



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería
Campus Zacatecas

***“EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE JUGO EN EL
RENDIMIENTO DE ESPACIADORES MULTICAPA EN
DESTILACIÓN CON MEMBRANA”***

Trabajo de Titulación

Que para obtener el título de:

Ingeniería en Alimentos

Presenta:

Alondra Guadalupe Ceballos Márquez

Asesor:

Dr. en C. Luis Mario González Rodríguez



Zacatecas, Zac., Junio del 2021

Folio
UPIIZ/ESA/186/2021

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

Asunto
DESIGNACIÓN
ALONDRA GUADALUPE CEBALLOS MÁRQUEZ
INGENIERÍA EN ALIMENTOS
BOLETA: 2017670072
GENERACIÓN: 2017-2021

Zacatecas, Zac., a 26 de mayo de 2021

**C. ALONDRA GUADALUPE CEBALLOS MÁRQUEZ
PRESENTE**

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el **Dr. en C. Luis Mario González Rodríguez**, sea **Asesor** en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción Curricular, con el título y contenido siguiente:

"Efecto de la concentración de jugo en el rendimiento de espaciadores multicapa en destilación con Membrana"

Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.



M. EN C. JULIA JANETH ROSALES MARES
Jefa del Departamento de Evaluación y
Seguimiento Académico



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS
DIRECCIÓN



M. EN C. JUAN ALBERTO ALVARADO OLIVARES
Director de la UPIIZ





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Folio

UPIIZ/ESA/187/2021

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

Asunto

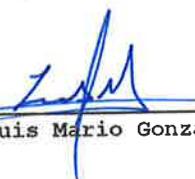
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN
ALONDRA GUADALUPE CEBALLOS MÁRQUEZ
INGENIERÍA EN ALIMENTOS
BOLETA: 2017670072
GENERACIÓN: 2017-2021

Zacatecas, Zac., a 27 de mayo de 2021

El suscrito tengo el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el trabajo de titulación que presenta con fines de titulación denominada:

"Efecto de la concentración de jugo en el rendimiento de espaciadores multicapa en destilación con Membrana"

Encontré que el citado **Trabajo de Titulación**, reúne los requisitos para autorizar la impresión y proceder a la presentación del Examen Profesional debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se hicieron.


Dr. en C. Luis Mario González Rodríguez



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional
P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad *la* que suscribe ***Alondra Guadalupe Ceballos Márquez***, estudiante del programa de ***Ingeniería en Alimentos***, con numero de boleta **2017670072**, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto ser autora y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada ***Efecto de la concentración de jugo en el rendimiento de espaciadores multicapa en destilación con Membrana***, en adelante "El Trabajo de Titulación" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales "El Trabajo de Titulación" por un periodo de ***indefinido*** contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "El Trabajo de Titulación".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "El Trabajo de Titulación", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "El Trabajo de Titulación", por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "El Trabajo de Titulación" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 31 de Mayo del 2021.

Atentamente
Alondra Ceballos M

Alondra Guadalupe Ceballos Márquez
Nombre y firma del alumno

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
SIMBOLOGÍA Y/O NOTACIÓN UTILIZADA	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	7
3. JUSTIFICACIÓN	11
HIPÓTESIS	13
4. OBJETIVOS	13
4.1 Objetivo general	13
4.2 Objetivos específicos	13
5. METODOLOGÍA	13
5.1 Geometría	13
5.2 Modelo matemático	14
5.3 Caso de estudio	16
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
7. CONCLUSIÓN	32
8. BIBLIOGRAFIA	33

RESUMEN

La destilación con membrana es un proceso de separación en el que solo las moléculas de vapor se transfieren a través de una membrana hidrófoba microporosa, impulsado térmicamente el cual permite la remoción de un solvente en un compuesto, principalmente agua. En este caso de estudio, dicho método de separación se empleó para la concentración de jugos mediante simulaciones computacionales con el programa COMSOL, analizando el efecto ocasionado por el uso de espaciadores dentro del módulo de membrana con flujo a contracorriente, utilizando tres configuraciones geométricas, la primera un canal libre y las otras dos configuraciones b) y c) con un diseño de espaciadores multicapa con un arreglo tipo zig-zag. Estas configuraciones se evaluaron a: Reynolds de 133 y a una Velocidad inicial de 1.5 m/s fijos, las corridas experimentales se llevaron a cabo mediante un barrido paramétrico con °Brix= 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 50. Se demostró que la presencia de los espaciadores dentro del canal mejora significativamente la transferencia de calor, la configuración más eficiente fue la b) en comparación con la configuración de canal libre, presentando una mejor redistribución de flujo y de calor incluso en los casos de mayor viscosidad.

Palabras clave: destilación con membrana, espaciadores multicapa, transferencia de calor.

ABSTRACT

Membrane distillation is a separation process in which only steam molecules are transferred through a hydrophobic, microporous, thermally driven membrane that allows the removal of a solvent in a compound, mainly water. In this case study, this separation method was used for the concentration of juices through computational simulations with the COMSOL program, analyzing the effect caused by the use of spacers inside the membrane module with countercurrent flow, using three geometric configurations, the first one free channel and the other two configurations b) and c) with a multilayer spacers design with a zig-zag arrangement. These configurations were evaluated at: Reynolds of 133 and an initial speed of 1.5 m / s fixed, the experimental runs were connected to one line by means of a parametric sweep with ° Brix = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 and 50. It was shown that the presence of the spacers within the channel significantly improves heat transfer, the most efficient configuration was b) compared to the free channel configuration, presenting a better redistribution of flow and heat even in cases of higher viscosity.

Keywords: membrane distillation, multi-layer spacers, heat transfer.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Módulo de Membrana en Espiral (MME)	8
Figura 2. Polarización de la concentración y temperatura representada por la línea roja y azul respectivamente.	9
Figura 3. Configuración geométrica, a) canal libre, b) y c) canales con espaciadores multicapa.....	14
Figura 4. Malla utilizada en el modelo estudiado	16
Figura 5. Perfiles internos de velocidad (m/s) con °Brix y configuración distinta para el canal de alimentación, evaluados a Re=133 fijo.	18
Figura 6. Perfiles internos de temperatura (°C) con °Brix y configuración distinta para el canal de alimentación, evaluados a Re=133 fijo.	19
Figura 7. Perfiles internos de velocidad (m/s) y temperatura (°C) en el canal de permeado para distintas configuraciones evaluados en 15 °Brix y Re= 133 fijo.	19
Figura 8. Perfiles de líneas de corriente en el canal de alimentación y permeado para las 3 configuraciones a Re=133 fijo.....	20
Figura 9. Perfiles superficiales de ΔT evaluados a Re=133 fijo. a) canal libre, configuración b), configuración c). b1) y c1) Perfiles superficiales en una sección de la hoja de membrana para la configuración b) y c) respectivamente.	21
Figura 10. Perfil superficial de ΔT para las 3 configuraciones evaluados a 15 °Brix y Re=133 fijo	22
Figura 11. Perfiles superficiales de flux de permeado evaluados a Re=133 fijo. a) canal libre, configuración b), configuración c). b1) y c1) Perfiles superficiales en una sección de la hoja de membrana para la configuración b) y c) respectivamente.	24
Figura 12. Perfil superficial de flux de permeado para las 3 configuraciones evaluado a 15°Brix y Re=133 fijo.....	24
Figura 13. Flux promedio de permeado para las 3 diferentes configuraciones evaluado a distintos °Brix= 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 50 y Re=133 fijo.	25
Figura 14. Perfiles internos de velocidad (m/s) para diferentes configuraciones evaluados a 15 y 50 °Brix y V=1.5 m/s fija para el canal de alimentación.	26
Figura 15. Perfiles internos de temperatura (°C) en el canal de alimentación para diferentes configuraciones evaluados a 15 °Brix y V=1.5 m/s fija para el canal de alimentación.	26
Figura 16. Perfiles internos de velocidad y temperatura en el canal de permeado para diferentes configuraciones evaluados a 15 °Brix y V=1.5 m/s fija para el canal de permeado.	27
Figura 17. Perfiles de líneas de corriente en el canal de alimentación y permeado para las diferentes configuraciones evaluados a V=1.5 m/s fija.....	27
Figura 18. Perfiles superficiales de ΔT evaluados a V=1.5 m/s fijo. a) canal libre, configuración b), configuración c). b1) y c1) Perfiles superficiales en una sección de la hoja de membrana para la configuración b) y c) respectivamente.	29
Figura 19. Perfil superficial de ΔT para las 3 configuraciones evaluado a 15°Brix y V=1.5 m/s fijo.	29
Figura 20. Perfiles superficiales de flux de permeado evaluados a V=1.5 m/s fijo. a) canal libre, configuración b), configuración c). b1) y c1) Perfiles superficiales en una sección de la hoja de membrana para la configuración b) y c) respectivamente.	30
Figura 21. Perfil superficial de flux de permeado para las 3 configuraciones evaluado a 15°Brix y V=1.5 m/s fijo.....	31

Figura 22. Flux promedio de permeado para las 3 diferentes configuraciones evaluado a distintos °Brix= 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 50 y V=1.5 m/s fija..... 32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros establecidos para el diseño geométrico.....	14
Tabla 2. Condiciones de operación para el modelo estudiado.....	17
Tabla 3. Valores utilizados para el barrido paramétrico.....	17
Tabla 4. Diferencia de porcentaje de flux de permeado de la configuración a) y c) con respecto a la configuración b).....	24
Tabla 5. Diferencia de porcentaje de flux de permeado de la configuración a) y c) con respecto a la configuración b).....	31

SIMBOLOGÍA Y/O NOTACIÓN UTILIZADA

Abreviaturas

MD	Destilación con membrana
EO	Evaporación osmótica
UF	Ultrafiltración
OD	Osmosis directa
COMSOL	Comsol Multiphysics
Sólidos solubles totales	TSS
Actividad antioxidante total	TAA
Destilación con membrana de contacto directo	DCMD
Presión de entrada de líquido	LEP

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de eliminación de una cierta parte de agua natural de los jugos de fruta se denomina “Concentración de jugo”. La concentración se logra principalmente para: (1) reducir la actividad de agua (a_w) del producto de jugo que prolonga su vida útil, (2) minimizar los costos de empaque, almacenamiento y transporte, (3) estabilizar o simplificar el manejo del producto de jugo final (Tiwari, 2018). La Norma General del Codex (CODEX STAN 247-2005), establece que el zumo (jugo) concentrado de fruta es el líquido sin fermentar, pero fermentable, que se obtiene de la parte comestible de frutas en buen estado, debidamente, maduras y frescas que se han mantenido en buen estado por procedimientos adecuados salvo que ha eliminado físicamente el agua en una cantidad suficiente para elevar el nivel de grados Brix al menos en un 50% más que el valor Brix establecido para el zumo (jugo) reconstituido de la misma fruta.

Los jugos se preparan mediante procedimientos adecuados que mantienen las características físicas, químicas, organolépticas y nutricionales esenciales de los zumos (jugos) de la fruta de que proceden (Codex, 2005). Los jugos se comercializan en dos tipos: los frescos, que provienen del exprimido de la fruta, y los reconstituidos, que son los que se preparan a partir de los concentrados. En especial, estos últimos son de interés industrial, y su importancia se resume en que los concentrados son microbiológicamente más estables que los jugos naturales por su baja actividad de agua. Los concentrados debido a su alto contenido de azúcares, pueden preservarse en ambientes no refrigerados, en consecuencia, aumenta la vida de anaquel de los productos (Cassano, 2003).

La naturaleza perecedera de los jugos de frutas plantea desafíos importantes asociados con la producción y la conservación. A menos que el jugo se consumiera fresco, el almacenamiento a temperaturas de enfriamiento o congelación era la única alternativa para proteger las propiedades organolépticas del jugo. Los estudios han demostrado que las cantidades de nutraceuticos en los jugos de fruta dependen de cómo se producen, procesan y conservan. Los tratamientos térmicos para concentración a veces no producen un producto de alta calidad, alta nutrición y microbiológicamente estables (Tiwari, 2018). Un proceso fundamental en la producción de jugos concentrados es la evaporación. Este es un tratamiento térmico que opera entre 75-90°C retirando una parte fundamental del agua, las temperaturas y los tiempos de procesamiento pueden degradar a las sustancias nutritivas, ya que son sensibles al calor y su viscosidad aumenta notablemente al concentrar la solución (Castillo, 2013). Es por eso que el proceso de evaporación presenta una serie de limitaciones asociadas con los atributos sensoriales (color, sabor, aroma) y del valor nutricional (vitaminas y otros fitoquímicos) de los concentrados por efecto del calor. Existen evidencias de que en los primeros minutos de la evaporación la mayoría de los componentes aromáticos de la fruta cruda se pierden y el perfil aromático de ésta cambia irreversiblemente (Petrotos, 2001).

En este sentido, cabe destacar que la destilación con membrana es un proceso recientemente introducido en la industria, el cual utiliza una membrana hidrófoba microporosa para separar dos soluciones acuosas mantenidas a diferentes temperaturas, la característica clave de este proceso es que procede a presión atmosférica (o menor) y a temperaturas mucho más bajas que los puntos de ebullición de ambas soluciones (Fruit juice concentrates, 2018). Los procesos con membrana producen jugos y concentrados con mejores características nutricionales por las temperaturas a las que opera, favoreciendo el tratamiento de especies termosensibles; y, como para la remoción del agua no es necesario el cambio de fase, esta condición ofrece una ventaja energética en contraste a los que no emplean una membrana (Torrealba, 2013).

Durante este trabajo se evaluará el rendimiento que producen los espaciadores en los canales tanto de alimentación como de permeado en el proceso de destilación con membrana con respecto a la polarización de la temperatura, así como también el efecto de la viscosidad (concentración de jugo) sobre el flux transmembrana.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Destilación con membrana (MD) es un proceso principalmente adecuado para aplicaciones en las que el agua es el componente principal presente en la solución de alimentación. MD es un proceso impulsado térmicamente, en el que solo las moléculas de vapor son transportadas a través de membranas hidrófobas porosas. La alimentación de líquido a tratar por MD debe mantenerse en contacto directo con un lado de la membrana sin penetrar en sus poros secos a menos que se aplique una presión transmembrana mayor que la presión de entrada de líquido (LEP) de la membrana es decir, presión de ruptura. La naturaleza hidrofóbica de la membrana evita que las soluciones líquidas entren en sus poros debido a las fuerzas de tensión superficial. Como resultado, se forman interfaces líquido / vapor en las entradas de los poros de la membrana. Se pueden usar varios modos de MD que difieren en la tecnología aplicada para establecer la fuerza impulsora (Khayet, 2011).

En lo que respecta a destilación con membrana se ha convertido en una de las tecnologías emergentes en las últimas décadas, especialmente en el campo de la tecnología de separación. Desde que apareció a final de los años sesenta y empezó a ser desarrollada a principios de los ochenta con el crecimiento de la ingeniería de membranas, la destilación por membranas demanda ser un proceso de separación económicamente eficiente que pueda utilizarse con un bajo grado de residuos y/o como una fuente de energía alternativa a la energía solar o geotérmica. Ofrece un gran número de ventajas sobre los métodos de separación convencionales en un amplio rango de aplicaciones como la evaporación (Mañas, 2014).

Uno de los factores cruciales en los procesos de destilación por membranas es la elección de la membrana. Las cuales deben de cumplir las siguientes características (Mañas, 2014):

- Alta porosidad (70-80%)
- Distribución uniforme del tamaño de poro 10 nm hasta 1 μm
- Hidrófobas porosas
- Politetrafluoroetileno (PTFE)

Para uso práctico de las membranas, éstas son integradas en los llamados módulos. Existen diferentes tipos de módulos de membrana (Rodríguez, 2015).

- Módulos de placa y marco
- Enrolladas en espiral o
- Tubulares (capilar, fibra hueca).

Para nuestro caso de estudio se hará uso de los Módulos de Membrana en Espiral (MME) como se muestra en la Figura 1, estos módulos están formados por 2 hojas o láminas de membrana, se encuentran separadas por una malla que cumple con doble función: como soporte mecánico y como espaciador. El funcionamiento de un módulo de membrana en espiral es afectado por factores como son la geometría, facilidad de limpieza y tendencia al taponamiento. En ese sentido, se hace el uso de espaciadores (arreglos de filamentos transversales los cuales tienen la función de separar las cámaras de permeado y retenido) (González Rodríguez, 2017).

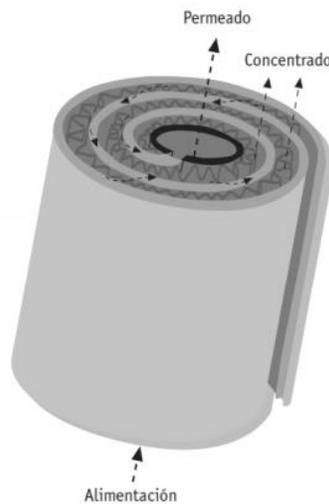


Figura 1. Módulo de Membrana en Espiral (MME)

Se ha demostrado que la presencia de espaciadores dentro del canal de alimentación y permeado de un MME mejora significativamente la transferencia de calor y presenta una mejor redistribución de flujo y de calor dentro del canal, reduciendo la polarización de la temperatura e incrementando el flux de permeado (Fernández Jiménez). La polarización de la concentración puede observarse en la separación de gases, ultrafiltración y ósmosis inversa cuando hay una acumulación de las especies menos permeables y un agotamiento de los componentes más permeables en la capa límite como resultado de altos flujos y selectividad

y baja difusión a granel (Bernardo, 2009). La polarización de la temperatura puede observarse como una reducción de la temperatura en la interfaz de la membrana de alimentación y a un aumento de la temperatura en el lado del permeado de la membrana, como se muestra en la Figura 2.

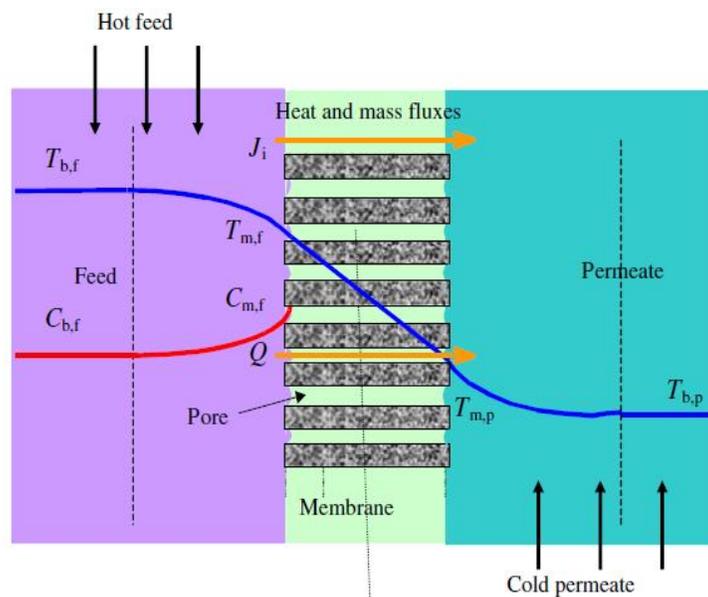


Figura 2. Polarización de la concentración y temperatura representada por la línea roja y azul respectivamente.

La destilación con membrana, también se utiliza en acople con otros procedimientos con membrana. Bagger-Jorgensen, (2004) propone el proceso de destilación con membrana al vacío para estudiar -en jugo de grosella negra- el factor de concentración ($C_{\text{permeado}}/C_{\text{alimentación}}$) en función de la temperatura (10-45°C) y la velocidad de la alimentación (100-500 l/h). Se seleccionan 7 compuestos que son los más representativos del aroma de esa fruta; se observa que, a mayor velocidad de la alimentación, hay un mayor factor de concentración; y a menor temperatura, el factor de concentración también es mayor. Los mejores resultados se obtienen con la combinación 10°C y 500 l/h; sin embargo, estas condiciones sólo favorecen la concentración de los ésteres. En consecuencia y para obtener una mejor recuperación de todos los compuestos aromáticos, se disminuye en un 5% la velocidad de flujo (400 l/h) pero manteniendo la temperatura en 10°C. A estas condiciones se obtiene un factor de recuperación del 68-83%, demostrando que este proceso es competitivo con la evaporación convencional con las ventajas de un menor gasto energético y menos daño a la solución.

También en jugo de naranja, (V.D. Alves, 2005) comparan el desempeño de la Destilación con membrana (MD) vs la Evaporación Osmótica (EO) en función del flujo de agua y la retención de aromas característicos de esta fruta -butirato de etilo y citral. El estudio se hace en dos etapas; primero con soluciones modelo y posteriormente, el proceso con mejor

desempeño se utiliza para tratar jugo de naranja real. Se observa que en MD el flujo de agua es la mitad del flujo en EO debido al gradiente de temperatura entre el seno de la solución y la interfase con la membrana, que reduce la fuerza motriz para el transporte de agua. Por su parte en EO hay mayor retención de aroma por cantidad de agua removida, que en MD. Al no haber diferencia de temperatura en ambos lados de la membrana y siendo menor la actividad de los volátiles en la solución salina que en el agua, la fuerza motriz para el transporte de los aromas es menor. Considerando los aspectos estudiados, estos autores expresan que la EO tiene un mejor desempeño que la MD para concentrar soluciones modelo. Sin embargo, al probar la EO en un jugo de naranja real se observa un decaimiento en el flujo de agua. Ese descenso se atribuye a la presencia de pulpa y a moléculas como las proteínas que hacen que la resistencia al flujo aumente.

La destilación con membrana, también se utiliza en acople con otros procedimientos con membrana. En 2010, Onsekizoglu y colaboradores (Pelin Onsekizoglu, 2010), con jugo de manzana, emplean la UF para clarificar el jugo y el clarificado se trata con Osmosis Directa (OD), MD y un acople OD-MD para concentrarlo. Evalúan el potencial de estos procesos y comparan la calidad de este concentrado vs. la de uno que se obtiene por evaporación convencional. Los resultados indican que con cualquiera de los procedimientos que se emplee para concentrar el jugo, se logra el mismo contenido de sólidos solubles (65° Brix) que con evaporación, pero a una temperatura menor (25 °C en promedio). Luego, al contrastar la calidad nutricional y sensorial de los concentrados con membrana, se concluye que todos preservan los atributos del jugo fresco -color y aroma- aspectos que se alteran con evaporación. Por su parte, con respecto al contenido de componentes fenólicos, ácidos orgánicos y azúcares, estos valores son estables en todos los procesos de concentración, incluida la evaporación. Sin embargo, al hacer esta misma comparación sólo entre los que emplean membrana, resulta que el acople OD-MD es la mejor alternativa porque retiene en mayor relación los componentes aromáticos del jugo, por su baja temperatura de operación y un menor tiempo de proceso.

En 2016, Quist-Jensen y colaboradores (C.A. Quist-Jensen, 2016) evaluaron el potencial de DCMD para concentrar jugo de naranja clarificado a escala de laboratorio. El jugo crudo se clarificó previamente por Ultrafiltración (UF) para eliminar los sólidos en suspensión y la turbidez del jugo; el jugo clarificado, con un contenido inicial de TSS de aproximadamente 9,5 °Brix, se concentró previamente hasta 24 °Brix y luego se concentró hasta 65 °Brix a través de un proceso DCMD de dos pasos. El rendimiento de los procesos UF y DCMD se evaluó en términos de productividad y calidad del jugo. Las muestras de ambos procesos se analizaron en términos de sólidos suspendidos totales, TSS, TAA y compuestos fenólicos. Las muestras concentradas también se analizaron para evaluar la presencia de cristales.

Los resultados experimentales indicaron que, a altas concentraciones, la disminución del flujo transmembrana puede atribuirse principalmente al aumento de la viscosidad del jugo. Además, las mediciones analíticas demostraron que todos los compuestos antioxidantes

del jugo de naranja clarificado están bien conservados a través del proceso DCMD. Por lo tanto, el proceso integrado UF / DCMD puede usarse para obtener jugos concentrados de alta calidad, ya que en el producto final las propiedades organolépticas, nutricionales y antioxidantes del jugo fresco se conservan eficientemente.

La destilación con membranas es un proceso aún en fase de desarrollo. Tal técnica utiliza membranas microporosas hidrofóbicas en forma de espiral, están formadas por 2 hojas o láminas de membrana separadas por una malla que cumple la doble función de servir como soporte mecánico de las membranas y como espaciador permitiendo el libre paso del permeado. La configuración espiral permite trabajar a altas presiones (hasta 70 bar para aplicaciones de ósmosis inversa) sin producir daño en la membrana. Estos elementos tienen una gran área efectiva por unidad de volumen. La densidad de empaque es alta y puede modificarse según el tipo de espaciador usado, para aplicaciones en alimentaciones que requieran una configuración más abierta, por ejemplo, de mayor viscosidad y/o contenido de sólidos (Saavedra Aldo, 2007).

3. JUSTIFICACIÓN

El jugo de naranja es un producto complejo formado por agua, azúcares, ácidos orgánicos, sales minerales, vitaminas y pigmentos, además de una serie de componentes orgánicos volátiles e inestables responsables de su sabor y aroma. La calidad del jugo de naranja está influenciada básicamente por factores microbiológicos, enzimáticos, químicos y físicos que comprometen sus características sensoriales (aroma, sabor, color, viscosidad y estabilidad) y nutricionales (básicamente su contenido vitamínico). Juntos, estos factores y cambios durante el empaque, la distribución y el almacenamiento influirán en la vida útil del producto (Silvia Correa, 1999).

La conservación de los alimentos es uno de los principales objetivos de la industria alimentaria no solo para proporcionar una mayor vida útil y garantizar la sanidad de los consumidores sino también para mantener durante más tiempo sus características. Los tratamientos térmicos son los principales que se utilizan en la industria de zumos por las ventajas que ofrecen, especialmente a nivel microbiológico. El proceso de evaporación es el más utilizado en la industria, sin embargo, durante el proceso los jugos se someten a elevadas temperaturas, por lo tanto, la mayor parte de los compuestos aromáticos se pierden durante el proceso, esto conlleva que la calidad de los productos se vea afectada.

El proceso de evaporación tiene cierto número de desventajas que se muestran a continuación:

- Mala transferencia de calor con líquidos viscosos.
- Costo elevado
- Tiempo de residencia o retención relativamente alto

- Temperaturas elevadas
- Degradación de componentes de las frutas por altas temperaturas

Por lo tanto, MD es la mejor alternativa para la concentración de jugo, ya que este proceso tiene un gran número de ventajas como son:

- Rechazo de sólidos y materia no volátil, debido a que únicamente las moléculas de vapor pueden pasar a través de la membrana.
- Utiliza temperaturas de operación más bajas (60-80°C) en comparación con el proceso de ebullición.
- En la mayoría de los casos, no es necesario un pretratamiento químico que incrementa los costes.
- Costes de operación reducidos gracias a la aplicación de energías renovables al proceso.

Sin embargo, las membranas tienen sus limitaciones. Están expuestas a ensuciamiento, incrustaciones biológicas y a la degradación, lo que limita su vida útil. Además, durante la separación, el cambio en la concentración del producto hace que el flujo no sea constante y a medida que éste se concentra se incrementa la viscosidad, se ensucian las membranas y limita las concentraciones a alcanzar, obteniendo polarización de la concentración. Una de las alternativas que se estudian actualmente para atacar el problema de acumulación de solutos y taponamiento de las membranas, es la modificación de parámetros geométricos de las mallas de espaciadores que conforman los canales de los MME. Al modificar ciertas características geométricas de los espaciadores, se favorece la transferencia de calor en las cercanías de la superficie de las hojas de membrana, reduciendo de esta manera el fenómeno de polarización de la temperatura (González Rodríguez, 2017).

Los canales con espaciadores de los módulos de membrana se consideraron en MD para cambiar las características de flujo y promover regiones de turbulencia, lo que conduce a una disminución de los efectos de polarización de temperatura y concentración. Algunos investigadores consideraron el uso de canales llenos de espaciadores de módulos de membrana de placa y marco para DCMD (L. Martínez-Díez, 2000). Los espaciadores cambiaron las características del flujo y promovieron regiones de turbulencia, lo que condujo a una disminución de la polarización de la temperatura, es decir, las capas límite, esto es bueno ya que mantiene de esta forma la fuerza motriz y evita el decaimiento del flux transmembrana.

En este proyecto se pretende analizar el efecto de la concentración de jugo (viscosidad) sobre las propiedades de transporte, así como evaluar el rendimiento de los espaciadores multicapa en el flux transmembrana, modificando la velocidad y las concentraciones de alimentación.

HIPÓTESIS

Los espaciadores reducen el efecto de la viscosidad sobre el decaimiento del flux transmembrana, disminuyendo la polarización de la concentración y la temperatura.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Analizar el efecto de la concentración de jugo (°Brix) sobre las propiedades de transporte en el rendimiento de espaciadores multicapa para destilación con membrana.

4.2 Objetivos específicos

- Encontrar con base en la literatura expresiones adecuadas para el cálculo de propiedades térmicas y de transporte para jugos que sean función de la concentración del jugo (°Brix).
- Plantear un modelo bidimensional de transporte de cantidad de movimiento y de calor con condiciones de frontera apropiadas.
- Realizar simulaciones para distintas velocidades y concentraciones de alimentación.
- Analizar el efecto de los parámetros simulados sobre el rendimiento de los espaciadores multicapa en el flux transmembrana.

5. METODOLOGÍA

5.1 Geometría

Durante este proyecto se utilizó un sistema que consta de 1 canal de alimentación y 2 canales de permeado, con tres configuraciones geométricas diferentes como se muestra en la Figura 1. Para el inciso a) corresponde a un canal libre, b) representa el diseño del canal con espaciadores multicapa, la cual consta de 22 filamentos circulares y una capa intermedia de 21 filamentos elípticos para el canal de alimentación y 86 filamentos circulares para el canal de permeado y para c) consta de 22 filamentos circulares y una capa intermedia de 21 filamentos elípticos para el canal de alimentación y 44 filamentos circulares para el canal de permeado ambas estructuras tienen un arreglo tipo zig-zag, con una distancia entre cada uno de los espaciadores de, l_m , 4 mm para b) y 8 mm para c). La altura y longitud de cada canal son de 1 mm y 188 mm, respectivamente.

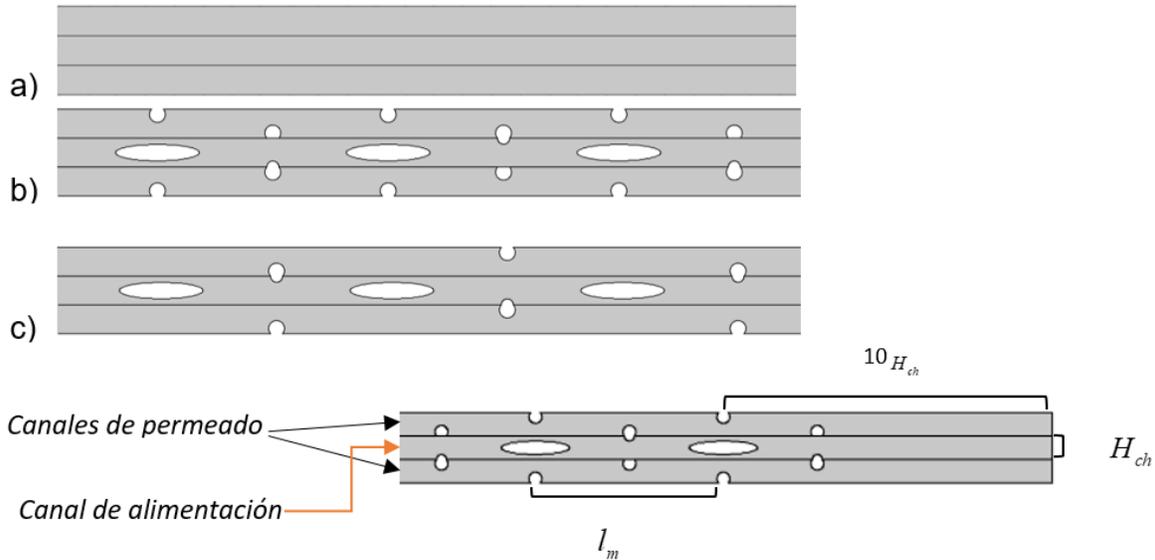


Figura 3. Configuración geométrica, a) canal libre, b) y c) canales con espaciadores multicapa.

El diámetro de los filamentos circulares, d_f , es de 0.42 mm para el canal de alimentación y 0.55 mm para el canal de permeado, con un grado de inmersión de 0.5. El grado de inmersión, ψ , contempla que la superficie de los espaciadores que contacta con las hojas de membrana sea achatada o recortada en función de la posición o nivel de penetración de los espaciadores circulares dentro del canal (González Rodríguez, 2017). La Tabla 1 resume los parámetros geométricos utilizados.

Tabla 1. Parámetros establecidos para el diseño geométrico

L_{ch}	Longitud del canal	188 mm	
H_{ch}	Altura del canal	1 mm	
l_m	Separación entre espaciadores	b)	c)
		4 mm	8 mm
d_f	Diámetro de filamentos circulares	0.42 mm (canal de alimentación) 0.55 mm (canal de permeado)	
ψ	Grado de inmersión de filamentos circulares	0.5	

5.2 Modelo matemático

Para nuestro caso de estudio se hizo uso de diferentes ecuaciones para poder realizar la simulación como lo son la ecuación de Navier-Stokes, la ecuación de continuidad, la ec. de balance de energía en dos dimensiones y en estado estacionario.

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + F \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0 \quad (2)$$

$$\rho C_p u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (3)$$

La Ecuación 1 corresponde a la ec. De Navier-Stokes donde: u es el vector de velocidad, ρ es la densidad del fluido, μ la viscosidad, ∇ es el operador nabla, pI es la caída de presión y representa las fuerzas externas. La Ecuación 2 corresponde a la ecuación de continuidad. La ecuación 3 representa el balance de energía, donde: k es la conductividad térmica, C_p es la capacidad calorífica, T la temperatura y Q es la fuente de calor.

Las condiciones a la entrada del canal de alimentación corresponden a un perfil laminar de velocidad, V_o , que fue calculado como se muestra en la Ecuación 4 y una concentración de alimentación inicial. Las paredes de los espaciadores son impermeables, mientras que en las hojas de membrana se estableció permeación con condiciones de frontera de flux de salida. Las condiciones a la salida corresponden a una presión de salida y de flux convectivo. Para el caso del balance de calor se tiene una temperatura de entrada de 60°C y en las hojas de membrana se estableció condiciones de flux de calor a la salida.

Las condiciones de frontera para el canal de permeado fueron establecidas por un perfil laminar de velocidad a la entrada del canal con velocidad promedio V_p , que fue calculada como se muestra en la Ecuación 5, una presión a la salida del mismo y con permeación a la salida de las hojas de membrana. Las condiciones de frontera para el balance de calor son una temperatura de 20°C a la entrada del canal y en las hojas de membrana se estableció flux de calor a la salida.

$$V_o = \frac{R_e \mu}{\rho D_H} \quad (4)$$

$$V_p = \frac{R_e \mu}{\rho D_{H_p}} \quad (5)$$

Donde: R_e , es el número de Reynolds, D_H , D_{H_p} , es el diámetro hidráulico calculado a partir del área y el perímetro mojado de cada canal (alimentación y permeado respectivamente). Para el cálculo del flux de permeado, J_w , se hizo uso de la Ecuación 6 y para el cálculo de la presión de vapor se utilizó la Ecuación 7 que corresponde a la ecuación de Antoine.

$$J_w = B_w \left(P_{w,f}^0 \gamma_{w,f} x_{w,f} - P_{w,p}^0 \right) \quad (6)$$

Donde: B_w , es la permeabilidad de la membrana

$P_{w,f}^0$, es la presión de vapor en la alimentación

$\gamma_{w,f}$, es el coeficiente de actividad en la alimentación

$x_{w,f}$, es la fracción mol del agua

$P_{w,p}^0$, es la presión de vapor en el permeado.

$$\text{Log}P = A - \frac{B}{T + C} \quad (7)$$

Donde: P , es la presión de vapor

A , B y C , son las constantes de Antoine

T , es la temperatura.

En la Figura 2 se muestra la malla utilizada en el modelo estudiado. Las mallas fueron refinadas cerca en las hojas de membrana para asegurar la calidad de los datos obtenidos en nuestra zona de interés. El tamaño máximo de los elementos es de 0.72 mm y como tamaño mínimo es de 0.0014 mm. El modelo se resolvió mediante simulación con el software COMSOL versión 5.3.

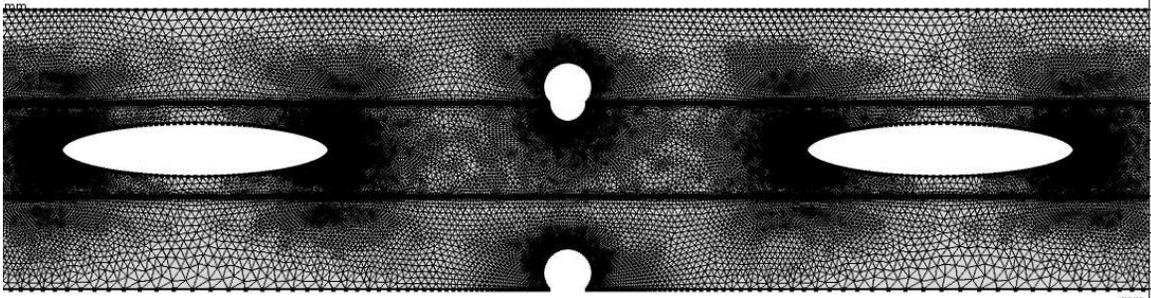


Figura 4. Malla utilizada en el modelo estudiado

5.3 Caso de estudio

El caso de estudio será probado para la concentración de jugo de naranja. Cabe mencionar que este modelo puede ser útil en muchos casos, que pueden particularizarse según se necesite.

Para el cálculo de las propiedades físicas y de transporte del jugo de naranja se hizo uso de las siguientes expresiones: densidad, capacidad calorífica, conductividad térmica y viscosidad en función de la temperatura y °Brix, las cuales se muestran a continuación.

$$C_p = 1424.34 + 2673.19X_w + 2.446T \quad (8)$$

$$\rho = 1428.5 - 454.9X_w - 0.231T \quad (9)$$

$$k = 0.0797 + 0.5238X_w + 0.000580T \quad (10)$$

$$\mu = (1.083 \times 10^{-3}) \exp\left(\frac{2685.89}{T} - 0.04654Br + 0.001321Br^2\right) \quad (11)$$

En la Tabla 2 se muestran las condiciones de operación que se tuvieron para llevar a cabo el modelo.

Tabla 2. Condiciones de operación para el modelo estudiado.

T_a	Temperatura de entrada al canal de alimentación	60°C
T_p	Temperatura de entrada al canal de permeado	20°C
Br_0	Valor inicial de °Brix	13
P_0	Presión de salida en ambos canales	1 atm

Las simulaciones se llevaron a cabo con un patrón de flujo a contracorriente. Se realizó un barrido paramétrico para evaluar distintos °Brix a un número de Reynolds fijo, y un segundo barrido para una velocidad inicial fija a la entrada del canal de alimentación. En la Tabla 3 se muestran los valores:

Tabla 3. Valores utilizados para el barrido paramétrico.

°Brix	Reynolds	Velocidad (m/s)
0	133	1.5
5		
10		
15		
20		
25		
30		
40		
50		

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las siguientes figuras representan los perfiles internos y superficiales de velocidad y temperatura para el canal de alimentación y permeado, las corridas experimentales se llevaron a cabo mediante un barrido paramétrico a distintos °Brix y fueron evaluados para un número de Reynolds igual a 133 para las 3 configuraciones geométricas diferentes.

- Perfiles internos

En el caso de la Figura 5 se presentan los perfiles internos de velocidad evaluados para 15 y 50 °Brix, para el canal libre se logra apreciar que la velocidad máxima se alcanza en la parte intermedia del canal, esto corresponde a que es un canal sin obstrucciones. Para la configuración b y c la presencia del espaciador elíptico hace que el flujo se separe por lo que la velocidad máxima se obtiene en la parte superior e inferior del espaciador, una vez que el fluido pasa por el espaciador las corrientes separadas se unen nuevamente, por lo tanto, el uso de espaciadores implica que se tenga un aumento en la velocidad, ayudando a reducir la polarización de la concentración en las hojas de membrana.

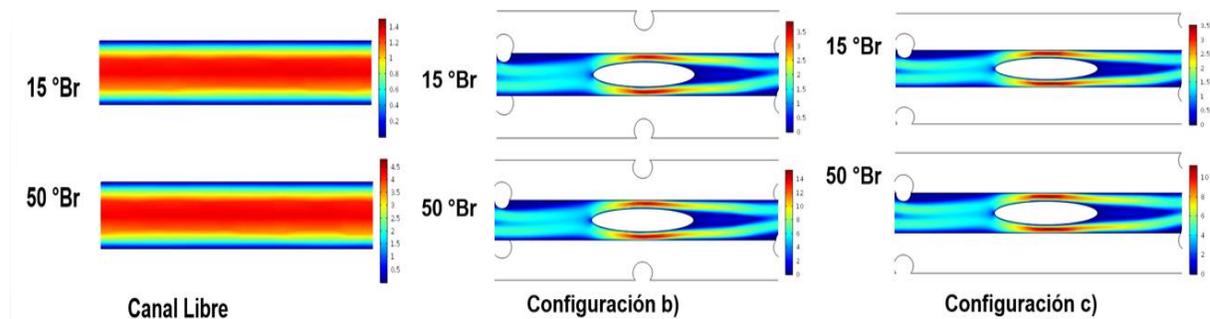


Figura 5. Perfiles internos de velocidad (m/s) con °Brix y configuración distinta para el canal de alimentación, evaluados a $Re=133$ fijo.

En la Figura 6 se muestran los perfiles internos de temperatura para las 3 configuraciones geométricas, evaluados para 15 y 50 °Brix, se logra observar la misma tendencia en las 3 configuraciones ya que a mayor °Brix la temperatura se mantiene más uniforme y a menor °Brix conforme va pasando por el canal la temperatura disminuye. Sin embargo, para la configuración de canal libre se tiene una transferencia de calor ineficiente ya que conforme se empieza a acercar a las hojas de membrana la temperatura comienza a disminuir y solo mantiene sus valores altos de temperatura en el centro de canal. En la configuración b y c se aprecia como la temperatura se logra mantener más uniforme a lo largo de todo el canal, la presencia de los espaciadores multicapa nos ayuda a reducir la polarización de la temperatura en las hojas de la membrana.

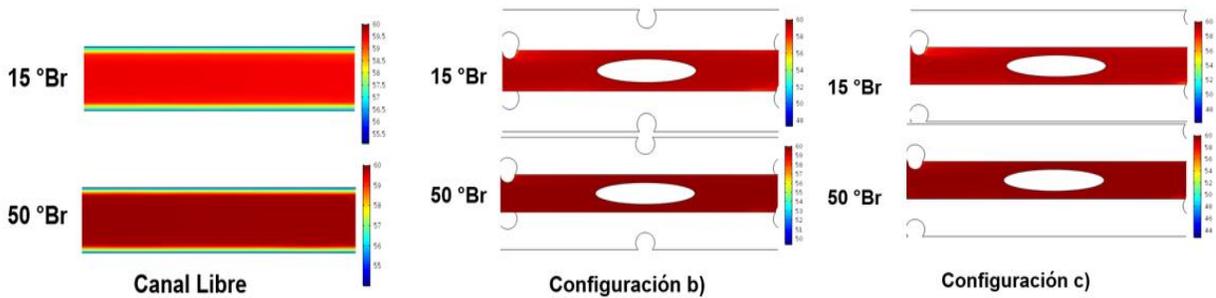


Figura 6. Perfiles internos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) con $^{\circ}\text{Brix}$ y configuración distinta para el canal de alimentación, evaluados a $Re=133$ fijo.

Los perfiles internos de velocidad y temperatura en el canal de permeado para las 3 configuraciones se muestran en la Figura 7, la configuración que muestra mejoras significativas tanto en velocidad como en temperatura es la configuración b, ya que es la que cuenta con el mayor número de espaciadores circulares en los canales de permeado, lo que genera que la velocidad sea más uniforme y más alta a lo largo del canal, la configuración c únicamente la velocidad máxima se alcanza por arriba o por abajo del espaciador circular, en estas dos configuraciones se logra identificar que el redireccionamiento del flujo ocasionado por los espaciadores genera un patrón de flujo en zig-zag y para el canal libre únicamente la velocidad máxima está en la parte intermedia del canal teniendo un patrón de flujo continuo.

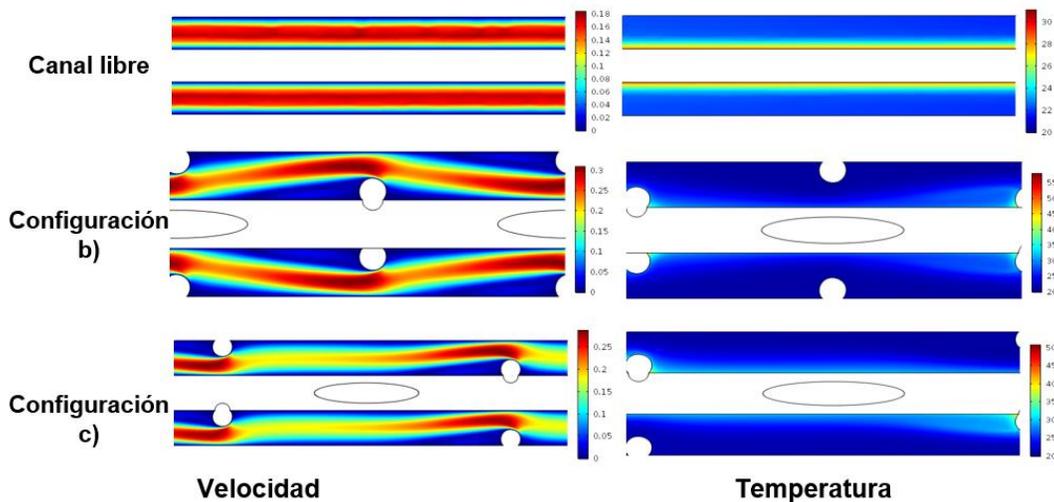


Figura 7. Perfiles internos de velocidad (m/s) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en el canal de permeado para distintas configuraciones evaluados en 15°Brix y $Re=133$ fijo.

El análisis de los perfiles de velocidad revela que las configuraciones con arreglos de espaciadores multicapa que en nuestro caso son las configuraciones b y c generan velocidades máximas superiores y además una distribución más uniforme a lo largo del canal en comparación con la configuración de canal libre. Este tipo de distribución genera un comportamiento deseable ya que se asocia a que la velocidad de corte sobre la superficie de

las hojas de membrana se incremente. En el caso de los perfiles de temperatura se observa que en la zona donde las hojas de membrana contactan con las paredes de los espaciadores circulares se generan picos de temperatura más elevados que corresponden justamente a las zonas de estancamiento para lo que son la configuración b y c. Además, se observa que en la configuración de canal libre se genera una temperatura más elevada a lo largo de toda la hoja de membrana para el canal de permeado.

Conjuntamente a los gráficos de velocidad, el perfil de líneas de corriente que se muestra en la Figura 8 nos permite analizar las zonas de estancamiento las cuales son provocadas por el redireccionamiento del flujo a causa de la presencia de los espaciadores dentro del canal. Como se puede observar en el canal de permeado para la configuración c la zona de recirculación es mucho mayor en comparación con la configuración b, esto se debe al patrón de flujo impuesto por la presencia de los espaciadores. El efecto de reducción en la zona de recirculación para el caso de la configuración b se debe a que el canal de permeado cuenta con un mayor número de espaciadores circulares, lo que provoca que la velocidad de flujo sea más uniforme a lo largo del canal. En este sentido, se puede decir que la configuración b presenta un efecto deseable ya que en las zonas de estancamiento es donde precisamente se presenta la menor acumulación de solutos e incrustación de sólidos suspendidos en los canales. Para el caso de la configuración de canal libre se observa como a lo largo de todo el canal se presenta la mayor acumulación de sólidos justo en las hojas de membrana.

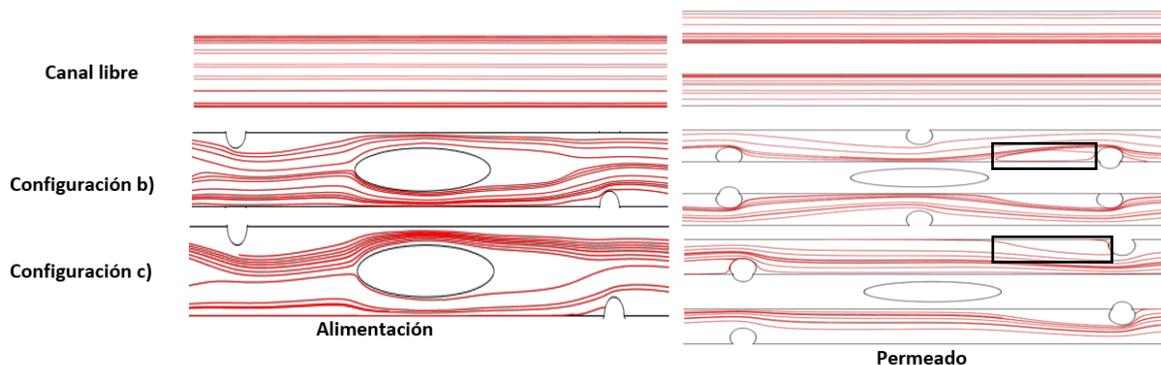


Figura 8. Perfiles de líneas de corriente en el canal de alimentación y permeado para las 3 configuraciones a $Re=133$ fijo.

- Perfiles superficiales

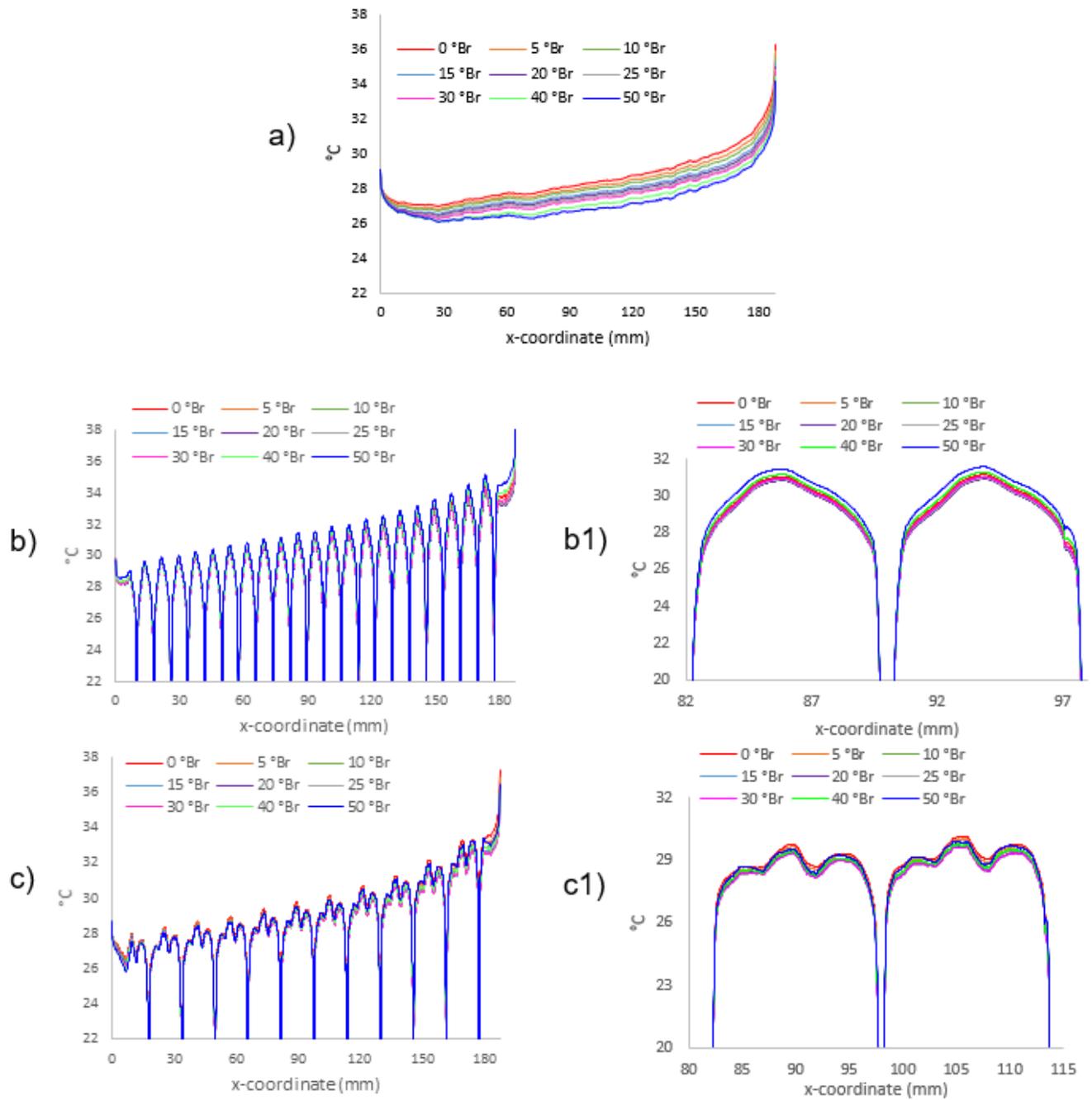


Figura 9. Perfiles superficiales de ΔT evaluados a $Re=133$ fijo. a) canal libre, configuración b), configuración c). b1) y c1) Perfiles superficiales en una sección de la hoja de membrana para la configuración b) y c) respectivamente.

Las zonas altas de temperatura dentro del canal son caracterizadas por la hidrodinámica provocada por la geometría de los espaciadores. La Figura 9 expone los perfiles superficiales

de ΔT para las 3 configuraciones, la Figura 9 a) en la configuración de canal libre se observa un perfil continuo. En la Figura 9 b) y c) se aprecia un comportamiento periódico, esto se debe directamente a la presencia de los espaciadores. A lo largo del perfil se observan unos picos, estos picos los vamos a llamar como mínimos y máximos, los mínimos surgen en las zonas donde los espaciadores circulares contactan con las hojas de membrana y producen zonas de estancamiento o recirculación, lo que induce que el ΔT vaya disminuyendo, por lo tanto el flux también disminuye ya que son directamente proporcionales. Mientras que los máximos representan que el ΔT aumenta, por lo que el flux aumenta, esto es porque el flujo es redireccionado a la pared de la membrana, por lo que el esfuerzo de corte y el coeficiente de transferencia de calor son mayores.

En la Figura 9 b1) y c1) únicamente nos muestra uno de los picos mencionados anteriormente evaluados en una sección de la membrana para observar más a detalle el comportamiento que tiene con respecto a los diferentes $^{\circ}\text{Brix}$.

En la Figura 10, se presenta el perfil superficial de ΔT donde únicamente se tomó el perfil evaluado a 15°Brix para las tres configuraciones, donde podemos observar claramente que los valores obtenidos para la configuración de canal libre quedan por debajo de las otras dos configuraciones teniendo un perfil continuo, esto es por la inexistencia de los espaciadores. En la configuración b y c se aprecia un comportamiento periódico, como se mencionó anteriormente esto se debe a la presencia de los espaciadores, sin embargo, la configuración b queda por encima de las otras dos, lo que beneficia a esta configuración.

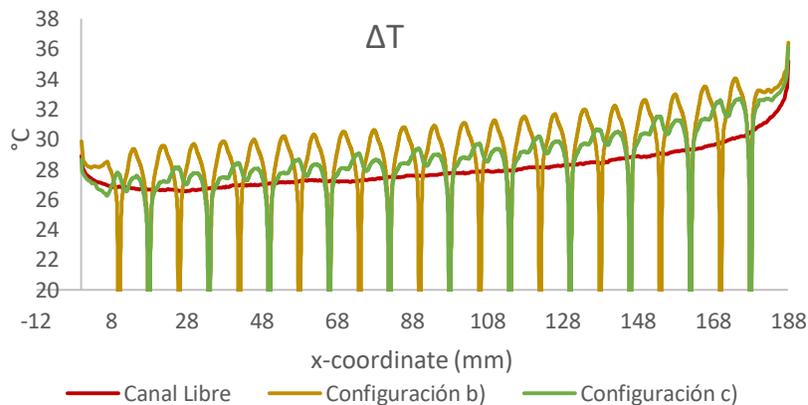


Figura 10. Perfil superficial de ΔT para las 3 configuraciones evaluados a 15°Brix y $Re=133$ fijo

En la Figura 11, se presentan los perfiles superficiales para el flux de permeado en las diferentes configuraciones, haciendo una comparación con la Figura 9 obtenemos tendencias similares, en el caso de la configuración de canal libre tenemos un perfil continuo y para las otras configuraciones el perfil es periódico, caracterizado por la presencia de máximos y mínimos, estos a su vez ocasionados por la hidrodinámica que genera la presencia de los

espaciadores. Lo que implica que los mínimos están dados por la zona de estancamiento que se genera entra la hoja de membrana y el espaciador circular, mientras que los máximos se deben a las zonas donde se alcanzan las mayores velocidades de corte, es decir, en la parte superior e inferior de cada espaciador.

Se aprecia en la Figura 11 a) y c) que el flux a la entrada del canal es menor con los °Brix más altos y teniendo una concentración más baja el flux a la entrada es mayor, esto debido a que a mayor concentración se tiene una mayor viscosidad, y con la ayuda de los espaciadores conforme el flujo pasa por ellos dentro del canal la velocidad va en aumento.

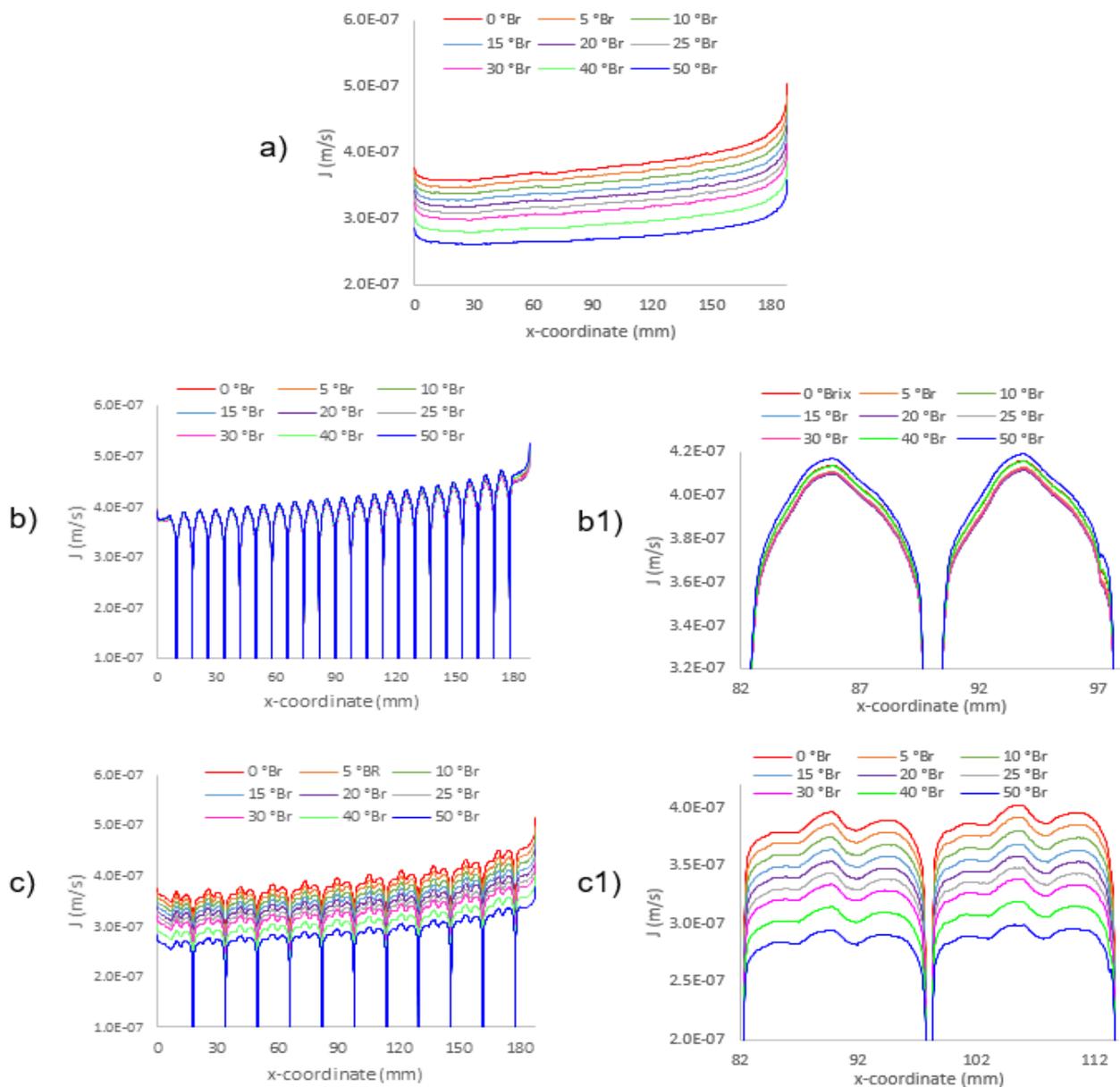


Figura 11. Perfiles superficiales de flux de permeado evaluados a $Re=133$ fijo. a) canal libre, configuración b), configuración c). b1) y c1) Perfiles superficiales en una sección de la hoja de membrana para la configuración b) y c) respectivamente.

Ahora bien, en la Figura 12 se presenta el perfil superficial de flux de permeado para cada configuración evaluado a 15°Brix , lo que se obtuvo que las configuraciones b y c obtuvieron un flux de permeado promedio de 15 y 10 % mayor a la configuración de canal libre, respectivamente y observamos como la presencia de los espaciadores provoca un aumento en el flux de permeado a lo largo del canal, a excepción de las zonas donde los espaciadores circulares contactan con la hoja de membrana.

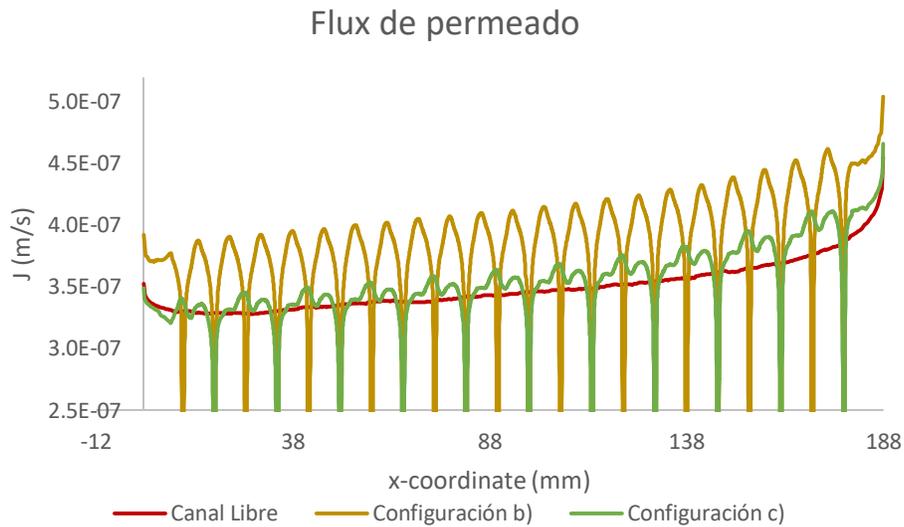


Figura 12. Perfil superficial de flux de permeado para las 3 configuraciones evaluado a 15°Brix y $Re=133$ fijo.

Por lo tanto, con la Figura 13 comprobamos que efectivamente la configuración b es la que se ve beneficiada con un flux mayor, ya que queda muy por encima de la configuración de canal libre y la c, como se muestra en la Tabla 4. También podemos observar que conforme aumentan los $^\circ\text{Brix}$ el flux de permeado disminuye, esto es porque el fluido se va concentrando y su viscosidad va aumentando. Por lo que respecta a la configuración b el cambio del flux de permeado no presenta un cambio considerable conforme aumentan los $^\circ\text{Brix}$.

Tabla 4. Diferencia de porcentaje de flux de permeado de la configuración a) y c) con respecto a la configuración b)

$^\circ\text{Brix}$	Canal Libre (%)	Configuración c) (%)
0	2.70	1.89
5	4.74	3.59
10	7.45	6.24

15	9.86	8.65
20	12.43	10.75
25	14.87	13.03
30	17.53	15.57
40	22.82	20.07
50	28.12	24.75

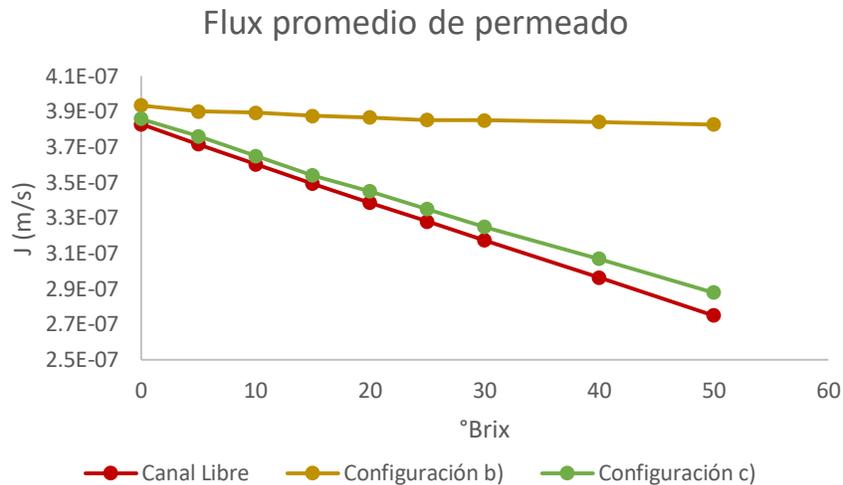


Figura 13. Flux promedio de permeado para las 3 diferentes configuraciones evaluado a distintos °Brix= 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 50 y $Re=133$ fijo.

Las figuras que se muestran a continuación presentan los perfiles internos y superficiales de velocidad y temperatura para el canal de alimentación y permeado, realizando un barrido paramétrico a diferentes °Brix y evaluados a una Velocidad inicial de 1.5 m/s para las 3 configuraciones geométricas diferentes.

- Perfiles internos

Los perfiles internos de velocidad para el canal de alimentación se muestra en la Figura 14 evaluados a 15 y 50 °Brix, como se logra observar para el canal libre la velocidad máxima únicamente se alcanza en la parte media del canal, conforme se acerca a la pared de la membrana la velocidad es menor, para la configuración b y c se ve como el flujo se divide por la presencia de los espaciadores elípticos y es redireccionado hacia la hoja de la membrana donde se da la velocidad máxima (parte superior e inferior del espaciador). Sin embargo, se observa la influencia que tiene la diferente concentración del flujo, ya que para la configuración b y c una vez que el fluido pasa por los espaciadores las corrientes separadas se unen nuevamente, para el caso de 50 °Brix el flujo se une más cerca de los espaciadores elípticos a diferencia de 15 °Brix ya que la unión del flujo es más lejos del espaciador. Para la configuración de canal libre se muestra que a 50 °Brix se da la velocidad máxima justo en el centro del canal.

Los perfiles internos de temperatura de la Figura 15 nos demuestran como las configuraciones b y c se ven beneficiadas por la presencia de los espaciadores ya que la temperatura se muestra más uniforme a lo largo del canal con respecto a la temperatura de entrada, obteniendo valores más altos en comparación con la configuración de canal libre.

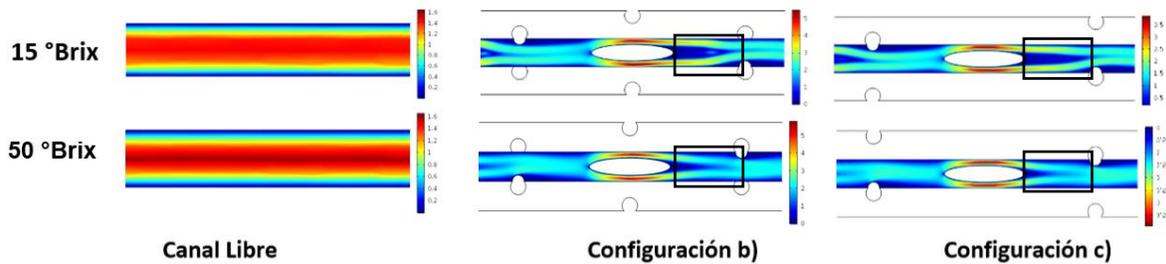


Figura 14. Perfiles internos de velocidad (m/s) para diferentes configuraciones evaluados a 15 y 50 °Brix y $V=1.5$ m/s fija para el canal de alimentación.

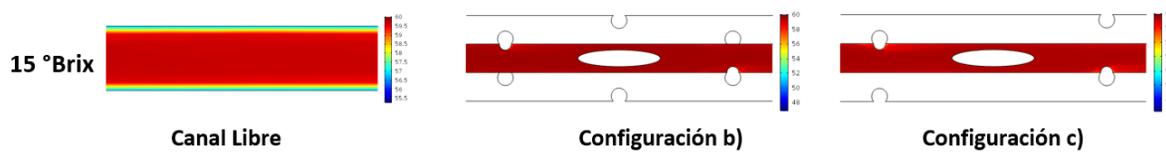


Figura 15. Perfiles internos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en el canal de alimentación para diferentes configuraciones evaluados a 15 °Brix y $V=1.5$ m/s fija para el canal de alimentación.

En la figura 16 se presentan los perfiles internos de velocidad y temperatura en el canal de permeado, para los perfiles de velocidad en la configuración de canal libre se obtiene la misma tendencia que en el canal de alimentación, donde la velocidad máxima únicamente se da en la parte intermedia del canal, mientras que para la configuración b y c se tiene un patrón de flujo en zig-zag generado por los espaciadores circulares, lo que provoca que la velocidad máxima se da justo por arriba o por debajo de estos, dando perfiles más altos de velocidad para ambas configuraciones en comparación con la configuración de canal libre. No obstante, la configuración b muestra los valores más altos y tiene una velocidad más uniforme a lo largo del canal. En los perfiles de temperatura es notable como en la configuración de canal libre aumenta la temperatura en las hojas de membrana y para las otras dos configuraciones la temperatura se mantiene a excepción donde los espaciadores circulares contactan con las hojas de membrana ya que se tiene un ligero aumento de temperatura.

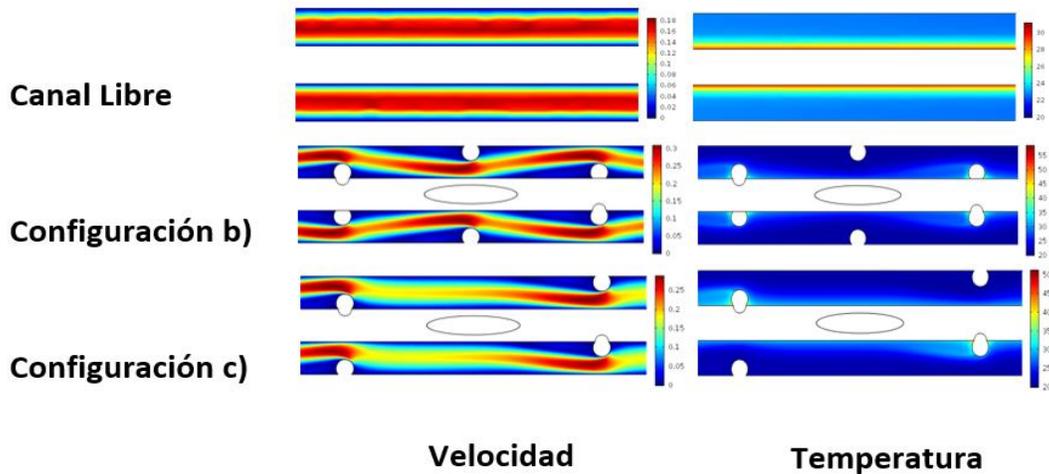


Figura 16. Perfiles internos de velocidad y temperatura en el canal de permeado para diferentes configuraciones evaluados a 15 °Brix y $V=1.5$ m/s fija para el canal de permeado.

Simultáneamente los perfiles de velocidad y los de líneas de corriente que se muestran en la Figura 17, nos permiten estudiar el efecto de los espaciadores dentro del canal. Si bien los espaciadores nos permiten redireccionar y provocan un aumento en la velocidad de corte, también nos permite observar cómo se generan las zonas de estancamiento donde los espaciadores circulares contactan con las hojas de membrana. En la configuración b se tiene una reducción notable en la zona de estancamiento o recirculación con respecto a la configuración c, esto se debe a que cuenta con un mayor número de espaciadores circulares en el canal de permeado lo que permite que se tenga una mejor redistribución del flujo a lo largo del canal.

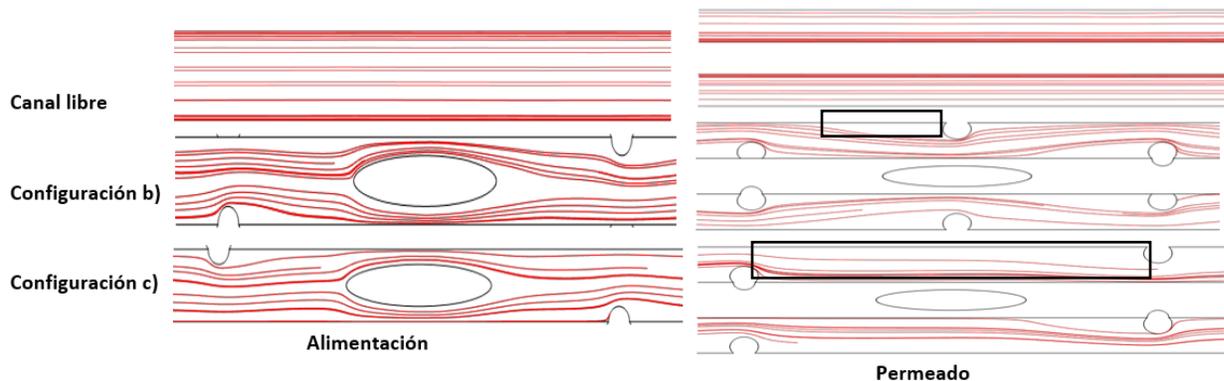


Figura 17. Perfiles de líneas de corriente en el canal de alimentación y permeado para las diferentes configuraciones evaluados a $V=1.5$ m/s fija.

- Perfiles superficiales

En la Figura 18 se presentan los perfiles superficiales de diferencia de temperatura (ΔT) para las 3 configuraciones diferentes, estos perfiles nos muestran el comportamiento de la

temperatura dentro del canal. Las zonas altas de temperatura dentro del canal se caracterizan por la hidrodinámica que provoca la geometría de los espaciadores. En el caso de la configuración de canal libre únicamente se tiene un perfil continuo, esto es porque es un canal sin obstrucciones. Caso contrario con las otras configuraciones, donde se tiene un perfil periódico esto es por la presencia de los espaciadores, como se mencionó en los perfiles de Reynolds, ese perfil periódico está dado por la presencia de picos que son caracterizados por máximos y mínimos, los mínimos están generados por la unión de la membrana con la pared del espaciador justo donde se producen las zonas de estancamiento, lo que induce a que el ΔT sea menor. Ahora los máximos corresponden justo por encima del espaciador elíptico donde se da la máxima velocidad ya que el flujo es redireccionado a la pared de la membrana.

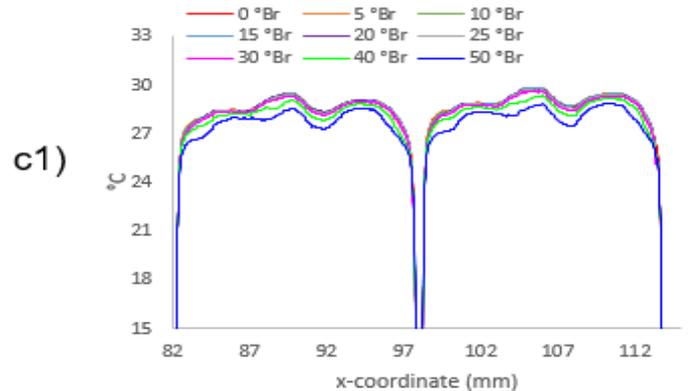
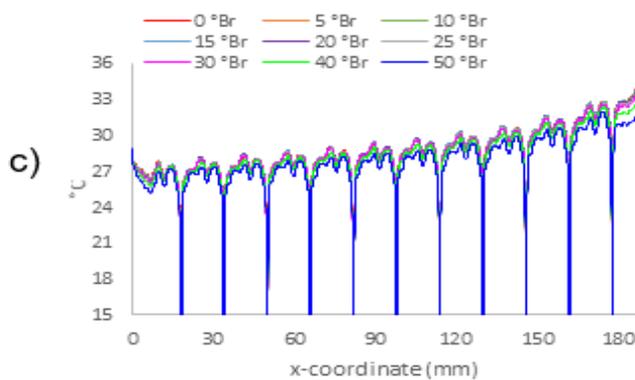
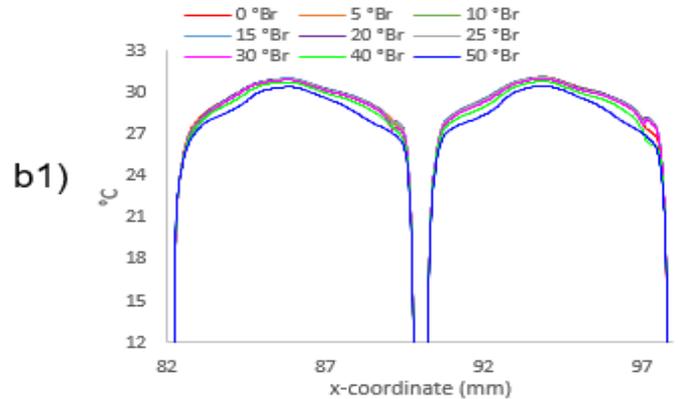
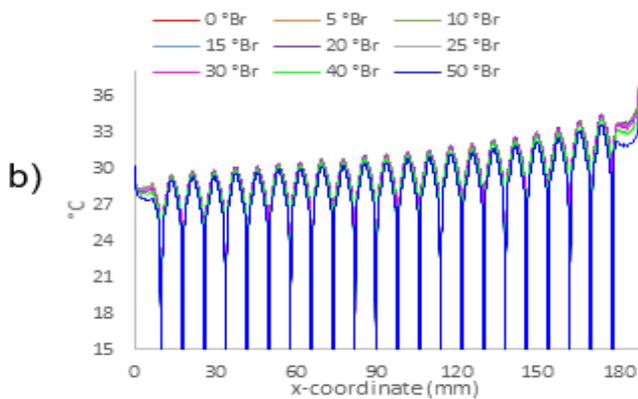
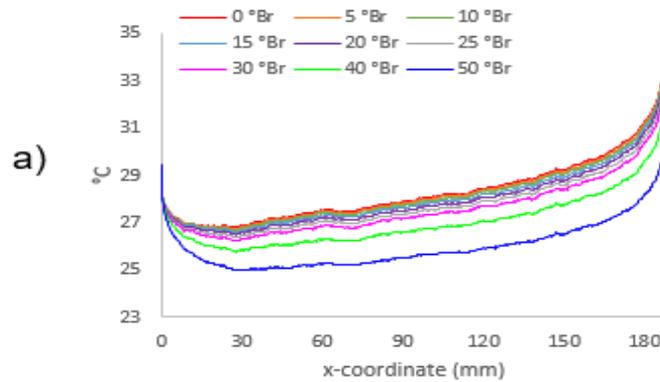


Figura 18. Perfiles superficiales de ΔT evaluados a $V=1.5$ m/s fijo. a) canal libre, configuración b), configuración c). b1) y c1) Perfiles superficiales en una sección de la hoja de membrana para la configuración b) y c) respectivamente.

Para poder comprobar en que configuración se vio favorecido el ΔT se presenta la Figura 19, en la figura esta un perfil de cada configuración el cual se tomó a 15° Brix, el estudio nos muestra que la configuración b) es la que tiene los valores de los picos máximos más altos, esto es importante ya que el ΔT es directamente proporcional al flux de permeado, entonces a mayor diferencia de temperatura mayor es el flux de permeado. Y la configuración de canal libre es la menos beneficiada ya que arroja valores menores a las configuraciones b y c.

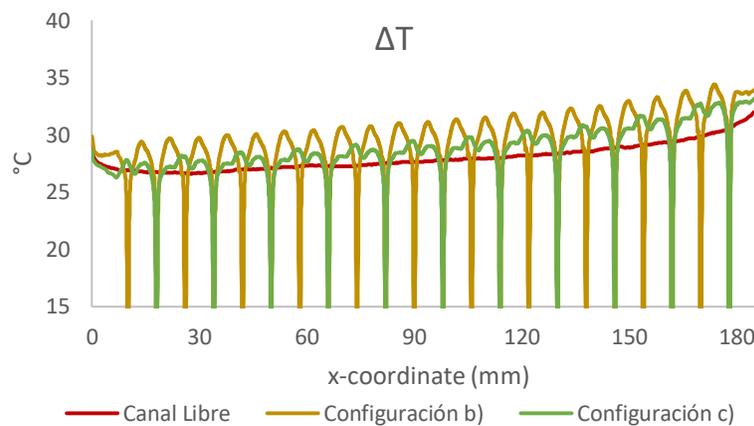


Figura 19. Perfil superficial de ΔT para las 3 configuraciones evaluado a 15° Brix y $V=1.5$ m/s fijo.

Como se mencionó anteriormente el flux de permeado es directamente proporcional con el ΔT , por lo que el comportamiento de los perfiles de la Figura 18 y la Figura 20 son similares, donde la configuración de canal libre es un perfil continuo debido a la falta de espaciadores dentro del canal y nuevamente se presenta un comportamiento periódico para b y c caracterizado por los picos máximos y mínimos.

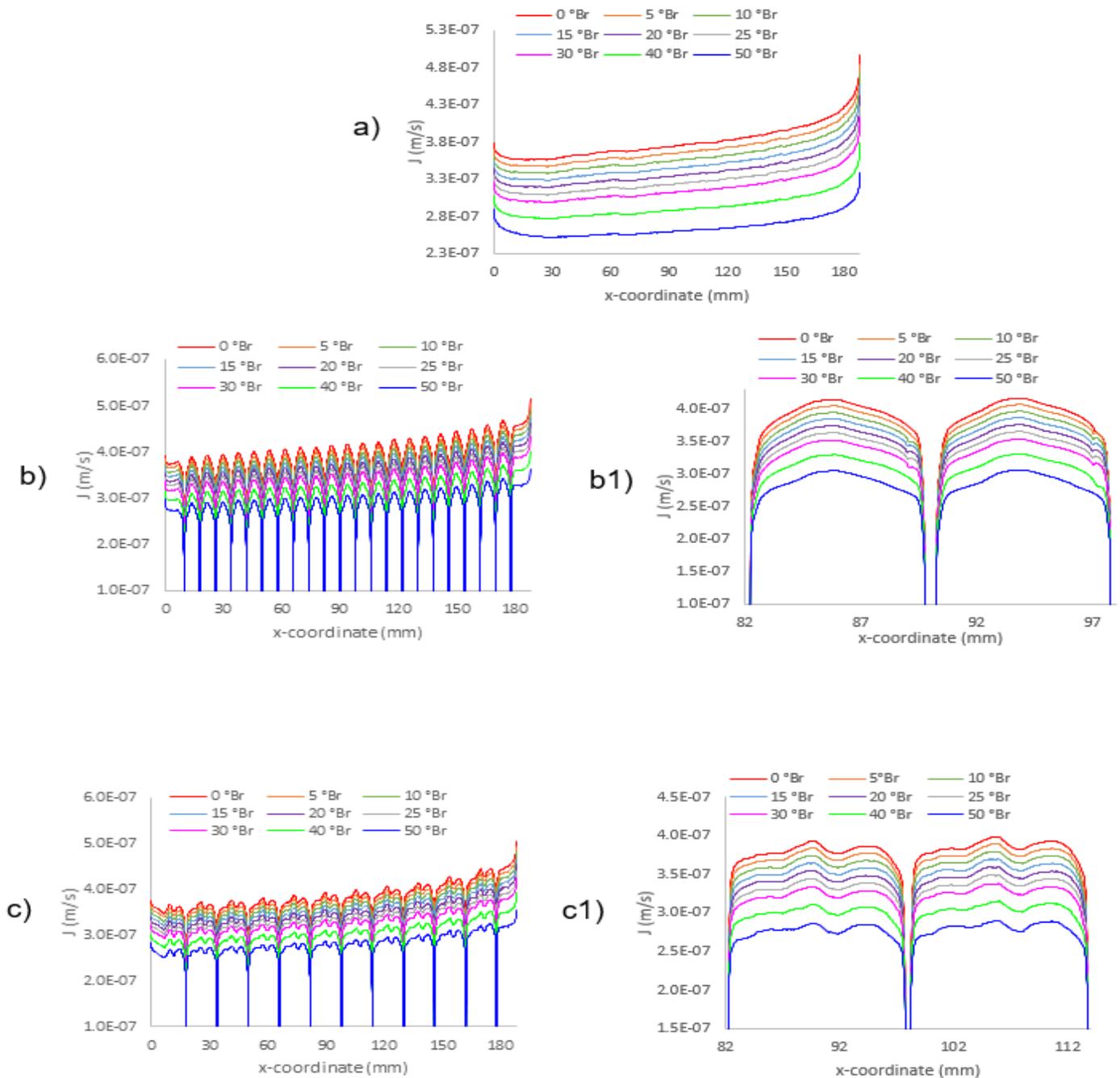


Figura 20. Perfiles superficiales de flux de permeado evaluados a $V=1.5$ m/s fijo. a) canal libre, configuración b), configuración c). b1) y c1) Perfiles superficiales en una sección de la hoja de membrana para la configuración b) y c) respectivamente.

Observando la Figura 20 b) y c) tenemos que a pesar de que se entra a una velocidad fija de $V=1.5$ m/s, el flux cambia conforme los °Brix de la solución. A lo largo del canal la velocidad va en aumento debido a la influencia que los espaciadores provocan, tomando el caso particular de mayor concentración (50 °Brix) en la configuración b, el cual se tiene un flujo

inicial de 2.98×10^{-7} m/s y un flujo a la salida del canal de 3.6×10^{-7} m/s, a pesar de ser el flujo más viscoso los espaciadores aumentan su velocidad a lo largo del canal.

Para poder comprobar cuál de los perfiles superficiales de flux es el que tiene valores más altos se hizo una comparación entre cada configuración como se observa en la Figura 21, donde se tomó un perfil de cada configuración en este caso el de 15 °Brix. Obteniendo para la configuración b y c un flux de permeado promedio de 10 y 7% mayor a la configuración de canal libre, respectivamente.

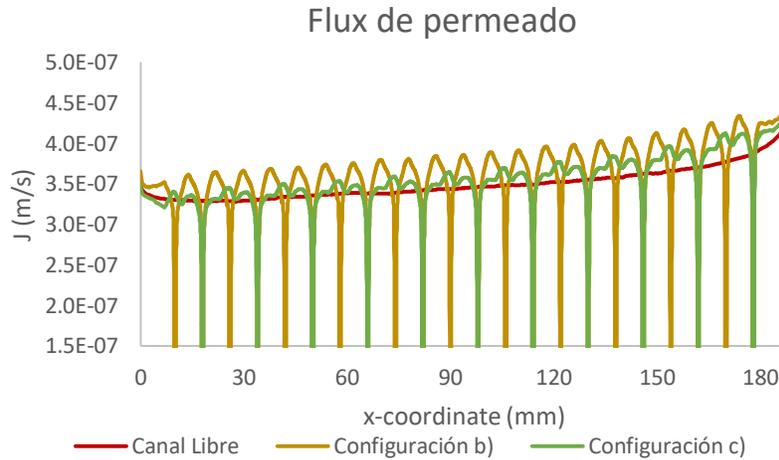


Figura 21. Perfil superficial de flux de permeado para las 3 configuraciones evaluado a 15°Brix y V=1.5 m/s fijo.

Por ultimo tenemos la Figura 22 que representa el flux promedio de permeado, donde comprobamos lo que se mencionó anteriormente de cuál de las 3 configuraciones era la que se veía beneficiada, se muestra como la configuración b sigue estando por encima de las otras configuraciones como se presenta en la Tabla 5, se le atribuye a que cuenta con un mayor número de espaciadores en el canal de permeado.

También lo que podemos observar es que conforme la solución está más concentrada (los °Brix aumentan) el flux de permeado disminuye, esto se debe a que la solución conforme se va concentrando, la viscosidad aumenta y hay mayor cantidad de solutos lo que provoca que se dé la polarización de la concentración como se presenta en el canal libre.

Tabla 5. Diferencia de porcentaje de flux de permeado de la configuración a) y c) con respecto a la configuración b)

°Brix	Canal Libre (%)	Configuración c) (%)
0	3.31	1.68
5	3.65	2.17
10	3.85	2.61
15	4.12	2.91

20	4.40	2.94
25	4.70	2.94
30	5.01	2.95
40	5.94	3.08
50	8.42	3.09

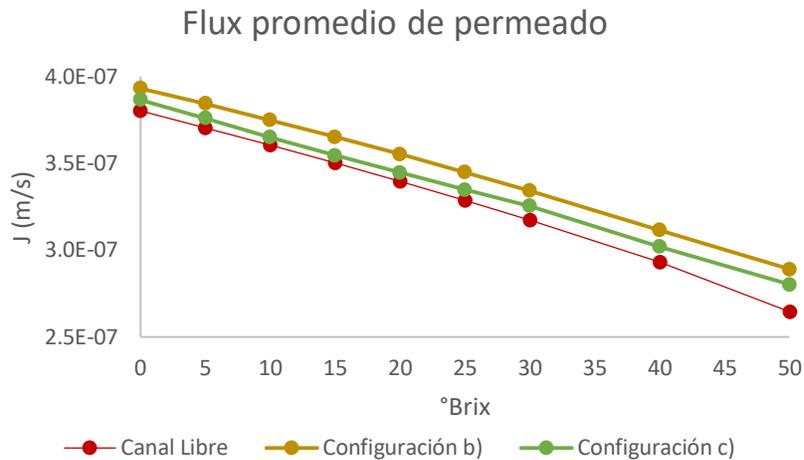


Figura 22. Flux promedio de permeado para las 3 diferentes configuraciones evaluado a distintos °Brix= 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 50 y $V=1.5$ m/s fija

7. CONCLUSIONES

- El uso de los espaciadores multicapa promueve una mejor redistribución de flujo a lo largo del canal de alimentación, provocando una mejor transferencia de calor en la superficie de las hojas de membrana, reduciendo el fenómeno de polarización de la temperatura.
- Ambas configuraciones con espaciadores presentaron aumento significativo en el flux de permeado con respecto de la configuración de canal libre, tanto para el ensayo con número de Reynolds de alimentación fijo, como para el de velocidad inicial fija.
- En el caso del estudio de número de Reynolds de alimentación fijo las configuraciones b y c obtuvieron un flux de permeado 15 y 7 % mayor a la configuración de canal libre, respectivamente.
- Para el estudio de velocidad de alimentación fija las configuraciones b y c obtuvieron un flux de permeado 10 y 7 % mayor a la configuración de canal libre, respectivamente.
- Se demostró que aún al incrementar la concentración del jugo (grados Brix) y por ende la viscosidad y densidad, las configuraciones con espaciadores superan en flux de permeado a la configuración convencional de canales libres.

- Comparando entre las configuraciones b y c, se encontró que el uso de espaciadores, así como el número y disposición en el canal de permeado también contribuyen significativamente a la mejora del flux de permeado, siendo la configuración b la que demostró una mayor eficiencia.
- Finalmente, el presente estudio demuestra promisoriamente que la futura implementación de espaciadores multicapa en módulos de membrana puede contribuir a una mejora significativa del proceso de destilación con membrana, en particular en el proceso de concentración de jugos preservando las características sensoriales como lo son aroma, sabor, color, viscosidad y estabilidad y las características nutricionales que son básicamente el contenido vitamínico.

8. BIBLIOGRAFIA

- Bernardo. (2009). *Concentration Polarization*. ScienceDirect.
- C.A. Quist-Jensen, F. M. (2016). *Direct contact membrane distillation for the concentration of clarified orange juice*. ELSEVIER.
- Cassano, A. D. (2003). *Clarification and concentration of citrus and carrot juices by integrated membrane processes*. Obtenido de Food Technology: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652013000300007
- Castillo, Y. (25 de Noviembre de 2013). *Evaporacion De Jugos Y Pulpas De Frutas*. Obtenido de ensayos.com/Tecnolog/Evaporacion-De-Jugos-Y-Pulpas-De-Frutas/1299682.html
- Codex, A. (2005). *NORMA GENERAL DEL CODEX PARA ZUMOS (JUGOS) Y NÉCTARES DE FRUTAS*. Obtenido de CODEX STAN 247-2005: http://www.fao.org/input/download/standards/10154/CXS_247s.pdf.
- Fernández Jiménez, C. (s.f.). *Análisis de transferencia de calor en canales con espaciadores multicapa para concentración de jugos mediante destilación con membrana*. Zacatecas.
- Fruit juice concentrates. (2018). En B. K. Gaurav Rajauria, *Fruit Juices* (pág. 231). Irlanda: ELSEVIER.
- González Rodríguez, L. M. (2017). *ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE UN MÓDULO DE MEMBRANAS EN ESPIRAL Y CON ESPACIADORES MULTICAPAS*. Celaya, Gto.
- Khayet, M. (2011). Introduction to Membrane Distillation. En T. M. M. Khayet, *Membrane Distillation* (págs. 1-2). The Netherlands: ELSEVIER.
- L. Martínez-Díez, M. V.-G. (2000). *Study of membrane distillation using channel spacers*. España: ELSEVIER.

- Mañas, M. C. (Septiembre de 2014). *Características de las membranas*. Obtenido de Aplicación de membranas PTFE en el proceso de destilación por membranas: http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/3535/3478_TFG_MARINACELIA_CAMPOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Peinemann, K. V. (2010). Membrane Technology. En S. P. Klaus- Viktor Peinemann, *Membranes for food applications*. Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Pelin Onsekizoglu, K. S. (2010). *Clarification and the concentration of apple juice using membrane processes: A comparative quality assesment*. ELSEVIER.
- Petrotos, K. y. (2001). *Osmotic concentration of liquid foods*. Obtenido de Food Engineering and Technology.
- Quezada, J. G. (2008). *FLUIDOS VISCOSOS*. Obtenido de Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación.: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3623/1/tema2RUA.pdf>
- Rodríguez, P. U. (Abril de 2015). *Configuraciones y módulos de membrana*. Obtenido de Filtración en membrana y ósmosis inversa: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Filtraci%C3%B3n+en+membrana+y+%C3%B3smosis+inversa.pdf/c6e09095-3730-c07e-42e8-3f9db4f7e28b>
- Saavedra Aldo, R. J. (2007). *ASPECTOS GENERALES SOBRE PROCESOS Y TECNOLOGIAS DE MEMBRANAS*. Obtenido de <http://ambiente.usach.cl/jromero/imagenes/GUIAS%20MEMBRANA/Documento%201%20Antecedentes%20generales%20sobre%20membranas.pdf>
- Silvia Correa, F. F. (abril de 1999). *Factores que influyen en la calidad del jugo de naranja*. Obtenido de Scielo: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20611999000100028
- Tiwari, B. K. (2018). Fruit Juice Concentration. En B. K. Gaurav Rajauria, *FRUIT JUICES: Extraction, Comoisition, Quality and Analysis* (pág. 217). Irlanda: ELSEVIER.
- Torrealba, R. Á. (2013). *La concentración de jugos de fruta: Aspectos básicos de los procesos sin y con membrana*. Obtenido de Scielo: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652013000300007
- V.D. Alves, I. C. (2005). *Orange juice concentration by osmotic evaporation and membrane distillation: A comparative study*. Portugal: ELSEVIER.