

## Comparación del coeficiente de transferencia de calor en un plato tipo Sieve con distintas áreas efectivas a través de simulaciones numéricas con el método SPH

Calculation of the global heat transfer coefficient in a distillation stage through numerical simulations with the SPH method

Carlos Enrique Alvarado Rodríguez, Christian Ricardo Lino Andrade, Diego Ian Agabo Aguilar

Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, C.P. 36050, Guanajuato, Guanajuato, México.  
ce.alvarado@ugto.mx, cr.linoandrade@ugto.mx , di.agaboaguilar@ugto.mx

### Resumen

La destilación es un proceso de separación de mezclas de dos o más sustancias líquidas ampliamente utilizado en diversas industrias y con una gran variedad de aplicaciones que funciona en base a la diferencia de las temperaturas de ebullición de las sustancias en la mezcla, permitiendo ebullicir una para separarla de las demás. Es por la versatilidad del proceso y el gran uso que se hace de este que es crucial comprender los fenómenos fisicoquímicos que lo rigen, para ellos se han diseñado muchos software que simulan con precisión de manera macroscópica las características y propiedades de una torre de destilación, y con el propósito de complementar la investigación existente con información que va más allá de lo que sucede de manera microscópica, en este proyecto se realiza la simulación de la transferencia de calor de la etapa 8 de una columna de destilación para separar la mezcla Benceno-Tolueno a través de dinámica de fluidos computacional usando el método de hidrodinámica de partículas suavizadas. Con los resultados obtenidos se obtiene la cantidad de calor transferida entre el líquido y el vapor en la etapa 8 y se calcula un coeficiente de transferencia en función del área efectiva del plato (85, 90 y 95%) con la finalidad de tener un parámetro de comparación entre los tres diseños analizados.

**Palabras clave:** Transferencia de calor, CFD, etapa Sieve, SPH.

### Introducción

La destilación es una de las operaciones unitarias más importantes en los sectores industriales, vital para la purificación eficiente de los productos deseados. Esta operación consume demasiada energía, representando aproximadamente el 3% del consumo energético total mundial y consumiendo alrededor del 50% de la energía utilizada en las industrias química y petroquímica. Sin embargo, su eficiencia ha sido históricamente un desafío. En las últimas décadas, una amplia investigación se ha centrado en mejorar los diseños de columnas de destilación.

Numerosos estudios se han centrado en optimizar tanto la configuración como los parámetros operativos de las columnas de destilación. Pero, lograr una eficiencia óptima depende significativamente del diseño del plato (hidrodinámica del plato) y de las condiciones operativas, que determinan el régimen de flujo dentro del plato. Si bien los métodos tradicionales, como las ecuaciones MESH y los simuladores secuenciales, han sido fundamentales en el estudio de estos diseños, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha recibido menos atención debido a su complejidad computacional. Sin embargo, los estudios de CFD son muy relevantes para el diseño industrial de columnas de destilación, ya que proporcionan una comprensión detallada de los procesos de flujo de fluidos, transferencia de calor y transferencia de masa dentro de la columna. Esta información detallada permite realizar predicciones y optimizaciones más precisas del rendimiento de la columna, lo que resulta en diseños más eficientes y rentables.

Varios investigadores han abordado diversos aspectos del diseño de platos, centrándose a menudo en platos a escala industria [1-3] con geometrías y configuraciones específicas. Algunas investigaciones han explorado cambios en las geometrías de los platos, como la modificación de las áreas libres [4], la adopción de patrones ortogonales de orificios [5,6], la incorporación de perforaciones inclinadas [7] o el estudio de los efectos del tamaño de los orificios y las burbujas [5]. Se han analizado diferentes tipos de platos, incluyendo platos de tamiz [8-9], platos de campana [10] y platos de campana cónica [11], evaluando su rendimiento hidrodinámico mediante parámetros como la distribución de velocidades, la altura de líquido claro y las fracciones volumétricas de líquido.

Debido a la elevada demanda computacional que implica la resolución de millones de ecuaciones diferenciales parciales que rigen la transferencia de calor, cantidad de movimiento y masa, los estudios han empleado estrategias como modelos de flujo transitorio [12], análisis con eje de simetría [13] y evaluaciones localizadas de regiones del plato [14] para reducir los costos computacionales. Sin embargo, estos enfoques pueden no capturar completamente el comportamiento del fluido, especialmente en regiones complejas como los bajantes [15,16], lo que limita su aplicabilidad a los escenarios específicos estudiados.

Esta capacidad para realizar experimentos virtuales reduce la necesidad de realizar pruebas físicas costosas y laboriosas. Además, la CFD puede ayudar a ampliar los procesos desde plantas piloto a operaciones industriales a gran escala al proporcionar información que garantiza la escalabilidad del diseño sin comprometer el rendimiento. En consecuencia, la CFD se está convirtiendo en una herramienta indispensable en el arsenal de los ingenieros químicos, complementando los métodos tradicionales y ampliando los límites de lo posible en el diseño y la optimización de los procesos de destilación.

Las simulaciones de CFD proporcionan información sobre la dinámica del flujo dentro de los platos de destilación, capturando fenómenos esenciales de transporte en las etapas de equilibrio. Los resultados suelen incluir campos de velocidad detallados y características de turbulencia a lo largo del recipiente, lo que ofrece información valiosa sobre la física del flujo a pesar de las complejidades implicadas. Las metodologías de CFD suelen emplear enfoques eulerianos o lagrangianos. Los métodos eulerianos discretizan los medios mediante una malla, lo que facilita el promediado espacial en las interfaces de fluidos. Los desafíos incluyen el modelado de interfaces, los problemas de convergencia y la selección de modelos de turbulencia adecuados para simular flujos turbulentos. Además, los métodos lagrangianos ofrecen información detallada sobre los fenómenos de interfaz al discretizar medios continuos en puntos no mallados. La Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (SPH) es un método lagrangiano emergente, apto para representar medios discontinuos y geometrías complejas mediante partículas, evitando las restricciones de una malla. El método SPH ha demostrado su versatilidad en el modelado de diversos escenarios, como el crecimiento microbiano, la dinámica de las olas oceánicas y los fenómenos astrofísicos, lo que destaca su aplicabilidad y robustez.

Para el estudio detallado de la dinámica del equilibrio L-V en un plato tipo Sieve dentro de una columna de destilación, los métodos lagrangianos, en particular la hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH), representan el enfoque computacional preferido. Los métodos lagrangianos ofrecen ventajas distintivas en el modelado de geometrías complejas y flujos multifásicos sin las limitaciones de una malla estructurada. Esta flexibilidad es crucial para capturar con precisión la compleja dinámica de fluidos, incluyendo patrones de burbujas e interfaces L-V, esenciales para comprender el rendimiento del plato en la transferencia de masa y calor. Su capacidad para rastrear partículas individuales de fluido mejora la precisión del modelado de flujos turbulentos y no uniformes, lo que los hace ideales para optimizar la eficiencia de la columna de destilación mediante un análisis hidrodinámico detallado. Por otro lado, debido a la naturaleza del método, no es necesario acoplar modelos de turbulencia para modelar el comportamiento de los fluidos, lo que permite aumentar significativamente el número de partículas y refinar la solución.

El análisis ofrece una comprensión profunda de la interacción entre las fases líquida y vapor, el efecto de la geometría al variar el porcentaje de área efectiva y su relación con el régimen de flujo, los patrones de flujo, los campos de velocidad y los campos de temperatura a lo largo del tiempo dentro del plato Sieve. El objetivo es proporcionar una visión detallada del comportamiento dinámico de los platos tipo Sieve, lo que permite optimizar el diseño de la columna de destilación para mejorar la eficiencia de la separación y la eficiencia energética.

Este estudio es de gran relevancia a nivel industrial, ya que la destilación es uno de los procesos de separación más utilizados en las industrias química y petroquímica. La eficiencia y la eficacia de las columnas de destilación inciden directamente en los costes operativos, el consumo energético y la calidad del producto. Al proporcionar una simulación detallada y precisa de la etapa de equilibrio líquido-vapor, esta investigación puede conducir a mejoras significativas en el diseño y la operación de las columnas de destilación. Optimizar el rendimiento de los platos y comprender las complejas interacciones dentro de la columna puede resultar en una reducción del consumo energético, unos costes operativos más bajos y una mayor eficiencia del proceso, factores cruciales para mantener la competitividad y la sostenibilidad en los procesos industriales.

## Metodología

### Planteamiento de simulación y modelo matemático

Se seleccionó una mezcla de benceno-tolueno para este análisis debido a sus importantes aplicaciones industriales y al papel fundamental que ambos compuestos desempeñan en diversos procesos de fabricación. El tolueno se utiliza en la producción de fenol, poliuretano, alcohol bencílico y ácido benzoico. El tolueno se obtiene de plantas de olefinas, petróleo crudo y procesos de producción de coque, y puede separarse de las corrientes de reformado mediante calentamiento, seguido de purificación mediante extracción con disolventes o destilación fraccionada. El benceno, precursor de polímeros como el poliestireno, las resinas y el nailon, es esencial en la fabricación de estireno y ciclohexano. Además, la separación del benceno y el tolueno es relativamente sencilla debido a la notable diferencia en sus puntos de ebullición y a su ligera desviación positiva del comportamiento en solución ideal.

Para este estudio, se seleccionó una mezcla equimolar. La elección de una mezcla equimolar simplifica el análisis y permite una evaluación equilibrada de la eficiencia del proceso de destilación.

Para este proceso se seleccionó una columna de destilación de bandejas tipo Sieve debido a su amplio uso industrial y su eficacia en el manejo de mezclas con propiedades variables. Las bandejas tipo Sieve ofrecen varias ventajas:

- Eficiencia: Proporcionan un buen contacto vapor-líquido, crucial para la separación eficiente de benceno y tolueno.
- Versatilidad: Las bandejas de tamiz son adecuadas para una amplia gama de condiciones operativas, lo que las hace ideales para las diversas propiedades de las mezclas de benceno y tolueno.
- Mantenimiento: Son relativamente fáciles de mantener y limpiar en comparación con otros tipos de bandejas, lo que reduce el tiempo de inactividad y los costos operativos.
- Escalabilidad: Las bandejas de tamiz se pueden escalar fácilmente para mayores volúmenes de producción, adaptándose a las demandas industriales.

El diseño de la columna de destilación se realizó con el software AspenPlus, garantizando que cumpliera con los criterios para un condensador total con una temperatura del agua de refrigeración de 48 °C. Se utilizó el modelo RadFrac de AspenPlus, conocido por su enfoque robusto y preciso, aprovechando métodos rigurosos basados en las ecuaciones MESH (Masa, Energía, Suma y Calor). El modelo termodinámico seleccionado para representar el equilibrio líquido-vapor fue el modelo de Dos Líquidos No Aleatorios (NRTL), ideal para manejar las complejidades de las mezclas no ideales. El modelo NRTL permite calcular el equilibrio líquido-vapor (VLE) y el equilibrio líquido-líquido LLE, y se recomienda para mezclas no ideales.

Se planteó una torre de destilación de 14 etapas con condensador total tipo Kettle con la alimentación en la etapa número 6 sobre el plato. La obtención de datos para las simulaciones CFD fue por medio de AspenPlus V11, ya que este programa permite obtener valores de propiedades del proceso por etapa, como son las entalpías, difusión térmica, tensión superficial, entre otras. Para esto se realizó la simulación de una columna de destilación para una mezcla Benceno-Tolueno con una composición de 0.98 obteniendo los valores mostrados en la Tabla 1.

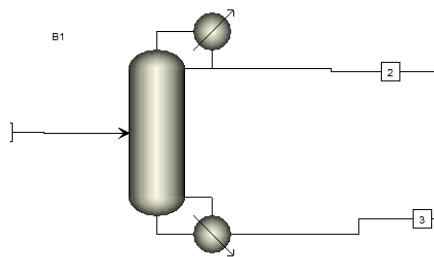


Figura 1. Diagrama de una columna de destilación de la mezcla Benceno-Tolueno en AspenPlus V11.

Tabla 1. Propiedades obtenidas de AspenPlus.

| Plato  | 7      | 8                     | 9      |
|--|--------|-----------------------|--------|
| Temperatura <sub>(V)</sub> [°C]                          | 378.76 | 383.67                | 388.76 |
| Temperatura <sub>(L)</sub> [°C]                          | 374.34 | 378.66                | 383.67 |
| Difusión térmica <sub>(L)</sub> [m <sup>2</sup> /s]      |        | 3.57x10 <sup>-6</sup> |        |
| Densidad <sub>(V)</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]             |        | 3.82                  |        |
| Densidad <sub>(L)</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]             |        | 784.28                |        |
| Velocidad <sub>(V)</sub> [m/s]                           |        |                       | 1.36   |
| Viscosidad cinemática <sub>(V)</sub> [m <sup>2</sup> /s] |        | 3.22x10 <sup>-7</sup> |        |
| Viscosidad cinemática <sub>(L)</sub> [m <sup>2</sup> /s] |        | 2.44x10 <sup>-6</sup> |        |
| Tensión superficial [N/m]                                |        | 0.018418              |        |

El cálculo de la transferencia de momento y calor se realizó mediante las ecuaciones CFD correspondientes, momento (Ec. 1), continuidad (Ec. 2) y calor (Ec.3) las cuales fueron resueltas mediante el método SPH con el código libre DualSPHysics [17]. La tensión superficial entre el líquido y el vapor fue modelada usando el modelo reportado por [18] y se utilizó el modelo de longitud de suavizado variable [19], sobre el método SPH para calcular con mejor precisión la interacción entre partículas líquidas y de vapor.

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \Gamma + \mathbf{g}, \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}. \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho C_p} \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (3)$$

donde  $\mathbf{v}$  es velocidad,  $\rho$  es densidad,  $P$  es presión,  $\Gamma$  es el término disipativo (viscoso),  $\mathbf{g}$  es la gravedad,  $t$  es el tiempo,  $T$  es la temperatura,  $C_p$  es la capacidad calorífica y  $k$  es la constante de conductividad térmica.

El modelo SPH utilizado considera al líquido como un fluido ligeramente compresible de acuerdo con la ecuación de estado utilizada (Ec. 4) donde la compresibilidad se ajusta con el valor de la velocidad del sonido ( $C_0$ ) siendo este al menos un orden de magnitud mayor a la velocidad del líquido para establecer una compresibilidad de hasta 1%.

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (4)$$

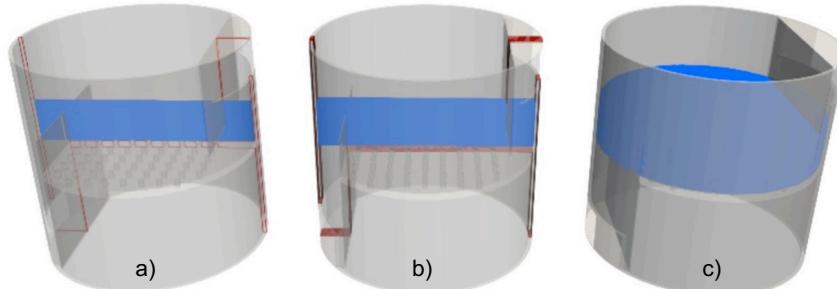
donde  $P$  es la presión,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\rho_0$  es la densidad de referencia,  $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$ ,  $c_0$  es la velocidad del sonido,  $\gamma = 7$  para líquidos y  $\gamma = 1.4$  para gases.

En la Tabla 2 se reportan los parámetros establecidos para las condiciones iniciales de las simulaciones en SPH donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $T_0$  es la temperatura en el instante inicial de la simulación. En este trabajo solo se estudia la transferencia de calor entre el líquido y vapor, por lo cual se consideran las propiedades de la mezcla en la etapa 8 y no así las propiedades por componente. Debido a que la etapa de estudio es la 8, se considera la temperatura inicial de cada fase de acuerdo con las etapas contiguas, es decir, el líquido tiene una temperatura inicial establecida en la etapa 7 y el vapor tiene inicialmente la temperatura de la etapa 9.

**Tabla 2.** Parámetros utilizados en la simulación SPH.

| Fluido/Parámetro | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $C_0$ (m/s) | $\nu$ (m <sup>2</sup> /s) | $T_0$ (K) |
|------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------|-----------|
| Líquido          | 789.21                      | 20          | 2.44x10-6                 | 374.34    |
| Vapor            | 3.99                        | 150         | 3.22x10-7                 | 388.76    |

En esta primera etapa del proyecto se realizaron únicamente simulaciones en 2D sobre el plano central de plato como se muestra en la Figura 2a, en la segunda etapa del proyecto se tiene considerado realizar la simulación 3D de la sección central del plato como se muestra en la Figura 2b y en la tercera etapa se simulará la etapa completa como se muestra en la Figura 2c.



**Figura 2.** Secciones simuladas en diferentes etapas, a) simulación 2D del plano central, b) simulación 3D de la sección central, c) simulación 3D de la etapa completa.

La simulación en 2D consta de 30189 partículas líquidas para todos los casos y un total de 1012684, 1012495 y 1202780 partículas totales para los casos de 85, 90 y 95% respectivamente. La variación de partículas en cada caso depende de la variación del área efectiva del plato. Se simularon 2 segundos de tiempo real, considerando 0.5 segundos de flujo de líquido antes de inyectar el vapor, lo anterior para considerar un flujo quasi-estacionario del líquido en la etapa.

Para este estudio, se planteó hacer simulaciones en distintas geometrías del plato, donde el área efectiva del plato variara en 85%, 90% y 95%. El diseño de los platos se realizó mediante CAD con el software SolidWorks. Para el cálculo del área efectiva del plato, AspenPlus hizo el cálculo del radio de la columna, con este y por medio de la ecuación para determinar el área de un círculo y el número de tubos, se obtuvo:

$$A_{85\%} = 0.85(0.0328m^2) = 0.02788m^2$$

$$A_{90\%} = 0.9(0.0328m^2) = 0.02952m^2$$

$$A_{95\%} = 0.95(0.0328m^2) = 0.03116m^2$$

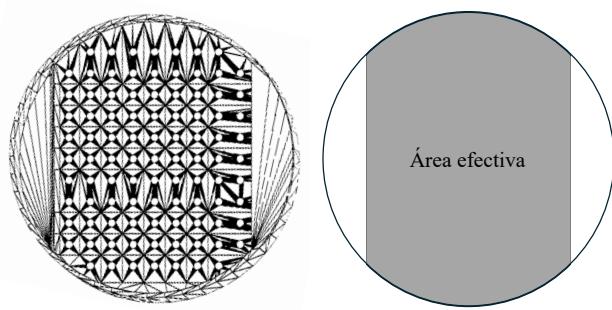


Figura 3. Representación del área efectiva en el plato, se simularon valores de 85, 90 y 95% del diámetro de la columna.

Utilizando la geometría generada en CAD se exporto a DualSPHysics para realizar las simulaciones. Se consideraron tres tipos de condiciones de contorno, Figura 4. La primera es la condición de no deslizamiento en las paredes de la etapa (columna, plato, bajante y vertedero), la segunda es una condición de entrada para las partículas de vapor, la cual considera una entrada de vapor con una velocidad constante de 1.36 m/s, dato obtenido de ASPEN, y finalmente se consideró una condición de periodicidad en el líquido, esta condición reinserta las partículas del vertedero por la bajante manteniendo el mismo número de partículas líquidas durante toda la simulación. De acuerdo con estas condiciones de contorno se establece que el líquido será calentado por el vapor hasta llegar a la temperatura de equilibrio correspondiente a la etapa 8, es decir, se está simulando el fenómeno de transferencia de momento y calor en el proceso interno de la etapa 8.

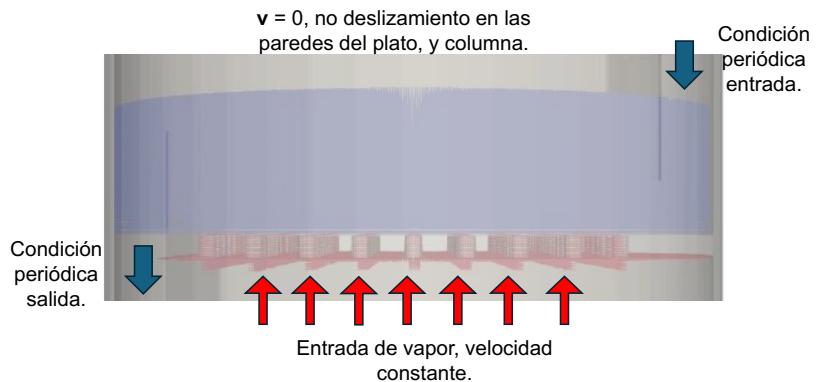


Figura 4. Condiciones de contorno utilizadas en la simulación.

A partir de las simulaciones numéricas se calcula el cambio de temperatura en el tiempo y el calor flujo de calor a partir del cambio de temperatura en el líquido mediante la ecuación (5), posteriormente con la ecuación (6) se calcula el coeficiente de transferencia como un parámetro comparativo para las distintas áreas efectivas simuladas.

$$\dot{Q} = mCp(\Delta T/\Delta t) \quad (5)$$

$$U = \frac{Q}{A_{efec}\Delta T_0} \quad (6)$$

Donde  $\dot{Q}$  es el flujo del calor,  $m$  es la masa del líquido,  $Cp$  es la capacidad calorífica de la fase líquida en la etapa 8,  $\Delta T/\Delta t$  es la variación de temperatura en un tiempo determinado,  $Q$  es el calor total transferido hacia el líquido,  $A_{efec}$  es el área efectiva del plato y  $\Delta T_0$  es la diferencia inicial de temperatura entre las fases líquida y vapor.

La comparación entre los casos simulados se realizará por medio el coeficiente de transferencia, entendiendo que entre mayor sea este valor mejor es el diseño del plato al aumentar la transferencia de calor entre fases. Además, se reportarán campos de velocidad y el régimen de flujo en cada uno de los casos.

## Resultados

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones numéricas obteniendo por un lado la parte del movimiento de ambas fases considerando la generación de burbujas y la transferencia de calor entre ambas fases, debido a esto, la sección de resultados se reporta en dos subsecciones: hidrodinámica y transferencia de calor.

### Hidrodinámica

En la Figura 5 se presentan los campos de velocidad promedio del líquido a partir del tiempo en el que se inyecta el vapor hasta el tiempo final de la simulación de 2 segundos. Estos resultados muestran zonas de estancamiento del líquido, zona donde la transferencia de calor se ve disminuida al tener poca convección. En los tres casos la velocidad máxima obtenida en la etapa es de 2 m/s, de igual forma se observa un patrón similar de flujo donde la mayor velocidad del fluido está en la bajante y asciende hacia el vertedero generando las velocidades más bajas en la esquina inferior del vertedero y el plato, debido al movimiento del vapor se forman varios vórtices en distintas zonas de la etapa, lo cual promueve la transferencia de calor entre las fases. El diámetro promedio de las burbujas es de 1.1529, 1.2149 y 1.1499 centímetros para los casos de 85, 90 y 95% respectivamente. Los diámetros de burbujas obtenidos representan un régimen turbulento obteniendo valores de  $Re = 11479.2, 10980.2$ , y  $13419.17$  para los casos de 85, 90 y 95% respectivamente.

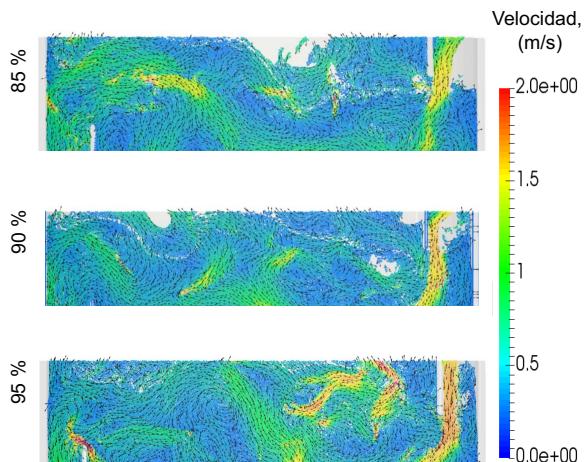


Figura 5. Campo de velocidad para cada uno de los casos en  $t=1.5$  segundos.

### Transferencia de calor.

A partir del incremento de temperatura en el líquido se calculó la transferencia de calor en función del tiempo, el cual se muestra en la Figura 6, y con este valor se obtuvo el coeficiente de transferencia de calor para cada caso estudiado, los resultados obtenidos se reportan en la Tabla 4. En todos los casos se obtiene un flujo de calor similar logrando la temperatura de la etapa 8 a los 1.5 segundos aproximadamente, estos resultados nos indican que para las consideraciones y simplificaciones consideradas en la simulación 2D la variación del área efectiva no afecta mucho la transferencia de calor entre fases.

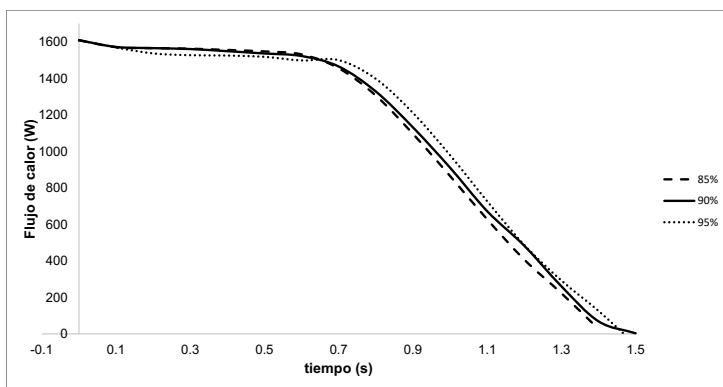


Figura 6. Flujo de calor hacia el líquido en función del tiempo.

En la Tabla 2 se presenta el valor del calor y el coeficiente de transferencia de calor para cada uno de los casos simulados. Los resultados indican que el plato con un área efectiva de 85% propicia mayor transferencia de calor entre las fases por unidad de área del plato, sin embargo, el calor transferido hacia el líquido es mayor conforme se aumenta el porcentaje de área efectiva. Estos resultados se complementarán con las simulaciones a realizar en las etapas 2 y tres del proyecto para corroborar como afecta el incremento del área efectiva en la transferencia de calor entre fases.

**Tabla 2.** Parámetros utilizados en la simulación SPH.

| Área efectiva | Q (J)   | U (J/m <sup>2</sup> K) |
|---------------|---------|------------------------|
| 85%           | 1612.05 | 4009.7669              |
| 90%           | 1642.41 | 3858.3353              |
| 95%           | 1664.43 | 3704.2716              |

## Conclusiones

En este trabajo se presenta la simulación de las transferencias de momento y calor en la etapa 8 de una columna de destilación de 14 etapas usada para la separación de una mezcla de Benceno-Tolueno. La simulación se llevó a cabo mediante CFD con el método SPH usando el código DualSPHysics. Se analizaron tres casos de estudio en los cuales de varió el área efectiva del plato tipo Sieve con la finalidad de analizar como impacta este valor en el coeficiente de transferencia de calor entre fases. Los resultados obtenidos indican que bajo las condiciones de flujo utilizadas se tiene un régimen turbulento con valor de  $Re$  de 10980.2 a 13419.17, obtenidos en los distintos casos simulados. Lo cual indica que el plato con 95% de área efectiva genera mayor turbulencia en el movimiento de ambas fases. Por otro lado, los valores obtenidos de los coeficientes de transferencia para cada caso indican que el 85% genera una mayor transferencia por área del plato entre fases en comparación con los otros dos casos estudiados.

## Trabajo a futuro

Con la culminación de la primera etapa de este proyecto (simulación en 2D) se realizarán las simulaciones en 3D y se verificará si los resultados son consistentes para la simulación en donde se considera la etapa completa. Además, se realizarán variaciones en la velocidad del líquido y del vapor para generar distintos regímenes de flujo y evaluar la transferencia de calor en cada uno de ellos para obtener correlaciones de número adimensionales entre la hidrodinámica y la transferencia de calor en función del área efectiva de plato.

## Referencias

1. Mehta, B., Chuang, K. T. & Nandakumar, K. (1998). Model for liquid phase flow on sieve trays. *Chem. Eng. Res. Des.*, 76 (7), 843–848.
2. Yu, K. T., Yuan, X. G., You, X. Y., & Liu, C. J. (1999). Computational fluid dynamics and experimental verification of two-phase two-dimensional flow on a sieve column tray. *Chem. Eng. Res. Des.*, 77(6), 554– 560.
3. Liu, C. J., Yuan, X. G., Yu, K., & Zhu, X. J. (2000). A fluid–dynamic model for flow pattern on a distillation tray. *Chem. Eng. Sci.*, 55 (12), 2287–2294.
4. Bernard, J. D. T., & Sargent, R. W. H. (1966). The hydrodynamic performance of a sieve plate distillation column. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 44, 314.
5. Rahimi, R., Sotoodeh, M. M., & Bahramifar, E. (2012). The effect of tray geometry on the sieve tray efficiency. *Chem. Eng. Sci.*, 76, 90–98.
6. Sun, J., Luo, X., Jiang, S., Wang, W., Lyu, H., Wang, P., & Gao, H. (2014). Computational Fluid Dynamics Hydrodynamic Analysis of a Cross Orthogonal Fixed-Valve Tray. *Chem. Eng. Technol.*, 37 (3), 383– 391.
7. Kállai, V., Mizsey, P., & Szepesi, G. L. (2023). CFD Investigation of Dry Tray Pressure Drop of Perforated Trays without Downcomer. *Period. Polytech., Chem. Eng.*, 67 (2), 310–315.
8. Zarei, A., Hosseini, S. H., & Rahimi, R. (2013). CFD and experimental studies of liquid weeping in the circular sieve tray columns. *Chem. Eng. Res. Des.*, 91 (12), 2333–2345.
9. Krishna, R., Van Baten, J. M., Ellenberger, J., Higler, A. P., & Taylor, R. (1999). CFD simulations of sieve tray hydrodynamics. *Chem. Eng. Res. Des.*, 77 (7), 639–646.
10. Canchola-López, P. G., Vázquez-Hernández, A. E., Cortez González, J., Murrieta-Duñas, R., Gutiérrez-Guerra, R., & Alvarado Rodríguez, C. E. (2023). Numerical simulation of the LV equilibrium within a stage in a distillation column using CFD. *Comput.-Aided Chem. Eng.*, 52, 1347–1352.
11. Zarei, T., Abedini, E., Rahimi, R., & Khorshidi, J. (2017). Computational fluid dynamics on the hydrodynamic characteristics of the conical cap tray. *Korean J. Chem. Eng.*, 34, 969–976.
12. Movahedi, P. M., & Rahimi, R. (2015). Hydrodynamics of sieve tray distillation column using CFD simulation. *J. Chem. Pet. Eng.*, 49 (2), 119–129.
13. Malvin, A., Chan, A., & Lau, P. L. (2010). Large eddy simulation of distillation sieve tray hydrodynamics using volume-of-fluid (VOF) multiphase model. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science; WCECS*, 20–22.
14. Wu, Q., Xue, J., Hu, N., Lai, Y., Zhao, H., Li, Q., & Gu, J. (2023). Open Balance Point and Dry Pressure Drop of a Rectangular Float Valve Tray: Experiment and CFD Simulation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 62(48), 20844–20858.
15. Rodríguez-Angeles, M. A., Gómez-Castro, F. I., Segovia Hernández, J. G., & Uribe-Ramírez, A. R. (2015). Mechanical design and hydrodynamic analysis of sieve trays in a dividing wall column for a hydrocarbon mixture. *Chem. Eng. Process.*, 97, 55–65.
16. Noriler, D., Barros, A. A., Maciel, M. R. W., & Meier, H. F. (2010). Simultaneous momentum, mass, and energy transfer analysis of a distillation sieve tray using CFD techniques: prediction of efficiencies. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49 (14), 6599–6611.
17. Domínguez, J. M., Fourtakas, G., Altomare, C., Canelas, R. B., Tafuni, A., García-Feal, O., Martínez-Estevez, I., Mokos, A., Vacondio, R., Crespo, A. J. C., Rogers, B. D., Stansby, P. K., & Gómez-Gesteira, M. (2022). DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems. *Computational Particle Mechanics*, 9(5), 867–895. doi:10.1007/s40571-021-00404-2.
18. Tartakovsky, A. M., & Meakin, P. (2006). Pore-scale modeling of immiscible and miscible fluid flows using smoothed particle hydrodynamics, *Advances in Water Resources*, 29 (10) 1464–1478.
19. Sigalotti, D. G. L., López, H., Donoso, A., Sira, E., & Klapp, J. (2006). A shock-capturing SPH scheme based on adaptive kernel estimation. *Journal of Computational Physics*, 212, 124–149.