



Hot science

Pervaporación de mezclas azeotrópicas: Un enfoque sustentable para la industria química moderna

Pervaporation of azeotropic mixtures: A sustainable approach for the modern chemical industry

Aarón Guillermo Castillo Rivera*

Vivian K. Flores

Marlon E. Velasquez

Universidad Nacional Autónoma de Honduras,
Tegucigalpa, Honduras.

*Autor para la correspondencia:
aaron.castillo@unah.hn

Resumen

Son muchos los bioprocesos enzimáticos que producen disoluciones alcohólicas y cada vez estos toman mayor relevancia en el mundo actual. La pervaporación se presenta como una alternativa energéticamente eficiente para la separación de este tipo de disoluciones. En este artículo se presentan tres aplicaciones relevantes: tratamiento de biomasa, industria alimentaria y generación de biocombustibles.

Palabras clave: Pervaporación, bioprocesos, mezclas azeotrópicas.

Summary

There are many enzymatic bioprocesses that produce alcoholic mixtures, and these are becoming more and more relevant in today's world. Pervaporation is presented as an energy efficient alternative for the separation of these types of mixtures. Three relevant applications are presented in this article: biomass treatment, food industry and biofuel generation.

Keywords: Pervaporation, bioprocesses, azeotropic mixtures.

¿Qué son las mezclas azeotrópicas?

Las mezclas azeotrópicas son aquellas que al ser destiladas alcanzan una temperatura o presión donde ya no se pueden separar debido a que la composición del vapor es la misma que la composición líquida. Este punto se le llama azeótropo. Una alternativa efectiva a la destilación para este caso es la pervaporación, técnica de separación que no se ve afectada por la existencia de este punto azeotrópico.

Pervaporación: Uso de membranas como alternativas para procesos de separación

La pervaporación es una operación de separación líquido-líquido basada en el uso de una membrana sintética permeable a un componente, la mezcla líquida se hace circular por un extremo de la membrana mientras que el otro está al vacío, un componente cruza la membrana y se evapora al instante, siendo extraído de inmediato [1]. Como se muestra en la figura 1.

Sin embargo, también existe la alternativa de pervaporación por arrastre de vapor en la

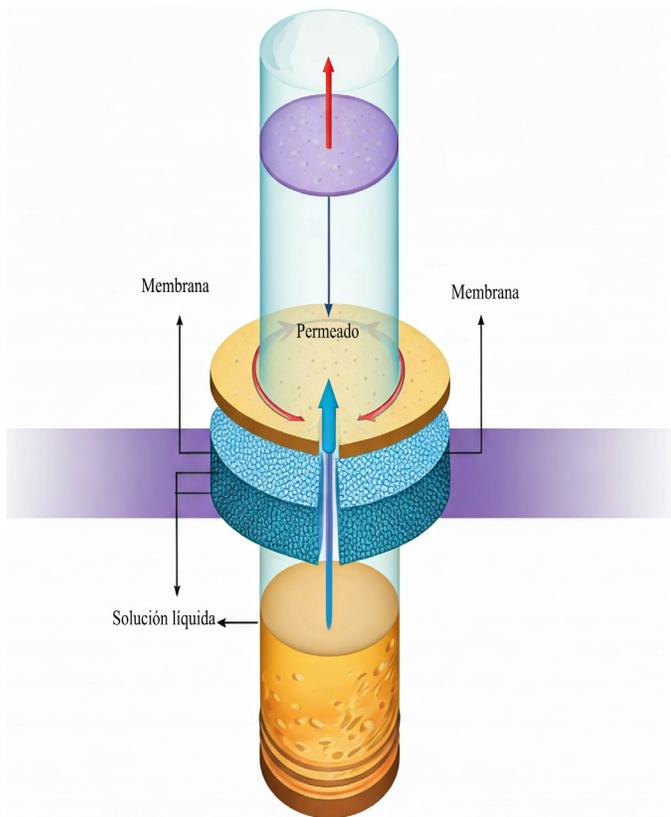


Figura 1. Diagrama de pervaporación (Autoría propia).

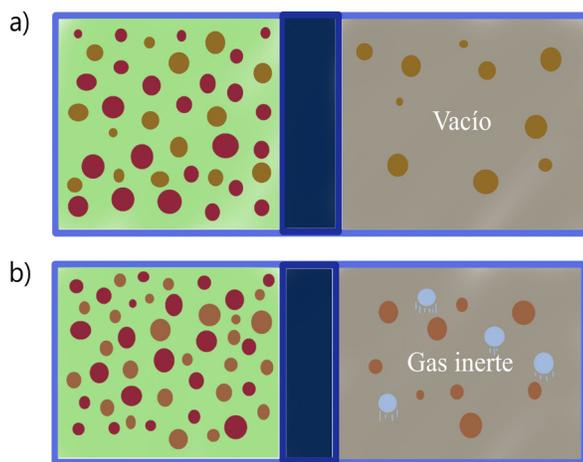


Figura 2. Comparación entre pervaporación al vacío y por arrastre de vapor (Autoría propia).

que se hace pasar un gas inerte del lado del permeado como se muestra en la figura 2.

El paso de efluente a través de la membrana se da en 3 pasos, un primer paso de absorción selectiva donde el componente más soluble en la membrana se absorbe. Una segunda etapa de difusión binaria selectiva donde el flux del efluente, atravesando la membrana en estado estacionario puede expresarse a través de la primera ley de Fick

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dx}$$

Donde x es la dirección unidimensional perpendicular a la membrana. Y una tercera etapa de desorción donde el efluente ha llegado al vacío donde se evapora y se retira de la membrana.

La pervaporación ha sido ampliamente utilizada para separar mezclas azeotrópicas como etanol-agua o butanol-agua, debido a que es más eficiente energéticamente comparada con la destilación [2].

Pervaporación para la producción de bioetanol

Los biocombustibles pueden clasificarse en generaciones según la biomasa de la cual proceden: combustibles de primera generación (los que provienen de alimentos almidonados de consumo humano), de segunda generación (los que provienen de residuos agrícolas) y de tercera generación (algas y otras fuentes de carbono). Los biocombustibles de primera generación no son demasiado convenientes debido a que esa biomasa requiere tierra de cultivo, agua, etc. [4].

Las fuentes de biomasa de segunda generación suelen ser lignocelulósicas, es decir, contienen hemicelulosa, celulosa y lignina en su estructura. La celulosa es un polisacárido de glucosa bastante regular, en contraste la hemicelulosa es un polisacárido amorfo y de composición irregular (es decir que sus azúcares pueden no ser solo glucosa), y la lignina es un biopolímero fenólico que da resistencia a la madera [4].

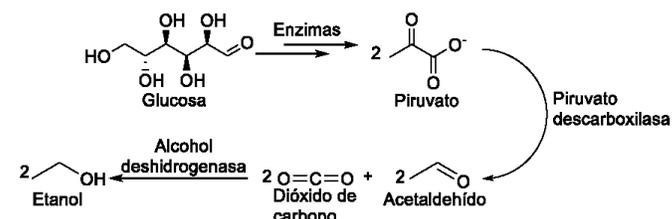


Figura 3. Ruta de fermentación alcohólica (Autoría propia).

El inicio de la ruta fermentativa se da en la molécula de glucosa, por ende, para trabajar esta biomasa se debe darle un pretratamiento para hacer a la glucosa atrapada accesible para su conversión. Un procedimiento convencional

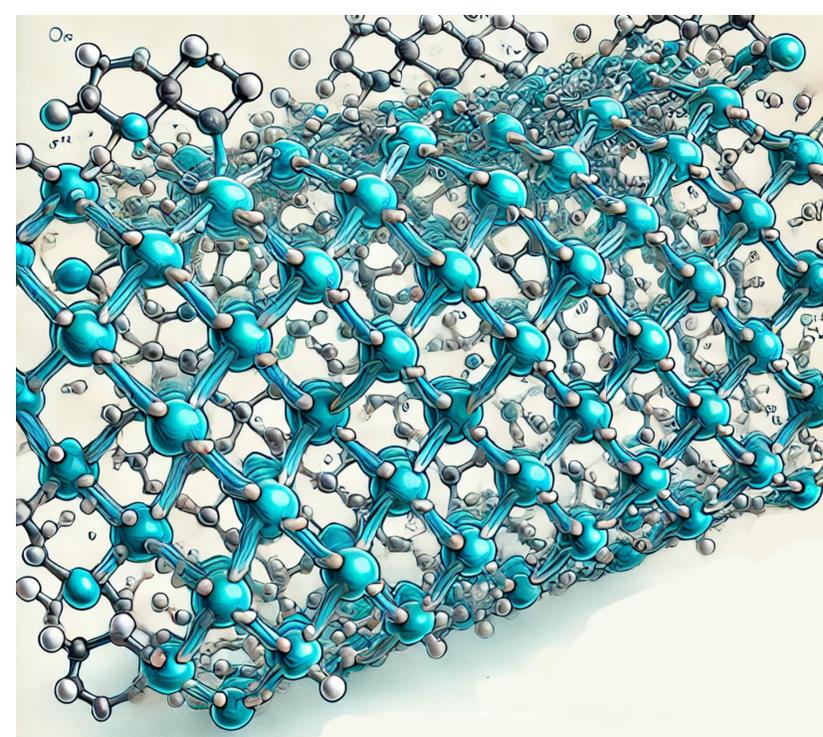


Figura 4: Ilustración de una membrana PDMS (Autoría propia).

es someter a la biomasa a una hidrólisis ácida (exponer a ácidos fuertes) y luego convertir estos polisacáridos en monómeros de glucosa utilizando alguna celulasa (una enzima que rompe las cadenas de celulosa) [1].

El inconveniente es que muchas de estas técnicas generan sustancias que inhiben la acción de los microorganismos que realizan el proceso fermentativo, algunos inhibidores son compuestos fenólicos, furanos y ácidos alifáticos; el mismo bioetanol también puede actuar como un inhibidor de la misma enzima por lo que es necesario removerlo del caldo y utilizar alguna técnica de extracción líquido-líquido u otra para remover el resto de inhibidores o desechar el resto del caldo una vez asegurado el bioetanol [4].

Aquí la pervaporación se presenta como una solución, al remover el bioetanol del caldo incrementa el rendimiento del cultivo, además de que la pervaporación puede acoplarse como una operación unitaria en planta permitiendo una extracción instantánea [4].

Las membranas utilizadas en los procesos de pervaporación son un tema de estudio reciente, para la extracción de etanol en agua, una de las más utilizadas es la membrana de Polidimetilsiloxano (PDMS), los enlaces metilo

funcionan como compuertas hidrofóbicas las cuales dejan pasar al bioetanol, en otras palabras, son membranas que solubilizan el etanol por medio de esa afinidad y facilitan su absorción. [2].

Además de la membrana de PDMS, otras membranas especializadas en la recuperación del etanol son las de quitosano, alginato de sodio y alcohol polivinílico (PVA) [4].

Una de las principales desventajas al trabajar con membranas es el ensuciamiento, catecol y otros residuos lignocelulósicos pueden ser adsorbidos por la membrana haciendo necesario diferencias de presión cada vez mayores para mantener la operación funcionando[4].

Pervaporación para la desalcoholización de vinos y cervezas

El vino contiene numerosos compuestos que desempeñan un papel vital desde el punto de vista de la salud humana. De estos componentes, los dos más importantes son las antocianinas, los compuestos colorantes de los vinos tintos, y la sustancia fenólica resveratrol. Ambos se consideran antídotos naturales contra las enfermedades cardiovasculares [5]. Al implementar técnicas de separación el objetivo es reducir la cantidad de alcohol presente para que los consumidores puedan apreciar las propiedades organolépticas que estas bebidas ofrecen, sin los efectos adversos de las sustancias alcohólicas. Al reducir el contenido de etanol, presente en el vino, que es venenoso para las células del cuerpo humano, y aumentar el número de compuestos valiosos asociados, el organismo humano puede absorber sustancias con propiedades medicinales sin efectos secundarios nocivos. El proceso térmico tradicional destruye la calidad y las características sensoriales, por lo que se han realizado serios esfuerzos para reponer los compuestos aromáticos (por ejemplo, concentrado de mosto) o para evitar su evaporación [5].

Aquí es donde entran en juego los procesos de separación como la pervaporación. El método puede usarse solo o en combinación

con otros métodos. La pervaporación puede producir un permeado con mayor concentración de alcohol, por lo que el vino se vuelve menos denso en comparación con la filtración por membrana; solo cambia ligeramente la consistencia del producto. La pervaporación es una operación suave capaz de extraer selectivamente el etanol del vino que contiene compuestos aromáticos termolábiles [5].

Los análisis económicos pronostican una gran demanda de costos de inversión, que se puede explicar por el precio relativamente alto de las membranas de pervaporación no porosas. Pero la inversión podría ser rentable en unos pocos años. La rentabilidad puede ser impulsada seriamente por el uso de subproductos, por ejemplo, mediante el uso del concentrado de alcohol separado como materia prima para destilados de vino o licores industriales [5].

La membrana PERVAP™ 4101 de Sulzer ChemTech ha demostrado ser una solución eficaz y confiable en aplicaciones relacionadas con la deshidratación de mezclas líquidas. Este tipo de membrana estándar, diseñada para la mayoría de las aplicaciones de deshidratación, permite la separación precisa de agua y alcoholes, aprovechando la tecnología de pervaporación para lograr un alto nivel de pureza sin alterar las propiedades sensoriales de los productos finales [7].

Pervaporación para la optimización de la producción de butanol

Un combustible que es de gran interés es el butanol, debido a su poder calorífico, su índice de octano y otras propiedades físico-químicas. Una de las formas de obtenerlo es mediante un proceso de fermentación que se lleva a cabo por la bacteria de la clase *Clostridia*. Existen varios tipos o especies, cada una variando en su productividad y el tipo de carbohidrato que puede metabolizar. La *Clostridium acetobutylicum* es la más utilizada por su mayor productividad y metabolizar una gran cantidad de hidratos de carbono. [3]

La ruta fermentativa que sigue esta bacteria es la observada en la figura 5, donde los

principales productos que se obtienen son la acetona, butanol y etanol, conocido como la mezcla ABE. El inconveniente que se presenta durante este tipo fermentación es el hecho de que el butanol se comporta como un componente tóxico para la bacteria en concentraciones mayores a los 5 g/L, degradando a la célula y reduciendo su tiempo de vida. Una solución a esta problemática ha sido el uso de un proceso acoplado de biorreactor y pervaporación, gracias a esto se logra bajar las concentraciones de butanol a niveles en los que la bacteria no sufra ningún daño, mejorando el rendimiento de la producción y aumentando el crecimiento del cultivo de bacterias [6].

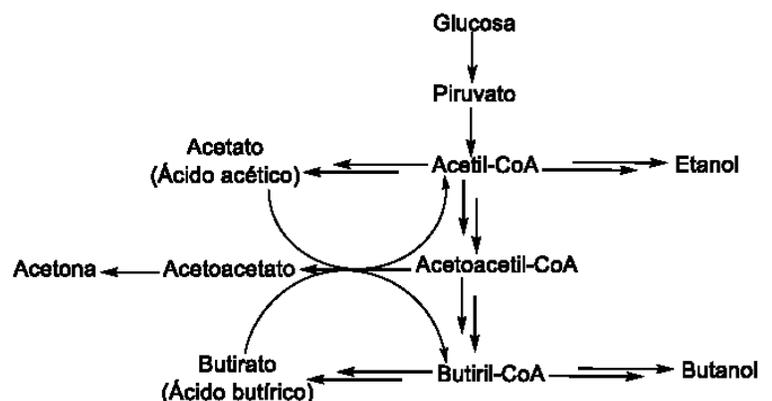


Figura 5. Ruta de fermentación del ácido butírico. (Adaptado de [3]).

Se puede utilizar la pervaporación y el biorreactor como dos unidades de procesos separadas o en ocasiones las membranas de pervaporación se encuentran dentro del biorreactor. La pervaporación se hace mediante presión al vacío para obtener el componente permeado que en este caso será la mezcla acetona-butanol-etanol, esperándose una mayor concentración del butanol. La separación se realiza in situ junto con la fermentación, permitiendo que el proceso se realice de manera continua. Esto también permite que el proceso se pueda llevar a nivel industrial, teniendo en cuenta otras consideraciones [6].

Conclusiones

La pervaporación aparece como una alternativa eficiente que además de poder ser integrada en procesos industriales y de tener apli-

caciones en diversas industrias químicas, abre la puerta al uso de nuevas tecnologías de operaciones unitarias con membrana, dando un paso más hacia el uso de tecnologías mucho más amigables con el medio ambiente. **iBIO**

Agradecimientos

Agradecimiento a Oscar Vladimir Ortiz Hernández por la revisión y edición del presente artículo.

Referencias

- [1] Lipnizki, F. (2010). Membrane process opportunities and challenges in the bioethanol industry. *Desalination*, 250(3), 1067–1069. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.109>
- [2] Serna-Vázquez, J., Zamidi Ahmad, M., & Castro-Muñoz, R. (2021). Simultaneous production and extraction of bio-chemicals produced from fermentations via pervaporation. *Separation and Purification Technology*, 279, 119653. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119653>
- [3] Lee, S. Y., Park, J. H., Jang, S. H., Nielsen, L. K., Kim, J., & Jung, K. S. (2008). Fermentative butanol production by clostridia. *Biotechnology and Bioengineering*, 101(2), 209–228. <https://doi.org/10.1002/bit.22003>
- [4] Nogueira, C. da, Padilha, C. E., Dantas, J. M., Medeiros, F. G., Guilherme, A. de, Souza, D. F., & Santos, E. S. (2021). In-situ detoxification strategies to boost bioalcohol production from lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*, 180, 914–936. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.012>
- [5] Takács, L., Vatai, G., & Korány, K. (2005c). Production of alcohol-free wine by pervaporation. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.005>
- [6] Li, J., Chen, X., Qi, B., Luo, J., Zhang, Y., Su, Y., & Wan, Y. (2014). Efficient production of acetone–butanol–ethanol (ABE) from cassava by a fermentation–pervaporation coupled process. *Bioresource Technology*, 169, 251–257. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.102>
- [7] Sulzer Chemtech. Membrane Technology. Disponible desde: <https://www.sulzer.com/-/media/files/products/process-technology/reaction-technology/brochures/membrane-technology.ashx>. Consultado: enero 6, 2025.