroseno, gasoil, nafta pesada, aceites ligeros y lubricantes [2], el comportamiento químico de estos compuestos es similar a los ácidos carboxílicos pero con una fuerza de enlace similar a la de los ácidos grasos. Es característico de los ácidos nafténicos que puedan ser esterificados, amidados, reducidos a alcoholes, pero la mayor propiedad es su elevada estabilidad para la oxidación[3].

La corrosión nafténica es un fenómeno que se caracteriza por una picadura en el material, que se acrecienta en los cambios de dirección de flujo [4]. Es comúnmente aceptado que al incrementar el TAN¹, incrementa el potencial corrosivo de los ácidos, pero autores como Messer, proponen que no todos los ácidos nafténicos son potencialmente corrosivos, solo aquellos que presentan bajo peso molecular [5], estos ácidos orgánicos, dejan al metal sin productos de corrosión y expuestos al ambiente corrosivo [6], generando graves problemas en la industria petrolera.

2.2 Jet 1A

El jet 1A es un turbocombustibles que está presentando problemas en las refinerías debido a su alta acidez. A nivel comercial, se exige que este producto tenga un TAN menor a 0.1 debido a esto es necesario proponer alternativas que nos permita cumplir con esta especificación. El Jet 1A es utilizado en su mayoría por la aviación civil. Su característica principal es su bajo punto de congelación

¹ TAN (Total Acid Number), Norma ASTM D974, Método colorimétrico para medir la acidez del crudo, Está determinado por la cantidad miligramos de KOH requeridos para neutralizar un gramo de crudo, también se puede utilizar la norma ASTM D664.

(-47 °C), este combustible es del tipo keroseno, que se obtiene del refino en las toppings; las especificaciones de este tipo de combustibles están dadas por la norma ASTM D1655, algunas características que debe contener el JET 1A para su comercialización se muestran en el anexo 4

El Jet 1A, es producido principalmente en la primera destilación, seguido de un tratamiento con hidrógeno, un proceso MEROX, con el fin de lograr eliminar los compuestos de azufre del producto antes de ser vendido; también compuestos de gasolina pesada pueden ser agregados después de haber pasado por un proceso de hidrocrqueo, el refinado por lo general tiene un control limitado sobre la composición detallada del turbocombustible al final del proceso, por tal motivo la composición del JET 1A está determinada por el crudo a la entrada del proceso, que depende de la disponibilidad y del costo. Un diagrama del proceso de obtención del Jet dentro de la refinería se muestra en el anexo 5

2.3 Adsorción

Teniendo en cuenta que la adsorción es un proceso de separación, puede ser una alternativa viable para extraer los ácidos nafténicos del Jet 1A, pero es necesario realizar estudios que nos permitan determinar la posibilidad de utilizar este proceso a nivel industrial. Las operaciones de adsorción se fundamentan en la capacidad de ciertos materiales para concentrar en la superficie sustancias que están en el medio y así separar sustancias selectivas de uno a otro componente. Por lo general se conocen dos tipos de adsorción, quimisorción y adsorción física; la quimisorción es el resultado de una interacción química entre el sólido y el fluido, donde se libera gran cantidad de calor, y en la desorción la sustancia original ha sufrido cambios químicos; la adsorción física es el resultado de fuerzas intermoleculares de Van Der Waals, que son reversibles en su totalidad y no hay una alteración química de la sustancia que se está adsorbiendo [14].

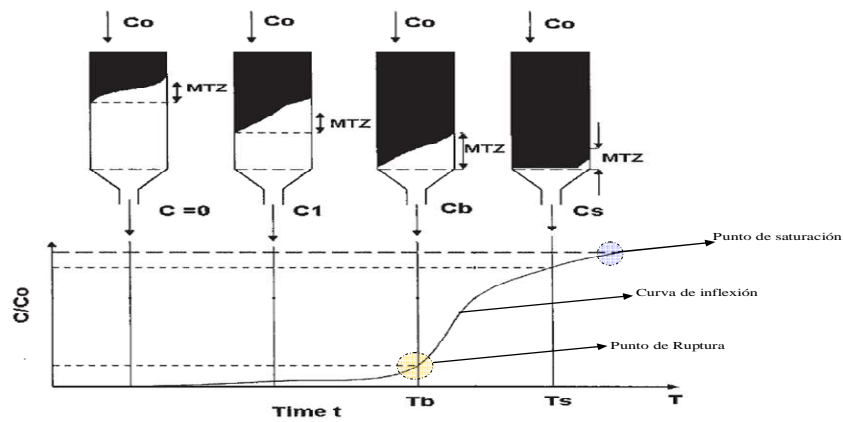
También es importante anotar que la formación de enlaces durante la adsorción química hace que el proceso sea más selectivo, pero como desventaja se tiene que, al cambiar la estructura química, impide la regeneración [15].

2.4 Columnas de adsorción de lecho fijo para extracción de ácidos

La adsorción en lechos fijos ha tomado gran importancia para la extracción y recuperación de compuestos diluidos en la fase fluida y a nivel industrial están siendo utilizadas porque han presentado alta eficiencia; por lo cual se hace necesario determinar la viabilidad de utilizar este proceso para la extracción de ácidos nafténicos. Este proceso consiste en pasar un fluido a través de un lecho empacado con un flujo constante. La eficiencia del proceso depende de la mecánica global del sistema [8], por eso es tan importante realizar experimentación a escala de laboratorio con el fin de evaluar parámetros de diseño.

Cuando se realiza la experimentación a escala en el laboratorio, principalmente la curva de ruptura, se puede determinar si la operación se debe realizar en serie, paralelo o una combinación de ambas. En forma general lo que se hace en el lecho es disminuir la concentración, en este caso de ácido, que está en la fase fluida, a medida que transcurre el tiempo. El proceso de adsorción se puede llevar a cabo hasta que la concentración a la salida del lecho sea la requerida en el proceso, y después empezar su regeneración. Las curvas de ruptura se utilizan para diseñar adsorbedores de lecho fijo. Su forma depende del comportamiento de la adsorción, esta curva indica la concentración a la cual está saliendo la fase fluida en función del tiempo. La zona de transferencia de masa depende del tamaño promedio de grano, del caudal de alimentación, de la longitud del lecho y de la temperatura de funcionamiento, a continuación se muestra una curva de ruptura ideal.

Figura 2: Diagrama de la curva de ruptura ideal

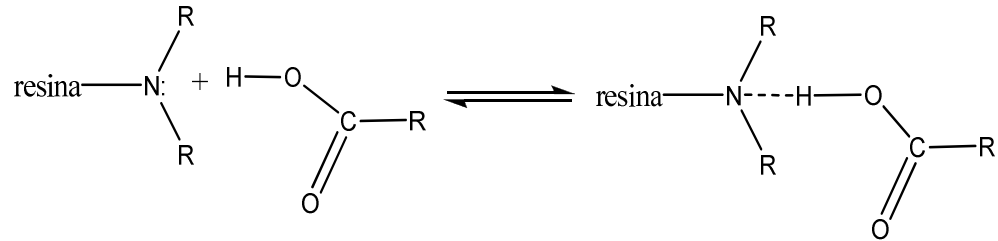


2.5 Intercambio iónico

El intercambio iónico es un caso especial de adsorción [8], que en trabajos anteriores ha demostrado ser muy eficiente en la extracción de compuestos orgánicos como los ácidos nafténicos. Los procesos de intercambio iónico son básicamente reacciones químicas entre iones en solución e iones en una fase sólida insoluble, esta fase tiende a eliminar ciertos iones, pero como es necesario conservar su electroneutralidad, se reemplaza por aquellos que están en la solución [8], siendo esto un proceso reversible; sin embargo, hay otros autores que explican el proceso como una difusión, que se da en los poros del intercambiador y depende de la movilidad de los iones lábiles hacia la solución [9]. La eficacia del proceso dependerá del equilibrio del sólido-fluido y la velocidad de transferencia de masa; en la regeneración de la concentración de iones en la solución.

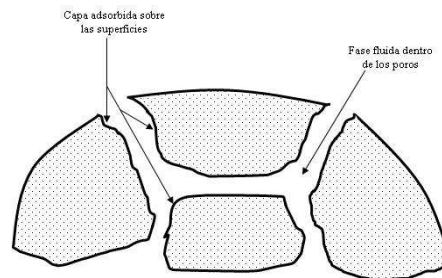
Existen dos clases de intercambio iónico, el catiónico y el intercambio aniónico [10], lo cual depende de la naturaleza del material sólido, para la remoción de ácidos nafténicos se utiliza un material aniónico, la reacción que ocurre puede expresarse según la Figura 3.

Figura 3: Reacción entre el ácido y la resina con enlace Van der Waals



Factores que pueden afectar el intercambio son el pH, ya que el intercambio está relacionado con la solubilidad, la temperatura que afecta la viscosidad, el tiempo de contacto para asegurar la remoción deseada, tamaño de partícula del adsorbente, la naturaleza de los iones y la concentración de los iones en solución; el intercambio iónico utiliza partículas sólidas porosas, que pueden adsorber en la superficie sustancias específicas, dejando pasar la fase fluida por los poros[12], como se muestra en la Figura 4, estos poros tienen áreas internas muy grandes por unidad de volumen, generalmente son irregulares y con fuerzas de enlace de Van der Waals para realizar el intercambio iónico, pero es importante anotar que el proceso de intercambio iónico no es un fenómeno de superficie porque éste se encuentra en el interior de la esfera, lo que explica el hinchamiento que sufre durante el proceso.[13]

Figura 4: Formas de captación dentro de la partícula del intercambio iónico



Tomado del Perry Manual del Ingeniero Químico.

2.5.1 Rapidez del intercambio

Es importante entender que fenómenos afecta la rapidez del proceso para analizar la cinética de adsorción en la extracción de los ácidos nafténicos. El proceso de intercambio se da en varias etapas, la primera es cuando ocurre una difusión de la molécula desde el seno del fluido hasta la superficie de la resina, seguido de una difusión interna a las paredes del poro, después se realiza el intercambio de iones y por último la difusión de los iones liberados desde el centro del poro hasta el seno del fluido; casi siempre el proceso de intercambio de iones es la etapa controlante [14].

2.5.2 Resinas de intercambio iónico

Las características de las resinas dependen de los agentes entrecruzadores que se basan en una red irregular, macromolecular y tridimensional de hidrocarburos, las resinas se clasifican según su grupo funcional. Para utilizar las resinas como material de intercambio es necesario que antes de iniciar su operación se realice una activación para obtener un rendimiento óptimo del material [12].

Debido al proceso de polimerización, las resinas no son uniformes debido al proceso de polimerización. Esto es lo que dificulta determinar parámetros termodinámicos, cinéticos u otras consideraciones teóricas [9], por esta razón es necesario realizar un estudio experimental a escala de laboratorio antes de implementarlo a escala industrial, para determinar los parámetros que permitan una expansión a escala.

2.5.3 Resina Lewatit MP 62

Se utilizó esta resina porque en trabajos anteriores demostró eficiencia en la extracción de ácidos nafténicos [16]. Es una resina aniónica, macroporosa, con grupos amino terciarios, tiene una matriz de poliestireno reticulado, su densidad aparente es de 620 g/l, un contenido de agua del 55 %, su temperatura de trabajo es máximo 70 °C [20].

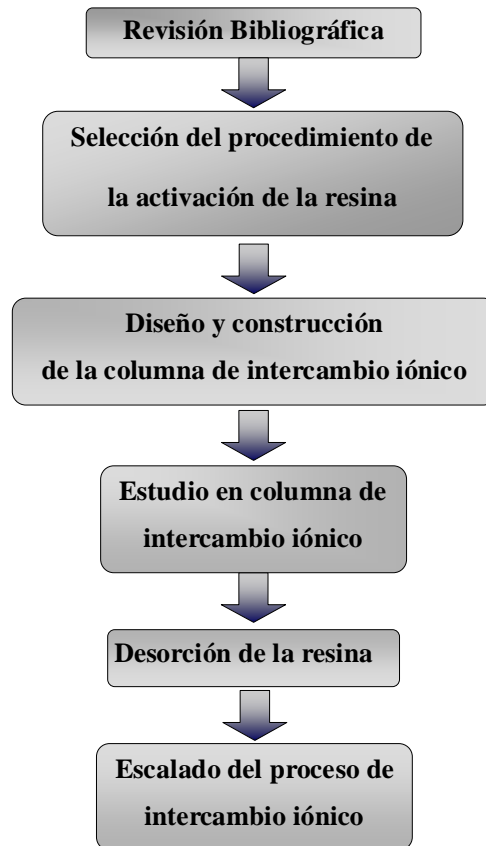
2.6 Hinchamiento de la resina

Determinar el hinchamiento de la resina es importante para poder escalar el proceso a nivel industrial. El hinchamiento de la resina se debe principalmente a la presión osmótica, y depende del número de partículas en disolución; el volumen de la resina aumenta a medida que disminuye la carga del ion, permitiendo que se hinche más cuando se tratan disolventes polares.

3. METODOLOGÍA.

En este capítulo se presenta la metodología, equipos y materiales utilizados en el desarrollo del proyecto

Figura 5: Diagrama de la Metodología



3.1 Revisión Bibliográfica

Durante el desarrollo de la investigación se revisaron diferentes fuentes documentales como, revistas, artículos científicos, manuales, libros, tesis y catálogos; de los cuales se recopiló la suficiente información para llevar a cabo el presente trabajo.

3.2 Materiales y reactivos.

Se seleccionó la resina de intercambio iónico Lewatit® MP 62, suministrada por Dow Chemical Company, de acuerdo con los resultados obtenidos en trabajos anteriores [16]. La resina presenta una buena capacidad de adsorción para los ácidos nafténicos y no presenta problema en su regeneración.

Para la activación y regeneración de la resina se utilizó etanol grado analítico marca Merck con un 99.9% de pureza y monoetanolamina marca Merck con una pureza nominal del 99%. Se utilizó el Jet 1A proporcionado por el Instituto Colombiano del Petróleo.

3.3 Selección del procedimiento de la activación de la resina

Es necesario antes de empezar las pruebas determinar cuál es el procedimiento para la activación de la resina con el fin de obtener un rendimiento óptimo en la adsorción de los ácidos nafténicos.

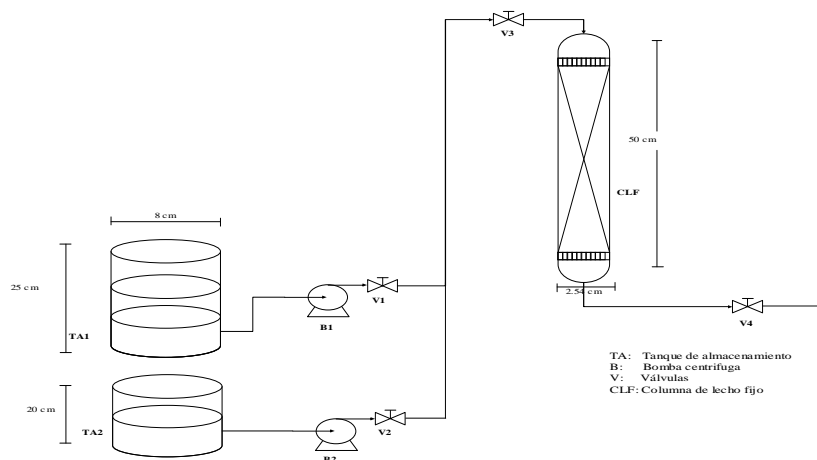
Se tomaron tres muestras de resina cada una de 0.85 g, a la primera muestra no se le realizó ningún tratamiento, la segunda se secó en un horno eléctrico a 60 °C por 8 horas; la tercera muestra se activó con una solución de MEA diluida en etanol. Posteriormente cada muestra se colocó en un erlenmeyer con 100 mL de Jet 1A por 6 horas con agitación constante; después se separó la resina y el jet fue evaluado según la norma ASTM D 664 para determinar su número de acidez.

3.4 Diseño y construcción de la columna de intercambio iónico

Se construyó una columna de lecho fijo para intercambio iónico a escala de laboratorio para realizar las pruebas de adsorción de forma continua. El equipo consta de un tubo de PVC transparente de 2.54 cm de diámetro, con una longitud de 50 cm, en sus extremos se conectaron acoples de acero inoxidable y racores, se colocaron válvulas en sus extremos con el fin de controlar el flujo, para las

conexiones se utilizó manguera siliconada, se empleó una bomba centrífuga para el transporte del fluido. En los extremos del lecho se instalaron filtros de teflón para un tamaño de partícula de 0.4 mm, diseñados especialmente para la prueba, se colocaron dos tanques de almacenamiento cada uno de 1 gal. El esquema del montaje se muestra a continuación.

Figura 6: Esquema del montaje a nivel de laboratorio



3.5 Estudio en la columna de intercambio iónico

Estas pruebas se realizaron para determinar parámetros de operación de la columna de intercambio iónico. Después de la activación de la resina, se consideraron las observaciones propuestas Dow Chemical Company, durante las pruebas se estudiaron dos flujos, dos longitudes de lecho y dos concentraciones de acidez, los cuales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables de las pruebas en la columna de intercambio iónico

Flujo	2 mL/min	5 mL/min
Concentraciones	0.955 $\frac{\text{mg KOH}}{\text{g}}$	1.18 $\frac{\text{mg KOH}}{\text{g}}$
Longitud de lecho	15 cm	10 cm

Se realizaron 5 pruebas con el fin de estudiar el efecto de las variables en el fenómeno de adsorción y obtener los parámetros óptimos de operación, a cada prueba se determinó su curva de ruptura; las concentraciones de las pruebas corresponden a los rangos de operación del proceso a nivel industrial, las longitudes de lecho se determinaron según resultados de la pruebas preliminares y el flujo dependió de la recomendaciones hechas por el proveedor de la resina. Las condiciones a las cuales se realizaron las pruebas se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2: condiciones de operación de cada prueba

	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	Curva 5
Caudal (mL/min)	2	2	2	5	5
Concentración (TAN)	0.955	0.955	1.18	1.18	0.955
longitud de lecho (cm)	15	10	10	10	10

Las pruebas se realizaron en la columna de intercambio que se diseñó y construyó en el laboratorio, el procedimiento de control de flujo se realizó durante toda la prueba, debido a que a medida que se saturaba la resina, había una distribución del material, generando disminución en el caudal. La prueba se realizó de forma continua, tomando muestras de 10 mL cada 2 horas que se evaluaron según la norma ASTM D 664 para determinar su TAN (número de acidez).

En la Tabla 3 se presentan las condiciones de la columna de intercambio iónico

Tabla 3: Condiciones de operación de la columna de intercambio iónico

Fase Móvil	Jet 1 ^a
Resina	Aniónica Lewatit® MP 62
Concentraciones (TAN)	0.955, 1.18
Caudal (mL/min)	2,5
Temperatura (°C)	22
Tamaño medio de partícula (mm)	0.47
Masa seca (g)	20, 30
Altura del lecho (cm)	10,15

3.5.1 Determinación de la capacidad de la columna

Para cada prueba se elaboró una curva de ruptura para determinar las condiciones en que se debe operar la columna de intercambio iónico a nivel industrial y se calculó la capacidad de cada lecho para poder determinar los parámetros de operación.

El punto de ruptura representa la concentración máxima permisible a la salida del afluente que en este caso tendría que ser 0.4, pero para fines comparativos este punto en todas las gráficas se ubicó donde la concentración empieza a elevarse, a este punto se le denominó t_b . La capacidad de la columna se determinó hallando el área bajo la curva entre 1 y la curva de ruptura, utilizando la siguiente ecuación.

$$t_t = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt \quad (1)$$

Donde t_t representa el tiempo equivalente a la capacidad total de la resina; de la misma forma se calculó t_u que representa el tiempo en el cual la concentración alcanza el máximo nivel permisible, por tanto se desarrolló la siguiente integral.

$$t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt \quad (2)$$

Para determinar la longitud del lecho utilizado (H_B) y la longitud del lecho no utilizado (H_{UNB}) se resolvieron las ecuaciones 3 y 4, donde H_t es la longitud total del lecho.

$$H_B = \frac{t_u}{t_t} H_t \quad (3)$$

$$H_{UNB} = \left(1 - \frac{t_u}{t_t}\right) H_t \quad (4)$$

Para determinar el área bajo la curva se desarrollaron las ecuaciones 1 y 2 por métodos gráficos, utilizando la regla de Simpson de aplicación múltiple como método de integración [18], para tal objeto se desarrolló la ecuación 5 con 12 intervalos.

$$I = (b - a) \frac{f(x_0) + 4 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{i=2}^{n-2} f(x_i) + f(x_n)}{3n} \quad (5)$$

La capacidad de la columna se determinó para todas las curvas de ruptura, y se procedió realizar una comparación entre éstas, para concluir cómo influye la altura de lecho, el caudal y la concentración en el proceso de adsorción.

3.6 Desorción de la resina

Es necesario determinar un procedimiento óptimo para la desorción, con el fin de garantizar que todo el ácido sea removido de la resina.

La regeneración se realizó a un flujo de 1 mL/min, que corresponde a la mitad del flujo de trabajo. Se realizaron dos pruebas de regeneración, en la primera se usó solo etanol analítico y en la segunda se preparó una solución de etanol con monoetanolamina al 0.16% V/V. La solución recolectada fue llevada a un rotaevaporador RV 10 control IKA, a 20 rpm y 84 °C durante 6 horas, después las muestras obtenidas fueron analizadas en un espectrofotómetro infrarrojo FTIR 8400.

3.7 Hinchamiento de la resina

Cuando se va a diseñar una columna de intercambio iónico a nivel industrial es necesario tener en cuenta el grado de hinchamiento de la resina para no afectar el proceso. Después de cada prueba se determinó el volumen que ocupó la resina en el lecho, el porcentaje de hinchamiento se calculó utilizando la ecuación 6

El grado de hinchamiento (H_p) se determinó gravimétricamente [19] utilizando la ecuación 7.

$$\% H = \frac{\text{Volumen adsorbente saturado} - \text{Volumen adsorbente seco}}{\text{volumen adsorbente seco}} * 100 \quad (6)$$

$$H_p = \frac{\text{peso adsorbente saturado} - \text{peso adsorbente seco}}{\text{peso adsorbente seco}} \quad (7)$$

3.8 Escalado del proceso de intercambio iónico en lecho fijo

Después de determinar los parámetros de operación óptimos en la columna de intercambio iónico y el grado de hinchamiento de la resina se procedió a calcular las dimensiones necesarias de una columna a nivel industrial para procesar 14000 BPD de Jet 1A, el tiempo de operación de cada columna debe ser mínimo de 35 días.

Para poder determinar las dimensiones de la columna industrial se calculó la longitud del lecho necesario para lograr la capacidad utilizable requerida (H_{b2}), como se muestra en la ecuación 8, donde t_{b2} es el tiempo requerido de operación a nivel industrial, sumando H_{b2} el H_{UNB} se determina la longitud del nuevo lecho (H_{t2}), ecuación 9.

$$H_{b2} = \frac{t_{b2}}{t_{b1}} H_b \quad (8)$$

$$H_{t2} = H_{b2} + H_{UNB} \quad (9)$$

Con lo anterior se calculó la longitud del lecho necesario a nivel industrial, se le sumó el grado de hinchamiento para obtener la altura total de la columna. Posteriormente se determinó el diámetro teniendo en cuenta que el tiempo de residencia del Jet 1A debe ser igual a la prueba que se realizó en el laboratorio.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados, con el respectivo análisis y sus conclusiones.

4.1 Selección del procedimiento de la activación de la resina

Para el proceso de activación de la resina se obtuvieron los resultados de la Tabla 4, el Jet 1A que se utilizó tenía un TAN inicial de 4.507.

Tabla 4. Resultados obtenidos en las pruebas de activación

Prueba	Resina	Condiciones TAN	% Remoción
1	Húmeda	4.233	6.079
2	Seca	4.031	10.56
3	Tratada con MEA	3.950	12.36

En las tres pruebas se presentó baja remoción de los ácidos, debido a la cantidad de resina que se utilizó. La resina tratada con MEA (monoetanolamina) presentó mayor grado de remoción de acidez, lo que demuestra que sí hay un aumento en la capacidad de adsorción. Por tal motivo este procedimiento se utilizó en las pruebas en la columna.

4.2 Estudio en la columna de intercambio iónico

Se realizaron 5 pruebas en la columna de intercambio iónico, para cada prueba se graficó una curva de ruptura; para cada curva se calculó la zona de transferencia de masa (ZTM), el tiempo para el punto de ruptura (t_b), el tiempo equivalente a la capacidad total de la resina (t_i), la longitud de lecho usado (H_b), la longitud de lecho no usado (H_{UNB}), el tiempo en el cual la concentración alcanza el máximo nivel permisible (t_u) y finalmente la fracción de la capacidad de la columna.

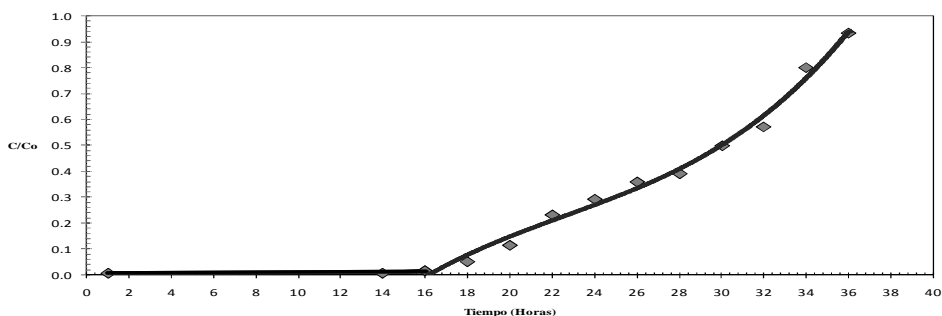
Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5

Tabla 5: Resultados de la capacidad de la columna para cada una de las condiciones.

	Altura= 15 cm	Altura de 10 cm			
	Q=2 mL/min TAN=0.955 (Figura 7)	Q= 2 mL/min		Q= 5 mL/min	
		TAN=0.955 (Figura 8)	TAN=1.18 (Figura 9)	TAN=1.18 (Figura 10)	TAN=0.955 (Figura 11)
Area ZTM	12.432	12.542	12.323	6.246	8.352
tu (h)	15.847	7.894	7.27	0.99	0.998
tt (h)	28.279	20.436	19.593	7.236	9.350
tb (h)	16	8	7.3	1	1
fracción de capacidad	0.560	0.386	0.371	0.137	0.107
Hb (cm)	8.406	3.863	3.711	1.368	1.067
HUMB (cm)	6.594	6.137	6.289	8.632	8.933

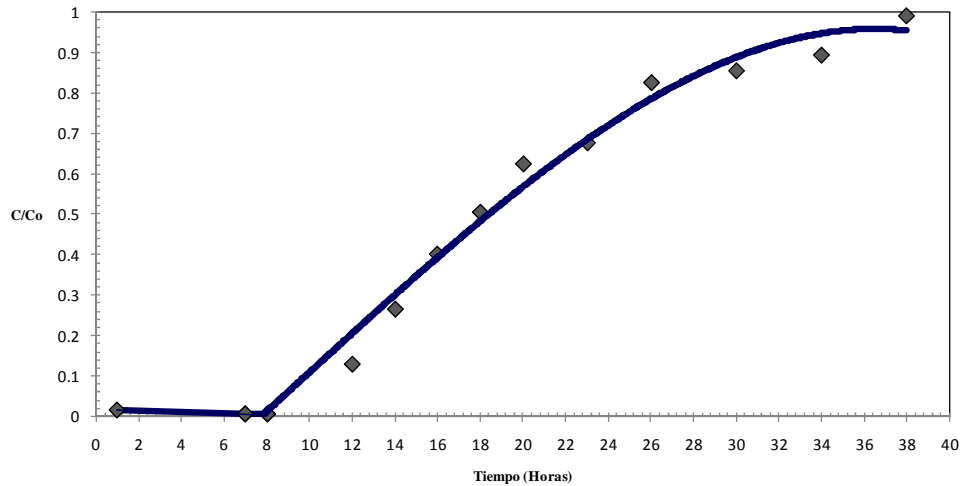
A continuación se muestran las 5 curvas de ruptura que se obtuvieron para estudiar las mejores condiciones de operación antes de realizar el escalado a nivel industrial. La Figura 7 corresponde a la curva 1 que se realizó con las condiciones de operación que se presentan en la Tabla 2; se observó, en la Figura 7 que el proceso de forma continua presentó una remoción de todos los ácidos durante las primeras 15 horas, generando así un proceso eficiente.

Figura 7: Curva de ruptura con una longitud de 15 cm, 2 mL/min y 0.955



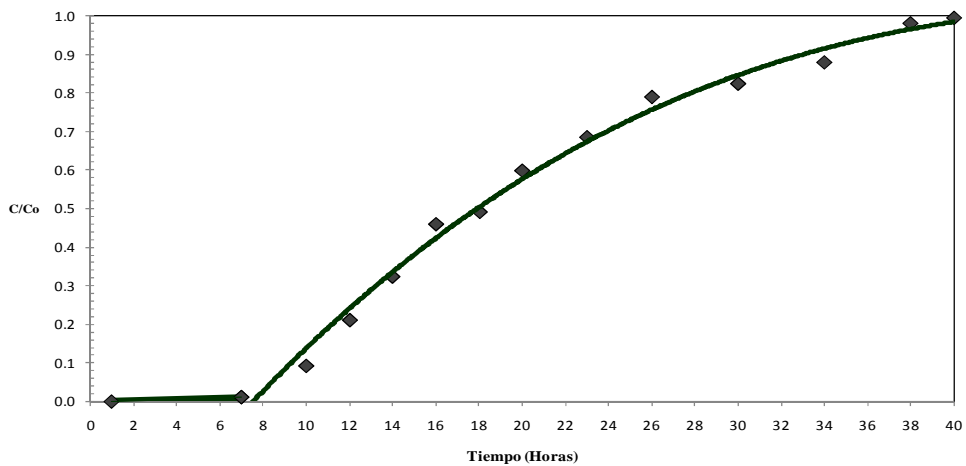
La Figura 8 corresponde a la curva 2 de la Tabla 2

Figura 8: Curva de ruptura con una longitud de 10 cm, 2 mL/min y 0.955



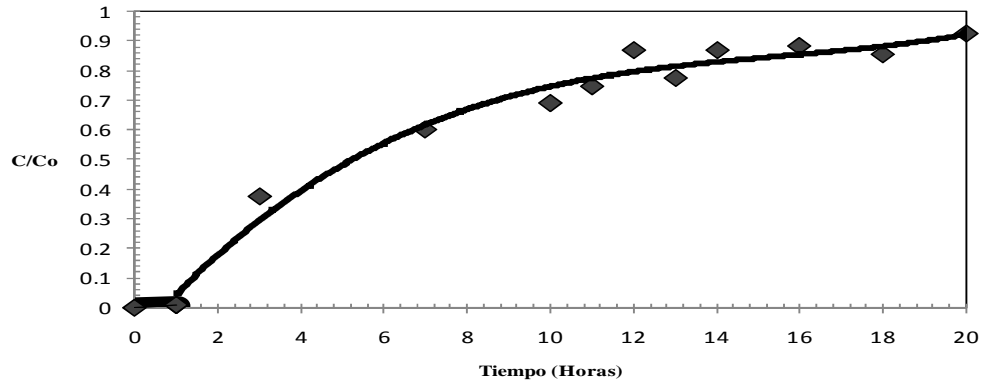
La Figura 9 corresponde a la curva 3 de la Tabla 2

Figura 9: Curva de ruptura con una longitud de 10 cm, 2 mL/min y 1.18



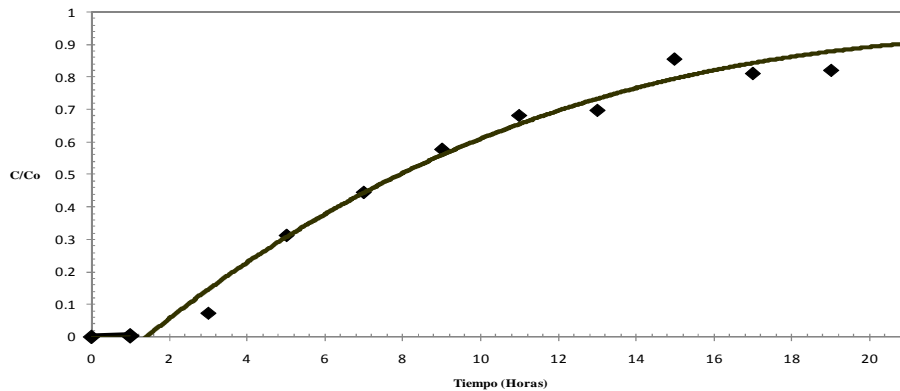
La Figura 10 corresponde a la curva 4 que se realizó con las condiciones de operación que se presentan en la Tabla 2

Figura 10: Curva de ruptura con una longitud de 10 cm, 5 mL/min y 1.18



La Figura 11 corresponde a la curva 5 de la Tabla 2

Figura 11: Curva de ruptura con una longitud de 10 cm, 5 mL/min y 0.95



4.2.1 Efecto de la altura del lecho

En la Tabla 5 podemos comparar los resultados obtenidos entre la curva 1 y 2 de la Tabla 2 (figura 7 y 8), que se presenta cuando hay un aumento en la longitud del lecho, donde se obtuvo como resultado que al disminuir la longitud no se presentan cambios importantes en la curva después del punto de ruptura, lo cual se observa cuando se comparan los resultados del tiempo en la zona de

transferencia que son muy similares; también indica que por cada centímetro que se aumente la longitud del lecho, la zona de transferencia se desplaza 1.6 horas. Por lo anterior expuesto se consideró que un lecho de 10 cm de alto en pruebas de laboratorio es un parámetro ideal para escalar el proceso a nivel industrial.

4.2.2 Efecto del caudal

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 5, comparando las curvas 3 y 4 de la Tabla 2 (Figuras 9 y 10), se observa un desplazamiento de 6.3 horas del punto de ruptura, también se observa una disminución de casi a la mitad del área en la curva de inflexión para el caudal de 5 mL/min, por tal razón, la curva es más pronunciada a medida que aumenta el caudal, lo que indica que el tiempo de operación de la columna aumenta a medida que disminuye la velocidad de la fase móvil.

Debido a esto se consideró que el caudal óptimo debe ser de 2 mL/min para escalar el proceso. Con el volumen del lecho se determinó que el tiempo de residencia debe ser de 24.5 min, el cual es importante para calcular el diámetro de la columna a nivel industrial.

4.2.3 Efecto de la concentración

En la Tabla 5, si se comparan las curvas 2 y 3 de la Tabla 2 (Figuras 8 y 9), se observa que el aumento en la concentración disminuye el tiempo para alcanzar al punto de ruptura, pero también permite una curva de inflexión más extensa, lo cual contrarresta el efecto causado. Por tal razón el área de la zona de transferencia, la longitud del lecho usado y el no usado, son muy similares en las dos pruebas, esta similitud también se muestra si se comparan los datos obtenidos en las Figuras 10 y 11.

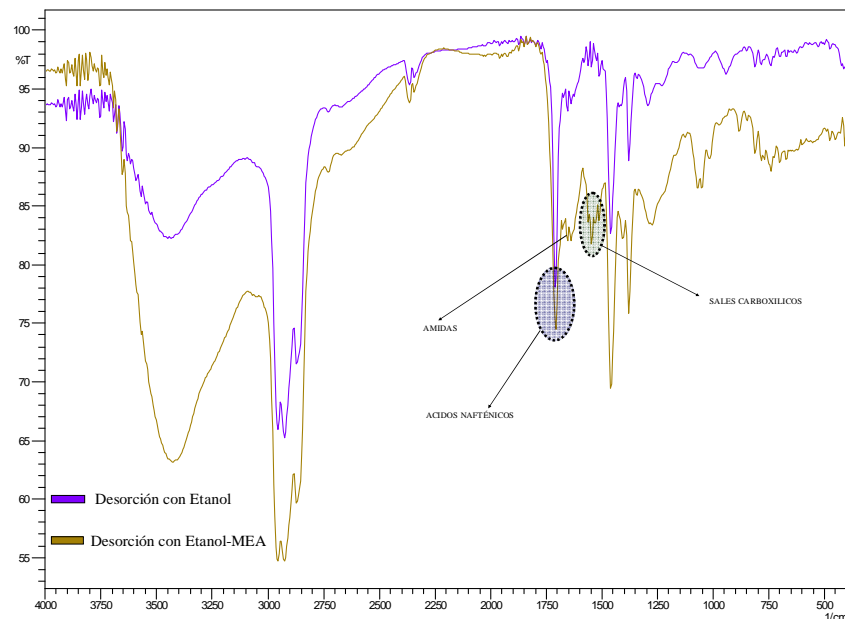
Lo anterior es una ventaja a nivel industrial porque el aumento en la concentración no va a alterar de forma significativa el proceso de remoción de los ácidos

nafténicos en ese rango de operación, por lo cual se tomó como parámetro $0.955 \frac{\text{mg KOH}}{\text{g}}$ para el diseño de la columna a nivel industrial

4.3 Desorción de la resina

La regeneración de la resina permite extraer los ácidos nafténicos. Los resultados obtenidos del análisis en el espectrofotómetro se muestran en la Figura 12

Figura 12: Espectro de infrarrojo de la desorción con Etanol y MEA



Se observó una banda en 1700 cm^{-1} que corresponde a los ácidos nafténicos extraídos, también está presente una banda ancha entre 2500 cm^{-1} y 3500 cm^{-1} que representa la vibración por tensión del grupo hidroxilo, esta banda está presente en las dos muestras, lo cual indica que efectivamente se están extrayendo estos compuestos, una comparación de estos espectros con una muestra de ácidos nafténicos comerciales es mostrada en el anexo 6, el espectro de la muestra que se extrajo con la solución de MEA muestra además una banda en 1550 cm^{-1} y en 1650 cm^{-1} que corresponden a las sales formadas y a las amidas respectivamente, también se muestra que este espectro está por debajo

del que se tomó con solo etanol, lo cual indica que la extracción con MEA es más efectiva, y por lo tanto es recomendable hacer la extracción con esta solución.

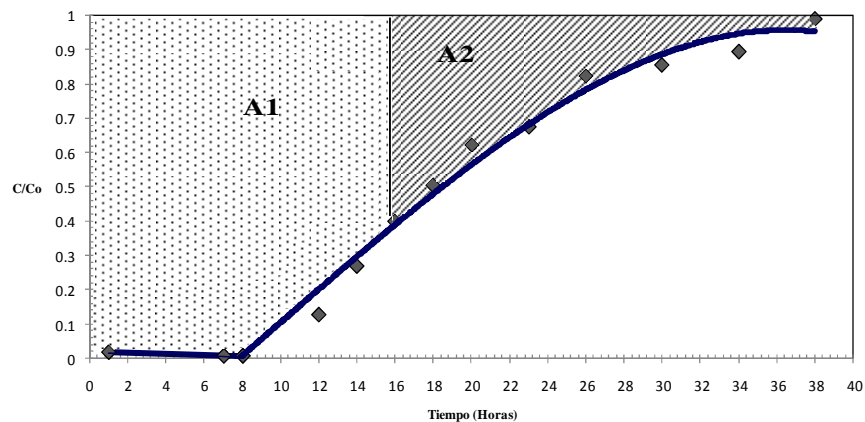
4.4 Hinchamiento de la resina

Cuando se regeneró la resina con la solución de etanol-MEA se observó un aumento en el volumen, mayor que con el Jet, debido a la alta polaridad del etanol. El índice de hinchamiento para la resina en la regeneración fue de 45, el cual debe ser tenido en cuenta al momento de calcular la altura de la columna a nivel industrial.

4.5 Escalado del proceso de intercambio iónico en lecho fijo

Después de realizar el estudio en la columna de intercambio iónico se concluyó que las condiciones de operación para poder escalar el proceso deberían ser de 2 mL/min, con una concentración de $0.955 \frac{\text{mg KUH}}{\text{g}}$ y una longitud de 10 cm, bajo estos parámetros se obtuvo la curva de ruptura que se muestra en la Figura 13.

Figura 13: Curva de ruptura para el proceso a escala industrial



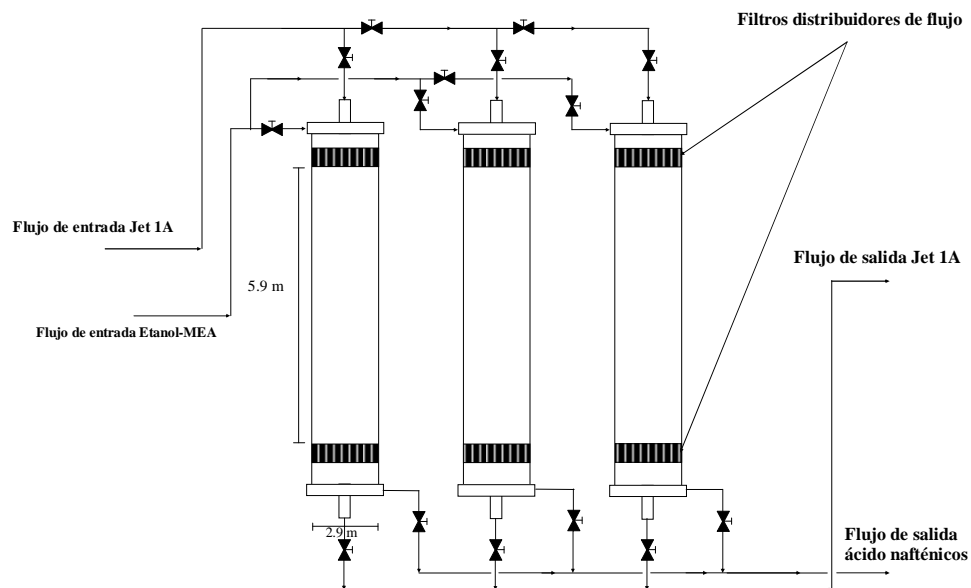
Debido a los requerimientos del proceso, el nuevo punto de ruptura se ubicó en 0.4, como se muestra en la Figura 13. El desplazamiento del punto de ruptura permite que gran parte del lecho sea utilizado, se calculó H_{b2} y H_{t2} para la columna industrial utilizando las ecuaciones 7 y 8, resultando 4.1 m y 4.13 m

respectivamente, a la longitud del nuevo lecho (H_{t2}) se le sumó el índice de hinchamiento para una altura total de la columna de 5.9 m.

Es importante garantizar que el tiempo de residencia, a nivel industrial, sea el mismo que se trabajó en la pruebas del laboratorio el cual fue de 24.5 minutos; teniendo que procesar 14000 BPD de Jet con un lecho de 5.9 m de alto, el diámetro de la columna industrial debe ser de 2.9 m, siendo éstas las dimensiones que debe tener la columna de intercambio iónico a nivel industrial.

Como la zona de transferencia de masa es muy prolongada, los niveles de TAN no son altos y el proceso debe ser muy eficiente, se propone que el sistema sea de múltiples columnas, el cual permite regenerar una de las columnas mientras las otras están en proceso, permitiendo que el proceso sea continuo; se calculó el número de etapas o columnas que debería tener el sistema, y se considera que mínimo son 3, un diagrama propuesto se muestra a continuación.

Figura 14: Diagrama de columnas de intercambio iónico a nivel industrial



5. CONCLUSIONES

Las columnas de intercambio iónico han demostrado gran capacidad y eficiencia para la adsorción de ácidos nafténicos. Sin embargo, es necesario que se utilicen tiempos de residencia largos con el fin de garantizar la eficacia del proceso a nivel industrial

Para la regeneración y activación de la resina se debe utilizar una solución de ETANOL-MEA al 0.16%, puesto que esta aumenta la capacidad de la resina y presenta mejor extracción de los ácidos al momento de la desorción.

Para procesar 14000 BPD (barriles por día) es necesario construir una columna de 5.9 m de altura y 2.9 de diámetro, así se garantiza que los parámetros utilizados en las pruebas de laboratorio sean los mismos; si se desea que el proceso sea continuo es necesario utilizar mínimo 3 columnas, para garantizar que el tiempo de regeneración sea el adecuado.

6. RECOMENDACIONES

Los parámetros aquí determinados se deben tener en cuenta al momento de optimizar el proceso con el fin de utilizar el sistema más adecuado, dependiendo del los costos del proceso.

El proceso en planta piloto se debe hacer de forma continua con el fin, de determinar costos reales de operación.

7. BIBLIOGRAFÍA

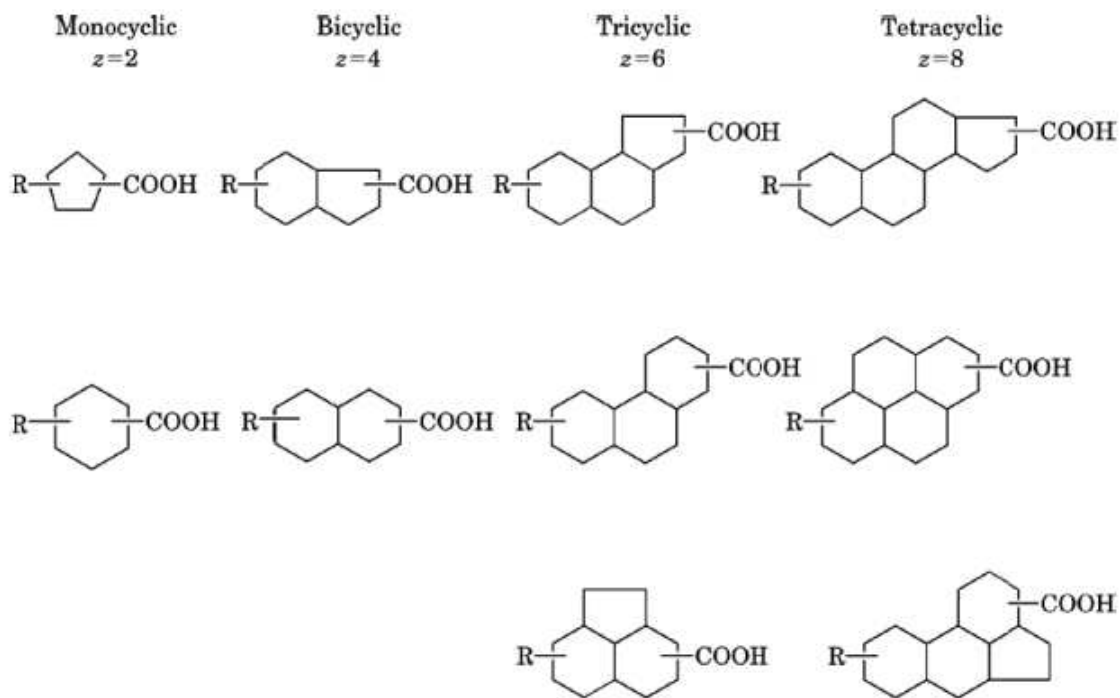
- [1] RAMÍREZ José Élvor, CAICEDO Carlos Ernesto y REYES Argemiro, en: Fenómenos de corrosión en unidades de crudo, Volumen III, corrosión por ácido nafténicos. Diciembre 1997. Ecopetrol-icp
- [2] GROYSMAN Alec, BRODSKY Naphtali, PENER Joseph, and SHMULEVICH Dmitry, Low temperature naphthenic acid corrosion study en: NACE 2007 paper # 07569
- [3] BRIENT James A. y WESSNER Peter J., Kirk-othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Third Edition. 1981
- [4] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTED (API). Recommended practice 571, Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry, Washington, D.C. 20005-4070, December 2003.
- [5] B. MESSER, B. TARLETON, M. BEATON and T. PHILLIPS, New theory for naphthenic acid corrosivity of athabasca oilsands crudes, en: NACE 2004 paper #04634
- [6] GONZÁLEZ Ricardo A., Procesamiento de crudos de alto tan integridad - herramientas para control de corrosión, ESSO P.A.S.R.L.
- [7] HEMIGHAUS Greg, BOVAL Tracy and BACHA John, Aviation fuels technical review, Chevron Corporation. 2006
- [8] GEANKOPLIS Christie J. en: Procesos de transporte y operaciones unitarias, University of Minnesota, 1989 p. 773-791

- [9] GODOS Jordi Margineda, Estudio de procesos de adsorción/desorción de iones en resinas encapsuladas 2004, Universidad Autónoma de Barcelona, Departamento de química
- [11] PINILLA EDWIN Fernando, Intercambio iónico propuesta de laboratorio de procesos unitarios, Universidad del Cauca, 2008
- [12] PERRY H. Robert, GREEN W Don, MALONEY O. James, Perry manual del ingeniero químico, sexta edición, McGraw-HILL. 2000 Tomo IV
- [13] AVILLA Joseph A., Lo esencial acerca del intercambio iónico, XXV Conferencia Anual de la Water Quality Association (WQA), 1999
- [14] TREYBAL Robert E., Operaciones de transferencia de masa, McGRAW-HILL, Segunda Edición. 1991. p. 625-675
- [15] TUBERT Iván Y TALANQUER Vicente, Para saber, experimentar y simular sobre adsorción, en: Revista de educación química en línea, Facultad de Química, UNAM, México, D. F. Volumen VIII
- [16] NAVAS QUIROGA Libardo, Evaluación de resinas comerciales de intercambio iónico para la remoción de ácidos nafténicos, trabajo de grado ingeniero químico, Universidad Industrial de Santander, escuela de ingeniería química, 2009
- [17] GAIKAR V.G., MAITI Debashish, Adsorptive recovery of naphthenic acid using ion-exchange resins, Department of Chemical Technology, University of Bombay, Matunga, India, 1996
- [18] CHAPRA Steven y CANALE Raymond, Métodos numéricos para ingenieros, 5^{ta} edición, Mc Graw Hill, 2007, Capítulo 21

[19] DÍAZ Elena, VILLARÁN Velasco M^a Carmen, RÍO PÉREZ Francisca, RAMÍREZ LÓPEZ Camilo, IBARRETA LEIRE Lorenzo, utilización de adsorbentes basados en quitosano y alginato sódico para la eliminación de iones metálicos: Cu²⁺ , Pb²⁺ , Cr³⁺ y CO²⁺, Fundación LEIA (España) , Revista Iberoamericana de Polímeros, *Volumen 8(1), Enero de 2007.*

ANEXOS

ANEXO 1. Estructura de los ácidos nafténicos



ANEXO 2. Características fisicoquímicas de los ácidos nafténicos

ÁCIDO NAFTÉNICO	FORMULA QUÍMICA	Densidad a 20 °C g/mL	Peso molecular g/mol	Temperatura de ebullición °C
Ciclopentano ácido carboxílico	C5H9COOH	1.052	114	216
ciclohexano ácido carboxílico	C6H11COOH	1.030	128	232
Ciclopentano ácido acético	C5H9CH2COOH	1.022	128	234
Ciclohexano ácido acético	C6H11CH2COOH	1.007	142	242
Ciclopentano ácido propiónico	C5H9(CH2)2COOH	0.996	142	252
Ciclohexano ácido propiónico	C6H11(CH2)2COOH	0.998	156	265
Ciclohexano ácido butírico	C6H11(CH2)3COOH	1.010	170	270

Fuente: Alec Groysman, Naphtali Brodsky, Joseph Pener, and Dmitry Shmulevich, **LOW TEMPERATURE NAPHTHENIC ACID CORROSION STUDY** en: NACE 2007 paper # 07569

ANEXO 3. Propiedades comerciales de algunos ácidos nafténicos.

Property	Grade		
	Crude	Refined	Highly refined
acid number, mg KOH/g	150–200	220–260	225–310
acid number (oil-free)	170–230	225–270	230–315
unsaponifiables, wt %	10–20	4–10	1–3
phenolic compounds, wt %	2–15	0.1–0.4	0.05–0.4
water, wt %	0.3–1.0	0.01–0.1	0.01–0.08
specific gravity at 20°C	0.95–0.98	0.95–0.98	0.95–0.98
viscosity at 40°C, mPa·s (cP)	40–80	40–100	50–100
color, Gardner	black	6–8	5–6
refractive index, n_D^{20}	1.482	1.478	1.475
avg. mol wt (oil-free)	240–330	210–250	180–250

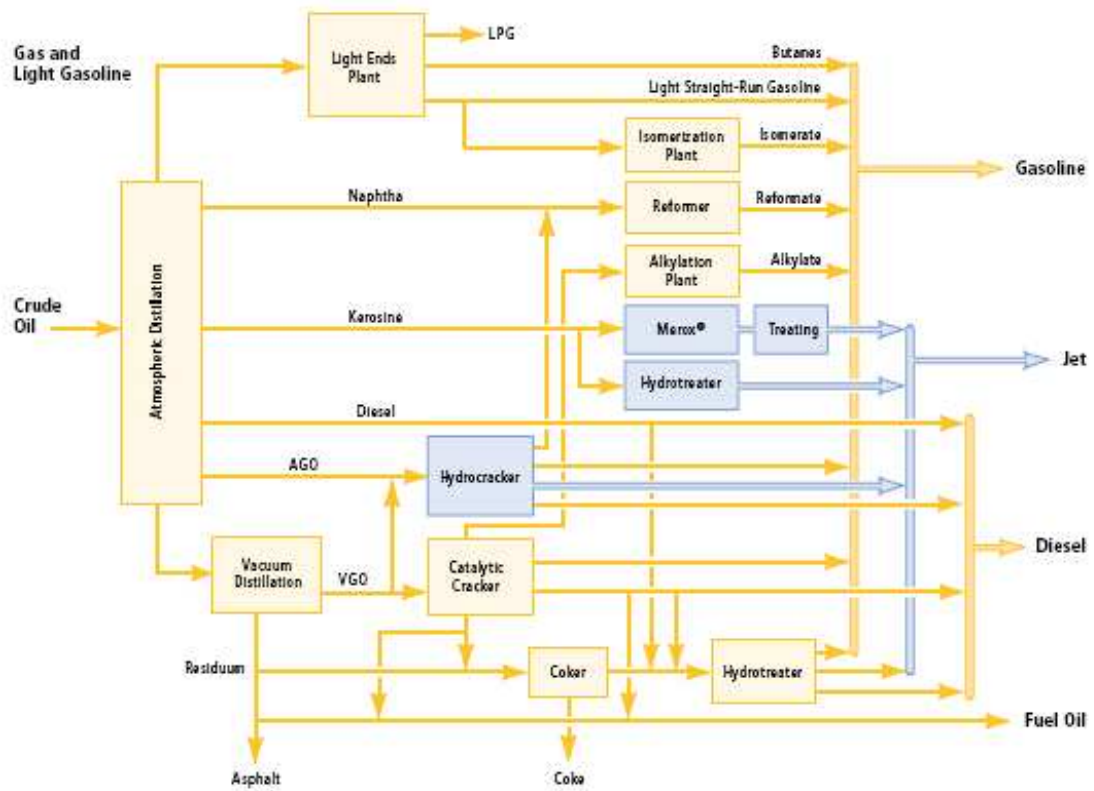
Fuente : JAMES A. BRIENT, PETER J. WESSNER, MARY NN DOYLE, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.

ANEXO 4. Características comerciales de un Jet 1A

Características	Unidades	Métodos	Mínimo	Máximo
Acidez	mg KOH/g	D 3242		0,10
Aromáticos	mL/100 mL	D 1319 (1)		25
Azufre Total	g/100 g	D 4294 (2)		0,30
Azufre Mercaptano	g/100 g	D 3227		0,003
Calor neto de combustión	MJ/kg	D 3338 (3)	42,8	
Clasificación interfase		D 1094		1 b
Apariencia			Clara y Brillante	
Color Saybolt		D 156	Reportar	
Corrosión al Cobre, 2 h a 100 °C	Clasificación	D 130		1 (4)
Densidad a 15 °C	kg/m ³	D 4052 (5)	775	840
Estabilidad Térmica:		D 3241		
Caída de presión en el filtro	kPa(mm Hg)			3.3 (25)
Depósitos en el tubo				3
Destilación :		D 86 (6)		
Punto Inicial de Ebullición	°C		Reportar	
10 % de recobrado	°C			205
50 % de recobrado	°C		Reportar	
90 % de recobrado	°C		Reportar	
Punto Final de Ebullición	°C			300
Residuo de destilación	mL/100 mL			1,5
Pérdidas de destilación	mL/100 mL			1,5
Goma existente	mg/100 mL	D 381		7
Punto de Inflamación	°C	D 56	38	
Punto de Congelación	°C	D 2386 (7)		-47
Propiedades de Combustión:				
Punto de humo (8)	mm	D 1322	18	
Naftalenos (8)	mL/100 mL	D 1840		3,0
Viscosidad a - 20 °C	mm ² /s	D 445		8,0
Características de separación del agua (MSEP-A)		D 3948	85	

Fuente: Ecopetrol

ANEXO 5. Diagrama del proceso de obtención del Jet 1A dentro de la refinería



Fuente: Chevron Corporation

ANEXO 6. Espectro de infrarrojo de la desorción con Etanol y MEA comparado con ácidos nafténicos comerciales

