

# Design of a System for the Recovery of Residual Organic Solvents based on Extractive Distillation

Tiffany Stein\*, Mariana Romero, Frank Pérez, Douglas Rodríguez  
Departamento de Química, Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacio”,  
Región Capital, Caracas, Venezuela

## Abstract

Environmental liabilities in the pharmaceutical sector constitute a problem, which must be solved with sustainable development criteria. The production of new drugs should also be accompanied by procedures that neutralize or give the possibility of reuse of the discarded substances. The purpose of this research was the development of a separation system, by extractive distillation for the treatment and recovery of a chloroform-methanol azeotropic mixture, which represents an organic waste generated in the production process of pulmonary surfactants. Water was used as an extracting agent for the separation of the organic waste formed by chloroform-methanol in a 2:1 ratio. The distillate obtained was chloroform, and the residual methanol-water was subsequently separated by simple distillation. The purity of the fractions obtained from chloroform and methanol was determined, by pycnometry and refractometry. The following results are obtained for chloroform 91.47% and 90.11%; of purity and for methanol 46.64%, and 54.75% purity respectively. Additionally, the chloroform purity was quantified by gas chromatography yielding a result of 96.70%. The data obtained show that the proposed design is presented as an alternative for the recovery of residual solvents from the pharmaceutical industry.

**Keywords:** azeotropic mixture; extractive distillation; chloroform–methanol; organic solvent residues.

## Diseño de un sistema para la recuperación de solventes orgánicos residuales basado en destilación extractiva

### Resumen

Los pasivos ambientales en el sector farmacéutico constituyen un problema, que debe ser resuelto con criterio de desarrollo sostenible. La producción de nuevos fármacos, también debe ser acompañada de procedimientos que neutralicen o den la posibilidad de re-uso a las sustancias desechadas. El propósito de esta investigación fue el desarrollo de un sistema de separación, mediante destilación extractiva para el tratamiento y recuperación de una mezcla azeotrópica cloroformo-metanol, la cual representa un residuo orgánico generado en el proceso de producción de surfactantes pulmonares. El agua fue utilizada como agente extractor para la separación del desecho orgánico conformado por cloroformo-metanol en una relación 2:1. El destilado obtenido fue el cloroformo, y el residual metanol-agua, fue separado posteriormente, mediante destilación simple. La pureza de las fracciones obtenidas de cloroformo y metanol fue determinada, por picnometría y refractometría. Obteniéndose para el cloroformo los siguientes resultados 91,47% y 90,11%; de pureza y para el metanol 46,64%, y 54,75% de pureza respectivamente. Adicionalmente se cuantificó la pureza del cloroformo por cromatografía de gases arrojando un resultado de 96,70%. Los datos obtenidos muestran que el diseño propuesto, se presenta como una alternativa para la recuperación de solventes residuales provenientes de la industria farmacéutica.

**Palabras clave:** mezcla azeotrópica; destilación extractiva; cloroformo–metanol, residuos de solventes orgánicos.

Recibido: noviembre 2019;

Aceptado: diciembre 2019.

Autor para correspondencia: Tiffany Stein e-mail: steintjuliet@gmail.com

## 1. Introducción

La industria farmacéutica constituye uno de los más grandes potenciales económicos de un país, ya que es la encargada de la producción y comercialización de los medicamentos consumidos por la población para la prevención y tratamiento de enfermedades contribuyendo así con el desarrollo y bienestar integral de los habitantes de una sociedad. Por este motivo, dicha industria debe estar en continua innovación y evolución, ya que, día a día los consumidores presentan nuevas necesidades. Los procesos de producción en este sector se caracterizan por utilizar una gran variedad de disolventes, ya sea como medio de reacción, extracción o para limpieza de equipos. Desde el punto de vista tecnológico, cualquier disolvente o mezcla de ellos puede ser recuperado a tal punto que pueda ser reutilizado, ya sea para su propósito original, o para su uso alternativo [1]. Por otra parte, muchos de los desechos generados (solvente, material de empaque y mezcla de reactivos en general) constituyen una gran amenaza ambiental, problema presente hoy en día en infinidad de empresas del área, que no cuentan con soluciones factibles que resuelvan sus problemas de contaminación.

En el proceso de obtención del surfactante pulmonar exógeno, se genera un residuo de solventes orgánicos constituido por cloroformo y metanol, los cuales conforman una mezcla azeotrópica producto de la extracción del líquido amniótico del pulmón de porcino, este residuo contiene elevadas concentraciones de compuestos tóxicos por lo que no puede verterse en plantas de tratamientos de residuos líquidos [2]. Actualmente, en nuestro país, se realizan investigaciones y pruebas experimentales para la fabricación de surfactantes exógenos con el fin de generar un medicamento eficiente y desarrollar la industria farmacéutica, así como disminuir el porcentaje de muertes en neonatos con problemas de insuficiencia respiratoria.

La destilación es parte importante de numerosos procesos experimentales. Uno de los más empleados es la destilación extractiva, un método satisfactorio para la separación de mezclas azeotrópicas empleando agentes separadores que permiten no solo obtener cada producto de manera individual sino también con un alto grado de pureza, estos procesos

son muy comúnmente empleados en las industrias bioquímicas y farmacéuticas [1].

Uyazán, A. y colaboradores [3] exponen que en el procedimiento de la deshidratación del etanol, las características del proceso, además de las principales variables de operación y algunos criterios utilizados en el diseño del esquema de separación. Indicaron que a través de los métodos convencionales de destilación es posible obtener etanol con concentraciones cercanas a la composición azeotrópica (96 % en peso); la modificación de las condiciones de operación de la destilación, las cuales abarcan desde la aplicación de alto vacío hasta la adición de solvente; dichas modificaciones varían los coeficientes de actividad de la mezcla. Posteriores a las técnicas de destilación, que involucran operaciones líquido-vapor, se han introducido otras que utilizan los principios de absorción.

Virguez y Zafra [4] en su investigación realizaron varias destilaciones extractivas de la mezcla no ideal cloroformo-metanol usando solventes o arrastradores (isopropanol, tres-metil-dos-pentanona y agua). A tal fin de establecer un montaje adecuado para una separación efectiva del azeótropo. Posteriormente se realizó la selección del solvente con el cual se separó la mezcla y por último se caracterizaron por separado los compuestos obtenidos por cromatografía de gases.

Carmona [5] afirma que la destilación extractiva es evaluada como alternativa para la separación de la mezcla propano-propileno en comparación con la destilación ordinaria utilizada actualmente. Un análisis sistemático para el diseño de destilación extractiva es propuesto en este trabajo, además de las variables importantes que deben ser consideradas, tal es el caso de la selectividad del disolvente. En este sentido, el efecto no solo se observa en el diseño, sino también en el impacto económico de ahí la importancia del análisis.

Palacio y Tamallo [6] investigaron el diseño y control del proceso de separación isopropanol-agua a través de destilación extractiva. Donde proponen una estrategia de control que consistió en un solo circuito de control en un plato de cada columna para mantener la pureza requerida de los productos para mantener la pureza requerida de los productos, encontraron que el proceso a través de destilación extractiva es mucho más competitivo que el de

destilación azeotrópica heterogénea. El costo total anual se reduce hasta en un 32,7%, utilizando el proceso a través de destilación extractiva y el costo de vapor requerido se reduce en un 30,3%.

Castro y Ojeda [7] idearon una metodología de destilación azeotrópica para el desplazamiento del azeótropo del sistema ácido nítrico/agua, exponen que la destilación es una operación de separación que se usa en casi todos los procesos industriales. Una de las mezclas que presenta azeotropía es el sistema ácido nítrico/agua el cual se destiló a escala usando ácido sulfúrico como tercer componente; permitiendo que el ácido nítrico se obtenga en concentración entre el 90–95%.

El Instituto de Estudios Avanzados (IDEA) de Venezuela, ejecuta actualmente el proyecto de desarrollo y escalamiento de tecnología para la producción de surfactantes pulmonares, para lo que se está llevando adelante la conformación de una planta piloto.

En relación con lo anteriormente expuesto, esta investigación, propone una solución innovadora para el tratamiento y separación de una mezcla de solventes, generados por la producción de surfactantes pulmonares con el fin de reciclar y reutilizar los componentes extraídos, desarrollar una alternativa viable y económica, que reduzca los gastos en la compra de solventes, así como también la reducción de los pasivos ambientales generados.

## 2. Metodología

### Reactivos

- Cloroformo, Omni Solv, USA, pureza 99,9%;
- Metanol, Riedel de Haen, pureza 99,8% (máximo 0,005 % H<sub>2</sub>O);
- Agua destilada.

### Muestra

La muestra estudiada corresponde a una mezcla azeotrópica de ebullición mínimo de cloroformo-metanol en relación 2:1, el punto de ebullición del azeótropo es de 53,43°C.

### Procedencia

La mezcla azeotrópica cloroformo metanol en relación 2:1 es desechada por la industria e instituciones dedicadas a las actividades químicas y farmacéuticas, en la extracción del líquido amniótico del pulmón bovino y porcino empleado como materia prima en la fabricación de surfactantes pulmonares. En este caso la mezcla fue proporcionada por el Instituto de Estudios Avanzados (IDEA), por parte del proyecto para el desarrollo de un surfactante pulmonar.

### Equipos

- Cromatografo de Gases con automuestreador TF AS2000CU, y detectores Fotoionizador (PID), Ionización a la llama (FID) y conductividad térmica (TCD), Marca: thermo Finnigan, modelo: trace GC K27336930100600;
- Refractómetro, Abbe Refractometer, marca: American Optical Corporation Scientific Instrument Division, Made in USA.

### Sistema de destilación extractiva

El diseño del montaje de la destilación extractiva implementada para la separación binaria azeotrópica cloroformo–metanol consto de un balón de destilación marca Pírex con capacidad de 250 mL seguido de la columna de destilación donde se llevo a cabo la separación del Azeótropo, esta de marca Pyrex con un diametro de  $20,00 \pm 0,10$  mm y una longitud de  $35,00 \pm 1,00$  cm y unas esferas de ebullición, el relleno de la columna de destilación estaba compuesto por anillos rasching con un diametro de  $5,0 \pm 0,1$  mm y aros metálicos de diametro  $1,0 \pm 0,1$  mm. La columna de destilación se le coloco un revestimiento de papel aluminio y cubierto con lana de vidrio. La entrada del agente extractor fue en la cima del sistema marca Pyrex y con capacidad de  $100,0 \pm 0,5$  ML, la salida de las fracciones destiladas es de marca Pyrex, con llave de paso o llave de corte, se adiciono al sistema una columna de reflujo, esta de marca Pyrex y de tipo reflujo de bolas, por ultimo una manta de calentamiento marca Cienytec con un máximo de temperatura de 450°C y de 110 V, con carcasa

metálica. El diseño del montaje utilizado se muestra en la Figura 1.

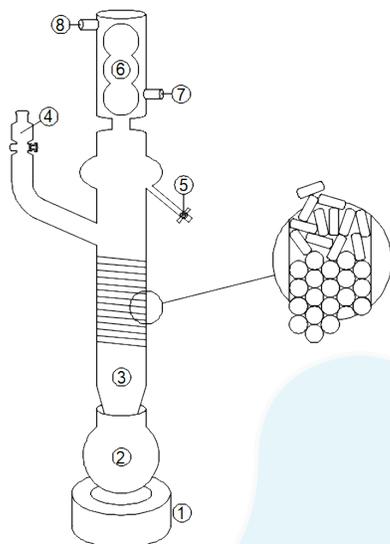


Figura 1: Montaje de destilación extractiva

Las componentes del montaje de destilación extractiva en la Figura 1 son

1. manta de calentamiento;
2. balón de destilación con muestra azeotrópica cloroformo–metanol;
3. columna extractiva: relleno anillos rasching y aros de metal;
4. entrada de agente extractor;
5. llave de paso para dejar salir el cloroformo;
6. columna de reflujo extra;
7. entrada de agua al sistema;
8. salida de agua del sistema.

### *Manejo del sistema de destilación extractiva*

El sistema de destilación extractiva consta de una manta de calentamiento colocada con una temperatura requerida para el proceso de separación, un balón de destilación que contenía la muestra a separar 200 mL y unas esferas de ebullición para controlar los sobresaltos por ebulliciones violentas, luego está conectado a la columna de extracción que contiene un relleno de anillos rasching y aros de metal, además se le coloco un revestimiento de papel aluminio y lana de vidrio que permitió mantener la temperatura del sistema y evitar cambios bruscos de la misma, en una etapa cercana a la cima del sistema se añade poco a poco el tercer componente

o agente extractor (agua) cuando la muestra este en ebullición, se evita dejarlo fluir rápidamente ya que puede inundar el sistema y la separación no se produce. El agente extractor en este caso el agua modifica las volatilidades relativas de los componentes, el agua entra al sistema fluye por la columna de extracción e interacciona con el metanol ya que son miscibles entre sí pero no es miscible con el cloroformo y se produce la separación, y se destila el cloroformo o el producto final de la destilación extractiva es el cloroformo, componente más volátil, se abre la llave de corte para retirar cada una de las fracciones que se van destilando, quedando una mezcla residual de metanol – agua que luego se somete a una destilación simple. En el sistema se añadió una columna de reflujo a bolas para extender el sistema y prevenir que se produzcan fugas en el sistema ya que los componentes de la mezcla son muy volátiles.

## 3. Discusión de resultados

### Optimización de las condiciones de operación de la destilación extractiva

Para la realización de la destilación extractiva fue necesario estudiar las características del sistema y seleccionar un modelo con condiciones óptimas de trabajo.

Al planificar el proceso de destilación extractiva se definieron los objetivos a cumplir además de identificar los factores que influyen en el sistema y las variaciones del mismo. Debemos tomar en cuenta que muchas veces el rango de variables o condiciones experimentales de operación que podemos controlar es limitado. Por lo que se determina las principales causas de variación y los errores más comunes ya sean de tipo aleatorios o sistemáticos y encontrar la manera de reducirlos lo más posible.

Además la ejecución de este método de separación de una manera eficaz requirió no solo de conocer los puntos estacionarios de operación sino también la dinámica y eficiencia y de esta manera trabajar en su punto óptimo.

### ***Selección del disolvente***

Parte de la eficacia del proceso empleado es la posibilidad de añadir un disolvente para la separación de la mezcla. Este disolvente debe tener elevado punto de ebullición, no formar nuevos azeótropos, no volátil y ser fácilmente recuperable. El agua cumplió con estas características, además de tener bajo costo, ampliamente disponible y ser amigable con el medio ambiente.

### ***Cantidad de disolvente añadido***

Se adicionó el disolvente en la columna extractiva en una parte cercana a la cima de la columna y se obtuvo como producto de cima el componente más volátil en este caso el cloroformo y como productos de fondo se obtuvo el componente menos volátil, el metanol, junto con el disolvente añadido el agua. Se propuso 100 mL de disolvente para 200 mL de muestra.

### ***Relleno de la columna extractiva***

Parte importante en el proceso de la destilación para lograr una separación eficiente se debe a la interacción de los componentes de la mezcla con el relleno de la columna, interacción dada por el efecto de revestimiento.

Una columna con relleno puede satisfacer los requerimientos de operación y garantizar una mayor separación, de modo que, proporcione una mayor área superficial, tenga una estructura abierta: baja resistencia al flujo de gas, facilite la distribución uniforme del líquido sobre su superficie, facilite el paso uniforme de vapor a través de toda la sección de la columna. La columna con relleno de anillos rasching y aros metálicos logró acentuar el contacto líquido-vapor y por tanto promovió la separación de los componentes, además de la colocación de un revestimiento de lana de vidrio y papel aluminio permitió mantener una temperatura constante y reducir los cambios bruscos de calor que pudieran interferir en la separación del azeótropo.

### ***Temperatura del sistema***

Tomando en cuenta los puntos de ebullición de cada uno de los componentes del sistema cloroformo

61,2°C, metanol 64,7°C, agua destilada 100,0°C, y el punto de ebullición del azeótropo 53,43°C, en el sistema se tomo un rango de temperatura de 0 – 80°C de manera que estuvieran dentro de ese rango los puntos de ebullición del cloroformo y el metanol por separado y el punto de ebullición del azeótropo, y que estuviera fuera del rango establecido el agua destilada ya que para asegurar la separación el disolvente añadido debe permanecer en la fase líquida.

### ***Tiempo del proceso***

En la destilación extractiva se debe esperar a que la primera fracción de cloroformo empiece a destilar, para la recolección de cloroformo son 2 – 3 min por cada fracción y se obtienen de 6 a 7 fracciones en 200 mL de mezcla se lleva 1 hora de proceso aproximadamente, en la destilación simple se tarda hasta que se destila todo el residuo de la destilación extractiva y como se empleo un destilador automático solo se obtuvo una fracción total de metanol para 108 mL de residuo.

### ***Comparación de la destilación extractiva con los otros métodos de separación azeotrópica***

La destilación extractiva no es el único método aplicable para separar mezclas azeotrópicas; métodos como la destilación con cambios de presión, también son capaces de realizar dicha separación ya que la composición y la temperatura de los azeótropos varían con la presión, esta característica es aprovechada para separar la mezcla. Este método aunque se caracteriza por una alta eficiencia, presenta algunas limitaciones, por ejemplo, la energía requerida para separar el azeótropo es muy alta y los equipos necesarios son muy costosos por lo que no es usada comúnmente ya que no es viable energética y económicamente. Por otra parte existe otro método capaz de realizar dicha separación como lo es la destilación con sales en este proceso se emplea una sal soluble con ambos componentes de la mezcla y esta permanece en una fase líquida alterando la volatilidad relativa de los componentes, separando de manera efectiva dicha mezcla, sin embargo, los problemas con el transporte de corrosión y taponamiento con la sal empleada son los factores que presenta este método. En

esta investigación se separa la mezcla azeotrópica cloroformo-metanol por destilación extractiva con solvente, técnica que en comparación con las anteriores no presenta muchas dificultades es fácil de operar no genera costos elevados y por múltiples estudios experimentales y bibliografías consultadas es la más usada y garantiza la separación de las mezclas azeotrópicas cuando las condiciones son óptimas. El único déficit que presenta la destilación extractiva con solvente es el hecho de que el agente extractor (solvente adicionado) queda como residuo en todas las secciones de la destilación por lo que las fracciones obtenidas no alcanzan un 100 % de pureza por los restos de disolventes presentes.

Si bien no posible obtener las fracciones de cloroformo con un 100 % de pureza se puede mejorar los resultados obtenidos si se le emplea una destilación fraccionada o bien surge una nueva alternativa como lo es la destilación con sal y solvente en la cual la cantidad de agente extractor es menor y se reducen los problemas presentes en la destilación con sal. El aplicar este método también se amerita una investigación previa y un estudio profundo para saber cuál es el mejor solvente y que sal emplear tomando en cuenta la interacción de todo el sistema y lograr separar la mezcla.

### ***Cuantificación de las fracciones obtenidas***

Las fracciones obtenidas del proceso de destilación extractiva y las fracciones de metanol resultantes de la destilación simple, se les determino el porcentaje de pureza empleando tres técnicas analíticas, picnometría, refractometría y cromatografía de gases, para ello se implemento el uso de curvas de calibración. Para determinar el porcentaje de pureza de las fracciones de cloroformo se diseñaron curvas de calibración para cada una de las técnicas antes mencionadas.

Se realizaron 10 patrones, los cuales poseían una relación o concentración conocida. Para determinar la pureza del cloroformo se construyeron las curvas de calibración preparando patrones de cloroformo etanol en un intervalo de 0 – 100 % y luego mediante la interpolación de los diferentes resultados de las muestras en la curvas realizadas, obteniendo así el porcentaje de pureza de cada fracción. Mediante

el mismo procedimiento anterior y aplicando las mismas técnicas se cuantificaron las fracciones de metanol resultantes de la destilación simple pero se construyeron las curvas de calibración a partir de patrones de metanol – agua de 0 – 100 %. El uso de curvas de calibración y la repetición de las medidas obtenidas, además de trabajar con el promedio de las mismas tiende a reducir el error estadísticamente.

Para la cuantificación de las fracciones obtenidas tanto de cloroformo como de metanol fue necesaria la realización de curvas de calibración a partir de un conjunto de patrones que describen el intervalo en el cual se cuantificaran las fracciones. El intervalo de trabajo aplicado fue de 0 – 100 % en el componente de interés. Las curvas de calibración fueron implementadas para la ejecución de las técnicas de picnometría, refractometría y cromatografía de gases, las cuales, fueron utilizadas para determinar la pureza del cloroformo y metanol. El estudio de las curvas de calibración es una de las fases más importante, ya que gracias a esto podemos optimizar o mejorar los parámetros del proceso, reduciendo así los errores aleatorios.

### ***Análisis de los porcentajes de cloroformo resultantes de la destilación extractiva***

El cloroformo producto de la destilación extractiva fue cuantificado mediante tres técnicas analíticas mencionadas, empleando como herramienta el uso de curvas de calibración para cada técnica aplicada, en los tres casos el porcentaje de cloroformo se mantuvo de 90 – 100 %, por lo que fue viable aplicar estas tres técnicas ya que los resultados obtenidos fueron satisfactorios. La Tabla 1, resume los resultados obtenidos.

Tabla 1: Pureza de cloroformo por Técnicas empleadas (%)

| Picnometría | Refractometría | Cromatografía |
|-------------|----------------|---------------|
| 91,47       | 90,11          | 96,70         |

### ***Comparación de los porcentajes de cloroformo obtenidos por las diferentes técnicas de cuantificación***

Los resultados de cloroformo se mantuvieron en un rango de pureza elevado independiente de la técnica empleada, la diferencia que hay entre un valor y otro se debe a los errores que puede presentar aplicar cada uno de estos procesos.

Como los porcentajes obtenidos por picnometría y refractometría son bastante cercanos se puede comparar estos dos métodos, para despejar la duda de cuál método es quien arroja un resultado más confiable.

En el caso de la picnometría debemos tomar en cuenta los errores de calibración de los instrumentos ya que es una técnica que se realiza por pesadas en una balanza analítica. Este tipo de error no está incluido en la estimación del error estadístico. Los errores en la lectura o equivocación en la escala de medición también afectará los resultados finales.

El índice de refracción es medido con un instrumento óptico llamado refractómetro, y es el producto del comportamiento de la luz al atravesar una muestra, por lo tanto, este valor numérico está sujeto a los defectos de un sistema óptico. Las aberraciones producen distorsiones en las imágenes que empobrecen su calidad [8].

Existen un gran número de aberraciones asociadas a la óptica y sus aplicaciones, pero, la que directamente va relacionada con el índice de refracción, son las aberraciones de tipo cromáticas las cuales se deben a la variación del índice de refracción con  $\lambda$ . Como consecuencia, el foco y los aumentos dependen de  $\lambda$ . Su efecto es que cualquier lente simple se comporta como un prisma descomponiendo la luz en sus colores primarios y formando un pequeño espectro alrededor del foco de la lente [8].

Otra aberración óptica presente de manera secundaria son las producidas por el ojo humano al momento del enfoque del lente al utilizar el equipo, el desenfoque, la mala indicación del haz de luz en el refractómetro son errores que están presentes de manera significativa o no en el proceso de la medición del índice de refracción [9],

Por todo lo expuesto anteriormente, y considerando que la reducción de los errores de tipo

sistemáticos y estadísticos son partes fundamental de todo el proceso de cuantificación, debemos señalar que entre la técnica de picnometría e índice de refracción la más eficiente y confiable es la técnica de picnometría, demostrado por los porcentajes de pureza obtenidos mediante este método y porque los errores asociados se pueden controlar con mayor facilidad, manteniendo la técnica en optimización constante.

La *sensibilidad* es definida como la capacidad de un método para diferenciar dos a analitos de similar concentración o determinar pequeñas concentraciones de un analito en una muestra [10]. En base a esto podemos señalar que la CG es la técnica más sensible, además proporciona una amplia información tanto cualitativa como cuantitativa y los análisis por esta técnica son más confiables que los obtenidos por picnometría, con un porcentaje de pureza promedio de 96,70 %.

### ***Análisis de los porcentajes de metanol resultantes de la destilación simple***

Los porcentajes obtenidos de metanol por la técnica de picnometría fue 46,64 % y por refractometría fue 54,75 %. Ambas técnicas de cuantificación varían entre 69–33 % en diferencia de los porcentajes de pureza obtenidos para el cloroformo. El metanol obtenido en menor porcentaje de pureza, pudo haber sido causado por diferentes aspectos metodológicos que afectaron su rendimiento al final del los procedimientos experimentales. Se debe tomar en cuenta que el metanol es el componente que se encuentra en menos proporción en la mezcla azeotrópica inicial y que también es el componente residuo del proceso extractivo y su unión con el solvente empleado modifica sus características generales lo cual contribuye a la separación poco eficiente de la destilación simple.

## **4. Conclusiones**

La destilación extractiva fue aplicada de manera exitosa se logro separar el azeotropo cloroformo–metanol en relación 2:1 obteniendo el cloroformo por separado con resultados viables y eficientes. Se implemento el agua como tercer componente o agente extractor en la destilación extractiva para

la separación de la mezcla azeotrópica, siendo el solvente más adecuado ya que cumplió con todas las características deseadas para la separación. El metanol del residuo de la destilación extractiva fue recuperado mediante una destilación simple. Cuantificando las fracciones obtenidas de cloroformo y metanol utilizando la técnica de picnometría se obtuvo porcentajes de pureza para el cloroformo entre 98,00 %–60,00 % y para el metanol entre 68,00 %–33,00 %.

Aplicando la técnica de refractometría (medida de índice de refracción), se analizaron también dichos componentes de la mezcla ya separados, obtenido un porcentaje de pureza para el cloroformo entre 96,00 %–82,00 % y para el metanol entre 62,00 %–47,00 %. Mediante cromatografía de gases fueron cuantificadas las fracciones de cloroformo producto de la destilación extractiva obteniendo un porcentaje de pureza promedio de 96,70 %.

## Reconocimiento

La presente investigación fue distinguida por el Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacio”, Caracas–Venezuela.

## Agradecimientos

Se agradece al Instituto de Investigaciones Avanzadas (IDEA), en particular al Dr. Xenón Serrano Martín, Jefe del Laboratorio de Biología y Quimioterapia de Parasitosis Tropicales, Coordinador del proyecto *Desarrollo y escalamiento de tecnología para la producción de surfactantes pulmonares*, por proveer el residuo conformado por la mezcla azeotrópica cloroformo – metanol, mezcla principal de estudio en el trabajo realizado.

## Referencias

- [1] J. Acosta E. *Aplicación de agentes separadores heterogéneos a la destilación azeotrópica y extractiva*. Tesis Doctoral en Ciencias Químicas, Departamento de Desarrollo Tecnológico, Centro de Química Farmacéutica, La Habana, Cuba, junio 2004.
- [2] M. del C. Travieso-N. Después de medio siglo de estudio del sistema surfactante pulmonar. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 25(2), 2006.
- [3] A.M. Uyazán, I.D. Gil, J.L. Aguilar, G. Rodríguez, and L.A. Caicedo. Deshidratación de etanol. *Revista Ingeniería e Investigación*, 24(3):49–59, 2003.
- [4] A. Virguez and Y. Zafra. Optimización de un método de separación azeotrópica por destilación extractiva. Trabajo especial de grado, Instituto Universitario Dr. Federico Rivero Palacio, Caracas, 2007.
- [5] J.H. Carmona-C. Separación de propano–propileno mediante destilación extractiva. Trabajo especial de grado, Instituto Politécnico Nacional, México, 2013.
- [6] E.J. Palacio-G. and L.M. Tamayo M. Separación ternaria de una mezcla azeotrópica isopropanol–agua. Trabajo especial de grado, Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT (Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico), Medellín, Colombia, 2013.
- [7] D. Castro-O. and M. Ojeda-C. Conceptualización de un proceso de destilación azeotrópica para el desplazamiento del azeotropo del sistema ácido nítrico/agua. Trabajo especial de grado, Programa de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia, diciembre 2012.
- [8] R. Gil. Aberraciones. In *Optica Geométrica*, Seminario de Ingeniería Óptica, Montevideo, Uruguay, 2011. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
- [9] S. Marcos. Calidad óptica del ojo. *Investigación y Ciencia*, pages 66–74, junio 2005.
- [10] M. Varcárcel and A. Ríos. *La calidad de los laboratorios de analítica*. Reverté, Madrid, 1992.