

Artículos de Revisión

DOI:10.18684/BSAA(14)135-144

EVAPORACIÓN OSMÓTICA: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES EN LA CONCENTRACIÓN DE JUGOS DE FRUTA

OSMOTIC EVAPORATION: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS TO THE CONCENTRATION OF FRUIT JUICES

EVAPORAÇÃO OSMÓTICA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES NA CONCENTRAÇÃO DE SUCOS DE FRUTAS

ADRIANA PATRICIA PULIDO-DÍAZ¹, FREDDY FORERO-LONGAS², SERGIO ANDRÉS CABRERA-NAVARRO³

RESUMEN

La evaporación osmótica es una modificación de los procesos tradicionales que utilizan membranas; donde por efecto de un diferencial de presión de vapor, producido por una solución de extracción fuertemente concentrada, se transfiere agua solo en forma de vapor a través de una membrana que actúa como cuerpo hidrófobo. Esta tecnología de membranas se presenta como una gran alternativa para el procesamiento de frutas exóticas, produciendo concentrados que pueden ser usados en la dieta diaria, siendo más fáciles de consumir, reduciendo costos de transporte y aumentando la vida útil. Este proceso tiene múltiples ventajas comparado con las operaciones tradicionales de separación, pues permite trabajar a presión atmosférica y baja temperatura, siendo ideal para productos sensibles al calor.

Recibido para evaluación: 13 de Abril de 2015. **Aprobado para publicación:** 3 de Mayo de 2016.

- 1 Universidad del Valle. Ingeniero Agroindustrial, Estudiante Doctorado en Ingeniería de Alimentos. Cali, Colombia.
- 2 Universidad de Antioquia. Ingeniero Agroindustrial, Doctor en Ingeniería, Profesor asistente. Medellín, Colombia.
- 3 Sena Regional Tolima. Ingeniero Agroindustrial. Instructor Red Tecnoparque Nodo La Granja. Espinal, Colombia.

Correspondencia: adriana.pulido@correounivalle.edu.co

ABSTRACT

Osmotic evaporation is a modification of traditional processes using membranes; where the effect of a vapor pressure differential, produced by a highly concentrated solution of extraction, water is transferred as vapor through a membrane that acts as a hydrophobic body. This membrane technology is presented as a great alternative for processing exotic fruits, producing concentrates that can be used in the daily diet, being more comfortable to use, reducing transportation costs and increasing the shelf life. This process has many advantages compared to traditional operations, allowing operated at atmospheric pressure and low temperature, ideal for heat-sensitive products.

RESUMO

Evaporação osmótica é uma modificação de processos tradicionais que utilizam membranas; onde o efeito de uma diferença de pressão de vapor, produzido por uma solução altamente concentrada de extração, a água é transferida a forma de vapor através de uma membrana que actua como um corpo hidrofóbico. Esta tecnologia de membranas é apresentado como uma boa alternativa para o processamento de frutos exóticos, produzindo os concentrados que podem ser utilizados na dieta diária, ser mais confortável de usar, reduzindo os custos de transporte e aumentando a vida de serviço. Este processo tem muitas vantagens quando comparado com as operações tradicionais, permitindo operado à pressão atmosférica e temperatura baixa, ideal para produtos sensíveis ao calor.

INTRODUCCIÓN

La evaporación osmótica (EO) es una de las variantes de la destilación por membranas (DM). En este proceso se usan membranas hidrófobas, cuyos poros se llenan con la fase gaseosa del fluido que se desea concentrar, lo que previene la penetración del agua, de tal modo que sólo los componentes volátiles de la alimentación pueden ser transportados a través de la membrana [1]. La diferencia de presión parcial entre los líquidos, que se encuentran separados por la membrana dentro del sistema, se acepta en general como la fuerza impulsora, cuyo valor depende de la temperatura y composición de las capas adyacentes a la superficie de la membrana; el gradiente de presión parcial puede formarse por diferencia de temperatura y de concentración [2].

La DM se lleva a cabo de varios modos, según la forma de colectar el permeado, el mecanismo de transferencia de masa a través de la membrana y el origen de la fuerza impulsora, características que se utilizan para generar la nomenclatura usada para estas técnicas [3]. El término "Evaporación Osmótica" ha sido generalizado, sin necesidad de mencionar las palabras "Destilación por membranas", a fin de resaltar la marcada influencia de la concentración dentro del proceso, algunos autores la denominan también destilación osmótica, concentración osmótica o destilación isotérmica [4]. El objetivo fundamental de este

PALABRAS CLAVE:

Tecnología de membranas,
Conservación, Transferencia masa

KEYWORDS:

Membrane technology,
Conservation, Mass transfer

PALAVRAS-CHAVE:

Tecnología de membranas,
Conservação, Transferência de
massa.

documento es presentar de una forma amena pero rigurosa la tecnología de evaporación osmótica, explicando conceptos clave y su aplicación en el campo de la concentración de productos alimentarios.

FUNDAMENTOS

Características de las membranas

Convencionalmente, las membranas usadas en la mayoría de estudios de EO se fabrican para procesos de separación, como la micro filtración o similares, debido a que la mayoría de las características requeridas por el proceso de EO las cumplen membranas disponibles comercialmente; de otra parte, la necesidad de nuevas membranas diseñadas y fabricadas específicamente para este proceso, es una necesidad que ha sido reconocida ampliamente por muchos investigadores [5-7]. En el proceso de evaporación osmótica (EO), la hidrofobicidad de la membrana es el factor dominante en la selección de la misma, dentro de la gran variedad de materiales existentes en la tecnología de membranas, existen cuatro que se usan con mayor frecuencia: polipropileno, fluoruro de polivinilideno, politetra fluoroetileno y el polietileno [8-10].

Los criterios para seleccionar una membrana para EO han sido propuestos por diversos autores, dichos criterios buscan asegurar la estabilidad de la membrana y maximizar el flux del proceso, estos incluyen:

Hidrofobicidad alta. La Presión Transmembranaria Mínima o PTM, debe ser tan alta como sea posible, donde ésta se define como la presión transmembranaria mínima que se requiere para que el agua destilada u otras soluciones de alimentación puedan entrar en los poros al superar las fuerzas hidrofóbicas [11]. **Porosidad elevada,** debido a que el flux es proporcional a este parámetro, la distribución del tamaño de poro debe ser tan estrecha como sea posible y el líquido de alimentación no debe penetrar en los poros; sin embargo, una porosidad demasiado alta, podría desencadenar en una insuficiencia del polímero, para transferir efectivamente el calor y ayudar a reducir el efecto negativo de la polarización por temperatura [12].

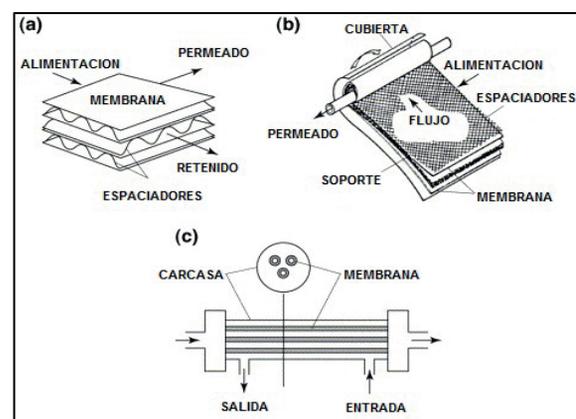
El factor de tortuosidad. Es la medida de la desviación de la estructura de los poros, del ideal de poros cilíndricos rectos normales a la superficie y debe ser

pequeño, siendo éste inversamente proporcional a la permeabilidad de la membrana. En los estudios de EO, con el fin de predecir el flujo transmembranario, es frecuente asumir un valor de 2 para este parámetro. El espesor en membranas de una sola capa se debe optimizar, debido a que éste es inversamente proporcional a la velocidad de transferencia de masa y calor por conducción a través de la membrana. En el caso de una membrana de varias capas, el espesor de la capa hidrófoba debe ser pequeño [13].

La conductividad térmica del material de la membrana debe ser baja, hay que mencionar aquí que la mayoría de los polímeros hidrófobos tienen valores de conductividad térmica similares y dentro del mismo orden de magnitud. La conductividad térmica de las membranas comerciales se encuentra entre 0,04 y 0,06 (W/ m K). La *Estabilidad térmica* de la membrana como un todo debe llegar hasta temperaturas de 80°C; además, de una excelente resistencia química a variedad de soluciones de alimentación y especialmente a los agentes utilizados en la limpieza (ácidos-bases), finalmente, otro requerimiento muy importante, es que las membranas deben ser económicas [14].

Como se observa en Figura 1, las membranas para EO tienen diferentes configuraciones, lo cual determina fuertemente características como la morfología, microestructura, flujos transmembranarios y factores de rechazo. Para resumir, la membrana debe presentar una baja resistencia a la transferencia de masa, no deben ser humedecidas por las

Figura 1. Tipos de módulos y membranas: a) Plana, b) Espiral, c) Fibra hueca.



Fuente. [15]

soluciones acuosas en contacto, sólo vapor y gases no condensables deben estar presentes en los poros durante la operación; como el agua es generalmente el componente principal en la solución de alimentación, la membrana debe ser hidrofóbica y por lo tanto fabricarse con polímeros o materiales inorgánicos con baja energía superficial.

Agentes osmóticos

Los agentes osmóticos (AO), hacen referencia a las sustancias utilizadas para preparar la salmuera o que son usados directamente como solución extractora en la EO. La selección del AO es muy importante, porque éste además de crear la fuerza impulsora del proceso, influye en el desempeño general de todo el sistema de EO. Primero que todo, es deseable en un AO, que sea capaz de proveer a la solución una actividad de agua baja; así mismo, este debe cumplir con otras cualidades para asegurar la integridad del proceso, la seguridad y calidad del producto final, al igual que la economía.

Por otra parte, se desea que el AO reúna las siguientes características:

No tóxico para humanos y animales, debido a que el AO está separado de los productos alimenticios, por una delgada membrana, que bajo ciertas condiciones puede ser atravesada permitiendo su difusión hacia el producto. Estabilidad química a temperaturas arriba del punto normal de ebullición de las soluciones salinas; además, si la solución extractora se planea recuperar por medio de evaporación, el AO debe ser capaz de resistir este calentamiento sin perder sus propiedades [16].

En general, el AO más usado, en las primeras aplicaciones de la EO, fue el NaCl por su bajo costo y poca toxicidad; sin embargo, el cloruro de sodio tiene baja solubilidad y su actividad de agua en solución saturada está cerca de 0,75; la cual es alta en comparación a una solución saturada de cloruro de calcio (CaCl) (0,25), esto significa que el NaCl no produce una presión de vapor baja como para ser empleado en la EO [17].

Las salmueras preparadas con $\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ y MgCl_2 son mucho más eficientes que el NaCl, la aplicación de estas sales debe ser rigurosamente evaluada, en términos de seguridad y economía, por estas razones el CaCl ha surgido como una alterna-

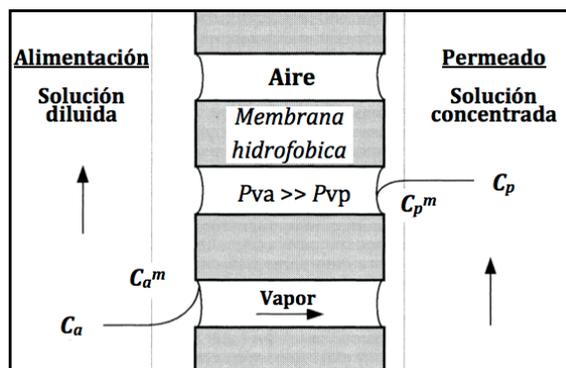
tiva, por disponibilidad en el mercado, bajo costo, poca toxicidad y alta presión osmótica. La reconcentración de la salmuera diluida es importante en la EO, con el fin de mantener las propiedades de la salmuera y con ello la estabilidad del proceso. Ésta recuperación puede ser efectuada por diferentes técnicas dentro de las que se incluyen la evaporación convencional, pervaporación, ósmosis inversa, electrodiálisis [18].

En los procesos con membranas, la limpieza es importante para mantener y restaurar el flux. Además, afecta su vida útil, la cual es significativamente reducida, si la limpieza no es efectuada regular y adecuadamente, estos mantenimientos deben asegurar que la hidrofobicidad de la membrana no se verá afectada. Algunos de los factores que deben ser considerados, cuando se limpian las membranas son el tipo de agente, concentración, tiempo, temperatura y agitación. Dentro de los agentes están los ácidos, álcalis, detergentes, enzimas y complejos, la selección del mismo depende de la naturaleza y composición de la membrana, en la EO, en este sentido son pocos los trabajos publicados acerca del tema y generalmente se aplican agentes que han dado buenos resultados en otros procesos, como la ósmosis inversa [19].

Fenómenos de transporte

El elemento poroso de la membrana del sistema de EO, se encuentra en contacto íntimo con los dos líquidos circulantes, como se presenta en la Figura 2, la temperatura de la alimentación es baja y cercana a la de la salmuera. Gracias a la hidrofobicidad del polímero, la membrana no se moja por los líquidos, creando una interface vapor – líquido a la entrada de los poros. La

Figura 2. a) Principio del proceso de evaporación osmótica.



diferencia en actividad de agua entre la solución acuosa (C_a) y la salmuera (C_p) se traduce en una diferencia de presiones de vapor ($P_{va} >> P_{vp}$), siendo la fuerza impulsora para el transporte de vapor [20].

El proceso de transporte de masa puede ser dividido en tres etapas: el paso inicial y final es la transferencia de agua, desde la solución diluida, a través de la interface de evaporación y viceversa desde la superficie de condensación hacia la salmuera, el paso intermedio es el movimiento en fase de vapor a través del material poroso. La diferencia de presión de vapor a través de la membrana, se obtiene con los agentes osmóticos y algunos líquidos orgánicos, como glicerol y poli glicoles, que tienen alta solubilidad, baja actividad de agua y alta tensión superficial.

El modelo básico para describir el sistema, está dado por la ecuación 1, que relaciona el flux y la fuerza impulsora, por medio de una constante de proporcionalidad (K) [21].

$$N = K(P_{va} - P_{vp}) \quad (\text{Ec.1})$$

Las resistencias globales a la transferencia de masa están presentes en las capas límite; además, la transferencia de calor a través de estas capas influye en la tasa de transferencia de masa y depende principalmente de las propiedades físicas y las condiciones hidrodinámicas de las soluciones. Bailey y colaboradores [22] afirmaron que las resistencias que se producen en la EO, deben reducirse para lograr el máximo rendimiento de proceso, la naturaleza y alcance de estas resistencias son diferentes a los procesos de membranas impulsados por presión, se especifican tres tipos de resistencias en las capas límite: polarización, concentración y viscosidad [23].

Debido a que los poros de la membrana contienen aire, proveniente del líquido alimentado que se encuentra a presión cercana de la atmosférica, teóricamente sólo dos mecanismos pueden estar involucrados en la transferencia de vapor, difusión de Knudsen y difusión molecular. De acuerdo con la teoría cinética de los gases, la ecuación 2 es usada como un primer criterio para determinar cuál de los dos mecanismos de difusión puede ser el predominante.

$$Kn = \frac{\lambda}{2r} \quad (\text{Ec.2})$$

Al analizar la Figura 2, el flujo a través de las capas de polarización, tanto del lado de la alimentación como del permeado, puede ser expresado en forma simple mediante las ecuaciones 3 y 4, aunque algunos autores desprecian estas capas de polarización, para casos en los que la alimentación es sólo agua y bajo condiciones donde se pretende cuantificar otros parámetros [24].

$$N = k_a(C_a - C_a^m) \quad (\text{Ec.3})$$

$$N = k_p(C_p - C_p^m) \quad (\text{Ec.4})$$

Si se tiene en cuenta la resistencia debida a la polarización, las concentraciones en las capas límites de la membrana son estimadas en la EO por el modelo simplificado presentado en las ecuaciones 5 y 6, donde ρ_w es la densidad del agua. Este modelo no toma en cuenta el cambio de la distribución de la capa a lo largo del módulo.

$$C_a^m = C_a \exp\left(\frac{N}{\rho_w k_a}\right) \quad (\text{Ec.5})$$

$$C_p^m = C_p \exp\left(\frac{-N}{\rho_w k_p}\right) \quad (\text{Ec.6})$$

Al tratarse de módulos de fibras huecas, pueden aplicarse modelos semi empíricos para predecir el coeficiente (k_a), para lo cual el flujo de la alimentación dentro de la fibra puede asimilarse al que se presenta en una tubería. Por esta razón, la ecuación de Sieder – Tate y sus análogas, para transferencia de masa, pueden ser aplicadas. Se han realizado varios estudios para generar modelos a fin de estimar el coeficiente (k_p) por fuera de las fibras huecas (lado de la carcasa). Recientemente se ha desarrollado una nueva expresión, con la cual se logra una mejor descripción del fenómeno, encontrando que el número de Reynolds es función de la densidad de empaquetamiento [25]. El proceso de EO se considerada isotérmico siempre que no exista una diferencia de temperatura a través de la membrana. Sin embargo, debido al calor latente del cambio de fase ocurrido en las paredes, la evaporación genera un ligero enfriamiento en la alimentación y la condensación calienta la salmuera, con lo cual la transferencia de masa está asociada con la de calor; esta diferencia de temperatura resultante se convierte en un decaimiento del gradiente de presión de vapor, con la consiguiente disminución de la fuerza impulsora [26].

La Figura 3 presenta el mecanismo de transferencia de calor como un conjunto de resistencias y un perfil de temperaturas (T) bajo condiciones medias. Las expresiones 7 y 8 representan el balance de calor (Q) en los diferentes compartimentos del sistema y el coeficiente total (H), respectivamente.

$$Q = H \Delta T = h_a (T_a - T_a^m) \quad (\text{Ec.7})$$

$$H = \left[\frac{1}{h_a} + \frac{1}{h_m + (N \Delta H_v) / \Delta T_m} + \frac{1}{h_p} \right]^{-1} \quad (\text{Ec.8})$$

El balance de calor es aplicable a módulos de membranas planas como de fibra hueca [27], la diferencia para estos dos sistemas radica en el cálculo de los coeficientes de transferencia, debido a características físicas como la porosidad, conductividad, tortuosidad, colmatación y rugosidad entre otros, características que afectan la magnitud de los coeficientes; sumado a esto se tienen las características hidrodinámicas diferentes, que favorecen la transferencia en módulos de fibras huecas [28].

APLICACIONES EN JUGOS DE FRUTAS

Los procesos con membranas presentan muchas ventajas sobre otras técnicas de conservación, siendo la principal, que la calidad del producto se mantiene, puesto que se trabaja a bajas temperaturas, se tienen bajos requerimientos energéticos, pocas exigencias de espacio y una amplia flexibilidad de operación [29, 30]. La tecnología de membranas más aplicada ha sido la ultrafiltración, siendo exitosamente probada en el procesamiento de una amplia variedad de jugos de frutas como la tuna [31], mandarina

[32], kiwi [33], manzana [34], donde ha permitido obtener productos con muy buenas características fisicoquímicas, sensoriales y una buena aceptación en el mercado; el limitante común en la aplicación de la ultrafiltración, sigue siendo la colmatación de la membrana que reduce el flux de permeado con el transcurso del tiempo de proceso [35-37].

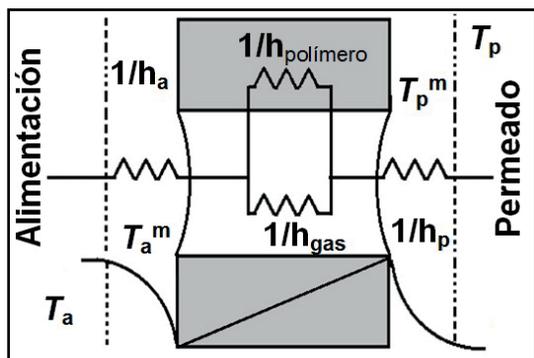
En cuanto a las aplicaciones de la evaporación osmótica, al analizar casos específicos como el del jugo de naranja (*Citrus sinensis*), el concentrado obtenido por esta técnica presentó una composición similar de ácidos orgánicos y azúcares al jugo inicial, con una pérdida de 20% en vitamina C, posiblemente por fenómenos de oxidación [38]; en otro estudio efectuado con melón (*Cucumis melo*), el jugo conservó la glucosa, fructosa, sacarosa, y vitamina C iniciales, sin degradación del color, pero con una reducción de los compuestos fenólicos del 30% a pH inferior de 4, en un periodo de 20 días [39].

El maracuyá (*Passiflora edulis*) [40, 41] y cholupa (*Passiflora malliformis*) [42] concentrados por evaporación osmótica, son superiores en las características organolépticas, cuando se compara con otros jugos obtenidos por evaporación tradicional, especialmente en el contenido de vitamina C; con la evaporación osmótica se produce una leve pérdida de compuestos aromáticos, que pueden recuperarse al mezclarlos con una pequeña cantidad de retenido.

La piña (*Ananas comosus*) no tiene cambios fisicoquímicos significativos, el color es altamente preservado, no hay pérdida detectable de aromas [43], este comportamiento es similar al del kiwi (*Actinidia deliciosa*) [44] y Camu - Camu (*Myrciaria dubia*) [45], donde los principales factores de calidad fueron la pérdida de vitamina C y el cambio de color, en todos los trabajos se confirman las bondades de la técnica y se hace referencia a la importancia de profundizar en los fenómenos fundamentales y el aumento de la eficiencia.

El jugo de uva (*Vitis vinifera L*) debido a su alto contenido de azúcares [46], es fácilmente fermentable, lo cual deteriora rápidamente su calidad, la EO ha sido aplicada en combinación con la micro filtración, a fin de obtener un concentrado estable, por el alto nivel de azúcares (> 60 °Brix), un pretratamiento de clarificación ayuda a mantener estable el flux de evaporación; manteniendo las características sensoriales y disminuyendo ligeramente la intensidad del aroma [22, 47].

Figura 3. Perfil de temperatura y resistencias a la transferencia de calor en EO.



La producción de jugo concentrado de granada (*Punica granatum*), ha sido investigada mediante el uso de un proceso combinado de membranas: clarificación del zumo fresco realizado por ultrafiltración y concentración usando la evaporación osmótica. Ambos procesos se realizaron a temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ\text{C}$), obteniéndose un clarificado de 16,2 °Brix y un concentrado de 52 °Brix. De las pruebas funcionales, se evidenció que la capacidad antioxidante, fenoles y antocianinas, se conservan durante la concentración, con lo cual se obtiene un producto que puede tener mercado en muchas áreas farmacéuticas y alimentarias [48].

El noni (*Morinda citrifolia*) ha sido reportado como una fruta con múltiples propiedades nutraceuticas, principalmente asociadas con un alto contenido de fenoles, la aplicación de la evaporación osmótica para obtener un concentrado altamente funcional, demostró que es posible obtener niveles de sólidos solubles de 32 °Brix, después de 1 hora de proceso, usando un módulo de fibras huecas y cloruro de calcio como extractante. Las características dietarias se conservaron en el producto final, detectándose un incremento en la intensidad aromática y del color [49].

Para el jugo de arándano (*Vaccinium macrocarpon*) concentrado a escala de laboratorio por EO con temperaturas entre 30-40°C y utilizando CaCl_2 como solución de extracción, se han alcanzado flujos de vapor de agua que variaron entre 0,25 y 1,21 L h⁻¹ m⁻². De igual forma, se han alcanzado concentraciones de 48 °Brix en 18 minutos a partir de jugo con un contenido inicial de 8,6 °Brix, los autores encontraron que el contenido de fenoles totales fue preservado durante la concentración [50].

CONCLUSIONES

La evaporación osmótica es un proceso sencillo desde el punto de vista técnico, pero altamente complejo en el análisis matemático y físico de los fenómenos de transferencia que se presentan, con la particularidad que son de carácter simultáneo. El material de la membrana, el agente osmótico, las características hidrodinámicas de los módulos y las velocidades de flujo, son parámetros determinantes en la magnitud de los coeficientes de transferencia, tanto de calor como masa, siendo una de las áreas donde se debe investigar en futuros trabajos, para encontrar modelos específicos que permitan optimizar y hacer

robusto el proceso, frente a diversidad de materias primas, especialmente cuando se trata de materiales complejos como los alimentos líquidos.

De análisis efectuado se evidencia que la evaporación osmótica es una tecnología de membranas alternativa para el procesamiento de frutas exóticas, produciendo concentrados que pueden implementarse en la dieta diaria, siendo cómodos de usar, reduciendo costos de transporte y aumentando la vida útil; convirtiéndose de esta forma en una alternativa para las industrias de alimentos, que buscan innovar con sabores y aromas, en áreas como las de bebidas gaseosas, energizantes, infantiles y funcionales.

NOMENCLATURA

C	Concentración molar soluto (mol l ⁻¹)
d_p	Diámetro de poro (m)
H	Coef total transferencia calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
H_v	Calor de vaporización (kJ/kg ⁻¹)
h	Coef transferencia calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
K	Coef transferencia masa ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{Pa}^{-1}$)
k	Conductividad térmica (W/K·m)
N	Flux vapor, masa ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$), ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).
P	Presión (Pa)
P^*	Presión vapor saturado (Pa)
Q	Flux de calor (W m^{-2})
r	Radio de poro (m)
T	Temperatura (°C, K)

Números adimensionales

Kn	Knudsen
Nu	Nusselt
Re	Reynolds

Subíndices

a	Alimentación
i	Interno
o	Externo
m	Membrana
p	Permeado
w	Agua

Símbolos

ε	Porosidad
δ	Espesor (m)
Δ	Diferencia
λ	Trayectoria media libre (m)
ρ	Densidad (kg m^{-3})

REFERENCIAS

- [1] WARSINGER, D.M., SWAMINATHAN, J., GUILLEN-BURRIEZA, E., ARAFAT, H.A. and LIENHARD, J.H. Scaling and fouling in membrane distillation for desalination applications: A review. *Desalination*, 356(0), 2015, p. 294-313.
- [2] WANG, P. and CHUNG, T.S. Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring. *Journal of Membrane Science*, 474(0), 2015, p. 39-56.
- [3] MANNA, M.S., SAHA, P. and GHOSHAL, A.K. Separation of medicinal catechins from tea leaves (*Camellia sinensis*) extract using hollow fiber supported liquid membrane (HF-SLM) module. *Journal of Membrane Science*, 471(0), 2014, p. 219-26.
- [4] TIJING, L.D., WOO, Y.C., CHOI, J.S., LEE, S., KIM, S.H. and SHON, H.K. Fouling and its control in membrane distillation—A review. *Journal of Membrane Science*, 475(0), 2015, p. 215-44.
- [5] LEE, M., WU, Z., WANG, R. and LI, K. Micro-structured alumina hollow fibre membranes – Potential applications in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 461(0), 2014, p. 39-48.
- [6] HUANG, S.M., YANG, M. and CHEN, S. Effects of the random distributions on the longitudinal transport phenomena between an elliptical hollow fiber membrane bundle. *Journal of Membrane Science*, 471(0), 2014, p. 362-71.
- [7] AKHONDI, E., WICAKSANA, F., KRANTZ, W.B. and FANE, A.G. Evaporometry determination of pore-size distribution and pore fouling of hollow fiber membranes. *Journal of Membrane Science*, 470(0), 2014, p. 334-45.
- [8] XIE, Z., DUONG, T., HOANG, M., NGUYEN, C. and BOLTO, B. Ammonia removal by sweep gas membrane distillation. *Water Research*, 43(6), 2013, p. 1693-9.
- [9] ZHANG, W., HAO, Z., CHEN, G., LI, J., LI, Z., WANG, Z. and REN, Z. Effect of porosity on mass transfer of gas absorption in a hollow fiber membrane contactor. *Journal of Membrane Science*, 470(0), 2014, p. 399-410.
- [10] OUYANG, Y.W., LI, Z.X. and ZHANG, L.Z. Oblique fluid flow and heat transfer across a hollow fiber membrane bank under uniform temperature conditions. *Journal of Membrane Science*, 470(0), 2014, p. 524-34.
- [11] ABU-ZEID, M.A.E.R., ZHANG, Y., DONG, H., ZHANG, L., CHEN, H.L. and HOU, L. A comprehensive review of vacuum membrane distillation technique. *Desalination*, 356(0), 2015, p. 1-14.
- [12] ZHAO, S., FERON, P.H.M., XIE, Z., ZHANG, J. and HOANG, M. Condensation studies in membrane evaporation and sweeping gas membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 462(0), 2014, p. 9-16.
- [13] YANG, X., FRIDJONSSON, E.O., JOHNS, M.L., WANG, R. and FANE, A.G. A non-invasive study of flow dynamics in membrane distillation hollow fiber modules using low-field nuclear magnetic resonance imaging (MRI). *Journal of Membrane Science*, 451(0), 2014, p. 46-54.
- [14] MANAWI, Y.M., KHRAISHEH, M.A.M.M., FARD, A.K., BENYAHIA, F. and ADHAM, S. A predictive model for the assessment of the temperature polarization effect in direct contact membrane distillation desalination of high salinity feed. *Desalination*, 341(0), 2014, p. 38-49.
- [15] ZHOU, S., KIM, J. and KIM, D. Cross-linked poly(ether ether ketone) membranes with pendant sulfonic acid groups for fuel cell applications. *Journal of Membrane Science*, 348(1-2), 2010, p. 319-25.
- [16] GUAN, G., YANG, X., WANG, R., FIELD, R. and FANE, A.G. Evaluation of hollow fiber-based direct contact and vacuum membrane distillation systems using aspen process simulation. *Journal of Membrane Science*, 464(0), 2014, p. 127-39.
- [17] ALSAADI, A.S., FRANCIS, L., AMY, G.L. and GHAFFOUR, N. Experimental and theoretical analyses of temperature polarization effect in vacuum membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 471(0), 2014, p. 138-48.
- [18] ZHU, Z., LUO, J., DING, L., BALS, O., JAFFRIN, M.Y. and VOROBIEV, E. Chicory juice clarification by membrane filtration using rotating disk module. *Journal of Food Engineering*, 115(2), 2013, p. 264-71.
- [19] YANG, J., YU, X., YAN, J., TU, S.T. and DAHLQUIST, E. Effects of SO₂ on CO₂ capture using a hollow fiber membrane contactor. *Applied Energy*, 112(0), 2013, p. 755-64.
- [20] DOMINGUES, R.C.C., RAMOS, A.A., CARDOSO, V.L. and REIS, M.H.M. Microfiltration of passion fruit juice using hollow fibre membranes and evaluation of fouling mechanisms. *Journal of Food Engineering*, 121(0), 2014, p. 73-9.
- [21] VIGUIÉ, J., SAVART, T., DURU, P., ROUCH, J.C. and REMIGY, J.C. Characterisation of 3D porous

- macrostructure of hollow fibre membranes using X-ray tomography—Effects of some spinning process conditions. *Journal of Membrane Science*, 435(0), 2013, p. 11-20.
- [22] BAILEY, A.F.G., BARBE, A.M., HOGAN, P.A., JOHNSON, R.A. and SHENG, J. The effect of ultrafiltration on the subsequent concentration of grape juice by osmotic distillation. *Journal of Membrane Science*, 164(1-2), 2012, p. 195-204.
- [23] FORERO, F. and VELEZ, C.A. Analysing transfer phenomena in osmotic evaporation. *Ingeniería e Investigación*, 31(3), 2011, p. 40-9.
- [24] SHI, H., LIU, F. and XUE, L. Fabrication and characterization of antibacterial PVDF hollow fibre membrane by doping Ag-loaded zeolites. *Journal of Membrane Science*, 437(0), 2013, p. 205-15.
- [25] RAHBARI-SISAKHT, M., ISMAIL, A.F., RANA, D. and MATSUURA, T. Carbon dioxide stripping from diethanolamine solution through porous surface modified PVDF hollow fiber membrane contactor. *Journal of Membrane Science*, 427(0), 2013, p. 270-5.
- [26] ONSEKIZOGLU, P. Production of high quality clarified pomegranate juice concentrate by membrane processes. *Journal of Membrane Science*, 442(0), 2013, p. 264-71.
- [27] FENG, C.Y., KHULBE, K.C., MATSUURA, T. and ISMAIL, A.F. Recent progresses in polymeric hollow fiber membrane preparation, characterization and applications. *Separation and Purification Technology*, 111(0), 2013, p. 43-71.
- [28] NAIM, R., KHULBE, K.C., ISMAIL, A.F. and MATSUURA, T. Characterization of PVDF hollow fiber membrane for CO₂ stripping by atomic force microscopy analysis. *Separation and Purification Technology*, 109(0), 2013, p. 98-106.
- [29] JIAO, B., CASSANO, A. and DRIOLI, E. Recent advances on membrane processes for the concentration of fruit juices: a review. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 2014, p. 303-24.
- [30] ALKHUHDHIRI, A., DARWISH, N. and HILAL, N. Membrane distillation: A comprehensive review. *Desalination*, (In Press), 2014, p.
- [31] CASSANO, A., CONIDI, C. and DRIOLI, E. Physico-chemical parameters of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice clarified by microfiltration and ultrafiltration processes. *Desalination*, 250(3), 2010, p. 1101-4.
- [32] ANDERSON-COOK, C.M., BORROR, C.M. and MONTGOMERY, D.C. Response surface design evaluation and comparison. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 139(2), 2012, p. 629-41.
- [33] TASSELLI, F., CASSANO, A. and DRIOLI, E. Ultrafiltration of kiwifruit juice using modified poly(ether ether ketone) hollow fibre membranes. *Separation and Purification Technology*, 57(1), 2007, p. 94-102.
- [34] ONSEKIZOGLU, P., BAHCECI, K.S. and ACAR, M.J. Clarification and the concentration of apple juice using membrane processes: A comparative quality assessment. *Journal of Membrane Science*, 352(1-2), 2010, p. 160-5.
- [35] YAZDANSHENAS, M., TABATABAEE-NEZHAD, S.A.R., SOLTANIEH, M., ROOSTAAZAD, R. and KHOSHFETRAT, A.B. Contribution of fouling and gel polarization during ultrafiltration of raw apple juice at industrial scale. *Desalination*, 258(1-3), 2010, p. 194-200.
- [36] SAHA, N.K., BALAKRISHNAN, M. and ULBRICHT, M. Sugarcane juice ultrafiltration: FTIR and SEM analysis of polysaccharide fouling. *Journal of Membrane Science*, 306(1-2), 2007, p. 287-97.
- [37] CASSANO, A., MARCHIO, M. and DRIOLI, E. Clarification of blood orange juice by ultrafiltration: analyses of operating parameters, membrane fouling and juice quality. *Desalination*, 212(1-3), 2007, p. 15-27.
- [38] CISSE, M., VAILLANT, F., PEREZ, A., DORNIER, M. and REYNES, M. The quality of orange juice processed by coupling crossflow microfiltration and osmotic evaporation. *International Journal of Food Science & Technology*, 40(1), 2005, p. 105-16.
- [39] VAILLANT, F., CISSE, M., CHAVERRI, M., PEREZ, A., DORNIER, M., VIQUEZ, F. and DHUIQUE-MAYER, C. Clarification and concentration of melon juice using membrane processes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 6(2), 2005, p. 213-20.
- [40] VAILLANT, F., JEANTON, E., DORNIER, M., O'BRIEN, G.M., REYNES, M. and DECLoux, M. Concentration of passion fruit juice on an industrial pilot scale using osmotic evaporation. *Journal of Food Engineering*, 47(3), 2012, p. 195-202.
- [41] FORERO LONGAS, F. and VÉLEZ PASOS, C.A. Optimization of the concentration by osmotic evaporation of passion fruit juice (*Passiflora Edullis*). *DYNA*, 80(179), 2013, p. 90-8.
- [42] FORERO, F.L., VÉLEZ, C.A.P. and SANDOVAL, A.P.A. Ultrafiltration and osmotic evaporation applied to the concentration of cholupa (*Passiflora Maliformis*) juice. *Ingeniería e Investigación*, 33(1), 2013, p. 35-40.

- [43] HONGVALEERAT, C., CABRAL, L.M.C., DORNIER, M., REYNES, M. and NINGSANOND, S. Concentration of pineapple juice by osmotic evaporation. *Journal of Food Engineering*, 88(4), 2008, p. 548-52.
- [44] CASSANO, A. and DRIOLI, E. Concentration of clarified kiwifruit juice by osmotic distillation. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 2007, p. 1397-404.
- [45] RODRIGUES, R.B., MENEZES, H.C., CABRAL, L.M.C., DORNIER, M., RIOS, G.M. and REYNES, M. Evaluation of reverse osmosis and osmotic evaporation to concentrate camu-camu juice (*Myrciaria Dubia*). *Journal of Food Engineering*, 63(1), 2004, p. 97-102.
- [46] KUJAWSKI, W., SOBOLEWSKA, A., JARZYŃKA, K., GÜELL, C., FERRANDO, M. and WARCZOK, J. Application of osmotic membrane distillation process in red grape juice concentration. *Journal of Food Engineering*, 116(4), 2013, p. 801-808.
- [47] REKTOR, A., VATAI, G. and BENKASSY-MOLNR, E. Multi-step membrane processes for the concentration of grape juice. *Desalination*, 191(1-3), 2006, p. 446-53.
- [48] CASSANO, A., CONIDI, C. and DRIOLI, E. Clarification and concentration of pomegranate juice (*Punica granatum L.*) using membrane processes. *Journal of Food Engineering*, 107(3-4), 2012, p. 366-73.
- [49] VALDÉS, H., ROMERO, J., SAAVEDRA, A., PLAZA, A. and BUBNOVICH, V. Concentration of noni juice by means of osmotic distillation. *Journal of Membrane Science*, 330(1-2), 2013, p. 205-13.
- [50] ZAMBRA, C., ROMERO, J., PINO, L., SAAVEDRA, A. and SANCHEZ, J. Concentration of cranberry juice by osmotic distillation process. *Journal of Food Engineering*, 144(0), 2015, p. 58-65.