

Un estudio sobre el rendimiento de separación de tubos helicoidales aplicados a flujos bifásicos de agua y aceite de oliva

A study on the separation yield of helical tubes applied to water–olive oil two–phase flows

Vallesquino, P. ^{a1} y Molina, A.^{a2}

^aDepartamento de Bromatología y Tecnología de los alimentos. Universidad de Córdoba, Campus Rabanales, N–IV, Km 396, 14014 Córdoba, Spain.
E-mail: ^{a1}bt1valap@uco.es, ^{a2}antoniomolzaf@gmail.com

Recibido: 21/01/2019

Aceptado: 25/03/2019

Publicado: 31/07/2019

Citar como: Vallesquino, P. y Molina, A. (2019). A study on the separation yield of helical tubes applied to water-olive oil two-phase flows. *Ingeniería del agua*, 23(3), 169-185. <https://doi.org/10.4995/la.2019.11268>

RESUMEN

Los estudios sobre flujos bifásicos de agua y aceite, desarrollados con separadores helicoidales, no son numerosos y parecen estar restringidos, actualmente, a la industria petroquímica. El presente trabajo ha sido realizado para estudiar el comportamiento de estos dispositivos cuando son empleados con dispersiones de agua y aceite de oliva a diferentes concentraciones. A tal fin, se han construido dos modelos experimentales para analizar los rendimientos de separación alcanzados bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Se han tenido en cuenta variables como el número de Reynolds, las pérdidas de carga o la relación entre flujos descargados para determinar su rango óptimo de operación. Los resultados obtenidos indican que en sistemas de agua-aceite de oliva es posible obtener rendimientos de separación cercanos al 100% con tuberías de diámetro pequeño, radios de hélice reducidos y bajos requerimientos energéticos. Este hecho abre una vía para diseñar estos dispositivos desde otros puntos de vista.

Palabras clave | líquido-líquido; separador; tubería; fluido; clarificación; almazara.

ABSTRACT

Studies on water and oil two–phase flows, developed in helical pipe separators, are not numerous and seem to be currently restricted to the petrochemical industry. The present work has been done to study the performance of these devices when they are applied to water–olive oil dispersions at different oil cuts. In this line, two experimental devices have been constructed to analyze the separation yields achieved under different operating conditions. Variables like the Reynolds number, the pressure head losses or the outflow ratios have been taken into account to determine their optimal performance range. The results obtained indicate that, in water–olive oil systems, it is possible to obtain separation yields of close to 100% with small pipe diameters, reduced helix radii and low energy requirements. This fact opens up the way to carry out the design of these devices from other points of view.

Key words | liquid-liquid; separator; pipe; fluid; clarification; olive mill.

INTRODUCCIÓN

Dentro de las operaciones básicas que hoy día pueden verse aplicadas en muchos procesos industriales, se podría destacar un conjunto de ellas en el que el objetivo más importante que se persigue es la separación de dos o más sustancias, con propiedades químicas o físicas diferentes, que se encuentran mezcladas o agrupadas en un volumen de control (Hermida, 2000). Orientando nuestro interés en las industrias de alimentos, y más concretamente en las productoras de aceite de oliva (almazaras), es un problema habitual tener que trabajar con sistemas líquido-líquido (dispersiones o emulsiones inestables), líquido-sólido (suspensiones) o sólido-líquido (pastas o suspensiones sólidas) que deben ser separados en sus fases fundamentales.

En la actualidad, dichas separaciones suelen realizarse a través de técnicas de decantación –centrífuga o gravitatoria–, tamizado y filtración, teniendo cada una de ellas sus ventajas e inconvenientes de acuerdo a sus características (Cerretani et al., 2010; Uceda et al., 2006; Hermoso et al., 1996). En este sentido, puede destacarse a grandes rasgos que la decantación por gravedad –utilizando pocillos o tanques de decantación– es energéticamente menos costosa que la centrifugación, pero suele ofrecer separaciones más lentas que pueden derivar en la aparición de defectos en el aceite. Asimismo, requiere normalmente de un mayor espacio para ser desarrollada. Por su parte, la decantación centrífuga es una operación muy rápida y limpia, pero su coste energético puede ser elevado y el volumen de residuos líquidos generados (alpechín) también puede ser importante. En lo que se refiere al tamizado y la filtración, conceptualmente están orientados a retener pequeñas cantidades de sólidos que puedan estar presentes en el aceite. Su efectividad en la separación del agua del aceite, especialmente cuando se aplica la filtración, está limitada prácticamente a aquellos volúmenes que se encuentran ligados a los sólidos o coloides que pueden ser retenidos.

En el contexto planteado, el uso experimental de separadores helicoidales (ver Figura 1), orientados actualmente para tratar sistemas agua-aceite propios de la industria petroquímica (Zhao et al., 2012), podría ser una alternativa a considerar en el ámbito de las almazaras (para llevar a cabo, por ejemplo, tareas de clarificación del aceite de oliva virgen o para tratar parcialmente las aguas de lavado generadas en dichas industrias).

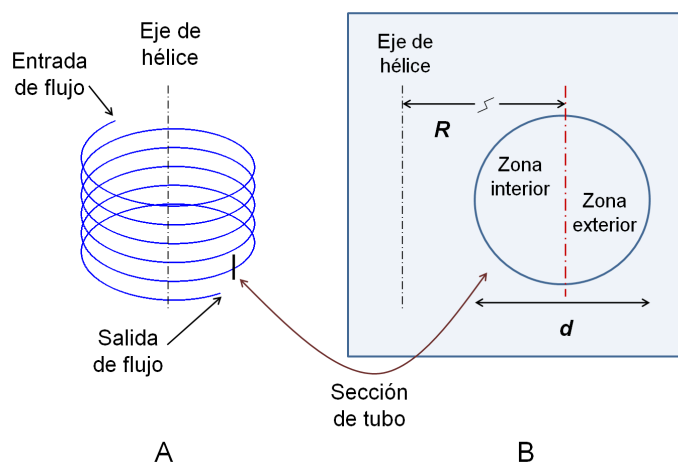


Figura1 | Esquema de separador helicoidal (A). Detalle de una sección del tubo (B).

Dichos dispositivos no requieren de partes móviles –la energía del flujo proviene de una bomba que con antelación debe comunicarle la altura de presión y la velocidad necesarias–, y su construcción puede realizarse de forma sencilla partiendo de un tubo enrollado helicoidalmente. En cuanto al flujo que puede desarrollarse en el interior de los mismos, puede indicarse con cierta aproximación que es un campo de estudio que aún mantiene cuestiones abiertas relacionadas con aspectos geométricos, dinámicos y de escala que afectan al diseño de estos dispositivos (Vidnes et al., 2015).

En este punto, merece señalarse que las características de la corriente que puede establecerse en el interior de un conducto helicoidal, en el que el radio de giro sea lo suficientemente pequeño para que los efectos de la fuerza centrífuga sean apreciables, son algo diferentes a las que van asociadas a un tubo recto. Teniendo presentes los aspectos más fundamentales, necesarios para comprender la complejidad del problema en su conjunto, se puede aportar de forma resumida que bajo régimen laminar en corrientes monofásicas helicoidales (Kumar y Nigam, 2005; Ciofalo et al., 2015), además del movimiento principal del flujo en el sentido de la corriente, existe otro movimiento secundario que se produce en el plano transversal al movimiento principal (debido a la acción de la fuerza centrífuga). De forma esquemática, dicho flujo puede ser como el que se representa en la Figura 2, en la que puede verse (en su parte 2.I) que en toda sección existen dos vórtices primarios (o de Dean) que promueven la recirculación del flujo en el plano transversal. En sentido longitudinal cada una de estas estructuras daría su contribución al perfil de velocidades (U).

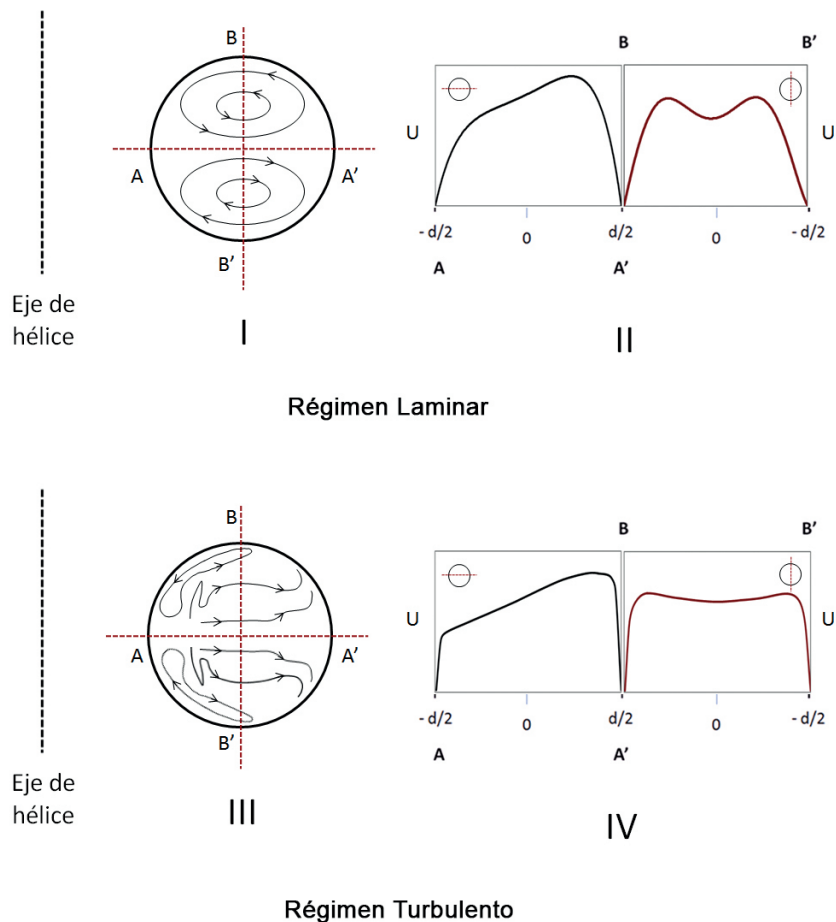


Figura2 | Flujos secundarios, y perfiles de velocidad, en un tubo helicoidal bajo regímenes laminar (I y II) y turbulento (III y IV).

Dependiendo de la línea de corte empleada (ver Figura 2.II) se pueden ver distribuciones como la A – A' (muy afectada por la fuerza centrífuga) o como la B – B' (no afectada directamente por el efecto centrífugo). A efectos prácticos, suele aceptarse que esta configuración del flujo suele mantenerse hasta un número de Reynolds crítico (Re_{crit}) que puede ser estimado a partir de la siguiente expresión (Srinivasan et al., 1970):

$$Re_{crit} \approx 2100 \cdot (1 + 12\sqrt{\delta}) \quad (1)$$

en donde $\delta = r / R$ es un factor que viene dado por el cociente entre el radio del tubo $r = d/2$ y el radio de la hélice R (ver Figura 1). Bajo régimen turbulento monofásico y helicoidal (Di Liberto et al., 2013), se constata que la influencia de los vórtices de Dean en el

plano transversal va quedando más focalizada a la zona más interior de la hélice a medida que nos separamos del Re_{crit} , quedando el resto de la sección con una estructura menos ordenada que la ya presentada bajo flujo laminar (ver Figura 2.III). En lo que respecta a los perfiles de velocidad (ver Figura 2.IV), se observan ciertas diferencias a los mostrados bajo régimen laminar (Figura 2.II), siendo más “afilados” en los extremos y más lineales en la parte central. No obstante, en el lado exterior de la hélice se verifica nuevamente que existe una mayor velocidad en sentido axial (Di Liberto et al., 2013).

En flujos bifásicos helicoidales la mayoría de los estudios están enfocados a casos en los que se analizan sistemas líquido-gas frecuentemente ligados al funcionamiento o diseño de intercambiadores de calor (Vashisth y Nigam, 2009; Zhu et al., 2017). Dado que entre líquidos y gases existen normalmente grandes diferencias de densidad, viscosidad y energía superficial, los resultados de dichos estudios tienen una extrapolación limitada a otros sistemas como los formados por dos líquidos (Vidnes et al., 2015), en los que las diferencias entre las variables indicadas pueden ser de otro orden de magnitud. En este contexto, los trabajos de Trallero et al., (1997), Elseth y Melaen (2001) o Montoya et al. (2009) pueden ser estudiados como referencias de interés para entender el comportamiento de sistemas de agua-aceite simples. En los trabajos citados, usando tuberías horizontales se llegan a identificar y establecer una serie de patrones estándar que suelen repetirse con asiduidad cuando se trabaja con flujos bifásicos de agua y aceite. Dichos patrones pueden ser encuadrados dentro de 2 grandes grupos –flujos segregados y flujos dispersos– cuya aparición está íntimamente ligada al tipo de régimen existente en la corriente: flujos segregados si el régimen es laminar y flujos dispersos desde la aparición de los primeros indicios de turbulencia en la corriente.

Los estudios con flujos bifásicos agua-aceite en conductos helicoidales no son numerosos (Zhang et al., 2006; Zhao et al., 2009; Niu et al., 2010; Zhao et al., 2012), sin embargo, abren un camino en el estudio de las separaciones de sustancias en sistemas no miscibles líquido-líquido. En dichos trabajos queda patente que es posible obtener separaciones aceptables a partir de flujos segregados, similares a los que se presentaban en tuberías horizontales, cuidando parámetros como el caudal y las concentraciones de agua/aceite a la entrada, el diámetro interior de la tubería o el radio de la hélice.

Considerando todo lo anterior, y siendo conscientes de la utilidad y posibilidades que puede ofrecer esta nueva alternativa, se presenta este trabajo experimental con el que se pretende estudiar, de forma preliminar, el comportamiento de estos dispositivos trabajando con sistemas formados con agua y aceite de oliva virgen extra a diferentes concentraciones. Se analizarán los rendimientos de separación alcanzados, en función de variables como el número de Reynolds, las pérdidas de carga o la concentración de aceite en el flujo, y se darán algunas recomendaciones que podrían ser de utilidad para estudios futuros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tratando de evitar la presencia de turbulencia dentro de los separadores, con el fin de promover la existencia de flujos segregados que suelen propiciar mejores niveles de separación, para probar estos dispositivos se decidió construir dos modelos con radios de hélice (R) de 38.95 mm y 13.15 mm respectivamente (Molina y Vallesquino, 2015). Teniendo en cuenta que los ensayos deberían ser realizados en laboratorio a una escala reducida, se partió en cada caso de un tubo transparente de polietileno de baja densidad –con un diámetro interior de 4.048 mm y una longitud de 10 m– que fue enrollado helicoidalmente tal y como se muestra en la Figura 3.

En cada separador, por la parte superior del tubo (1) se permitía la entrada a presión de la dispersión a tratar, y por el extremo inferior (4) se procedía a la división del flujo –a presión atmosférica– en dos partes (q_{int} y q_{ext}) dividiendo la sección original de la tubería en 2 semicírculos iguales separados por la pared del molde de enrollamiento (con un grosor de 0.3 mm). Los flujos obtenidos eran conducidos a sendos embudos (6) y de ahí a dos recipientes diferentes (7). Con esta forma de proceder se trataba de perturbar lo mínimo posible las líneas de corriente a la salida de cada separador, evitando así la re-emulsión del agua y del aceite ya separadas.

Para poder ensayar estos dispositivos se dispuso de un sistema hidráulico como el que se muestra en la Figura 4, en el que se usó en general –salvo con los elementos 4, 6 y 13– tubería transparente de PE con diámetro interior de 19 mm. En dicho sistema, el suministro urbano de agua (1) alimentaba a un tanque de regulación abierto a la atmósfera (2) de 0.05 m³ localizado a una altura elevada (del orden de 11 m). Las válvulas de esfera (3), (5), (7), (9) y (12) eran usadas como elementos de control y las alturas

de presión eran medidas por medio de un manómetro digital (8) (con una presión máxima de trabajo de 20 m.c.a y una precisión del $\pm 2\%$) y con un piezómetro transparente (4), con diámetro nominal de 4 mm, en el que se podían medir las alturas al milímetro usando cinta métrica.

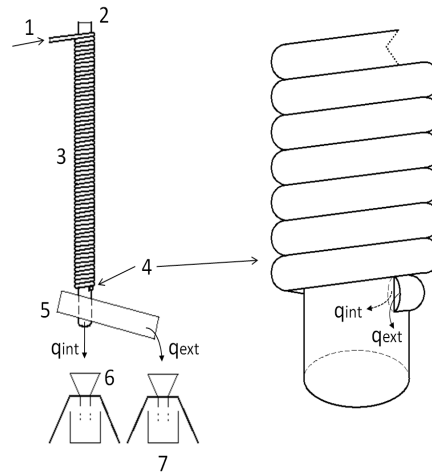


Figura 3 | Separador helicoidal: entrada de emulsión (1); molde cilíndrico (2); tubo helicoidal (3); zona de separación y salida de flujos (4); canaleta de conducción (5); embudo (6); recipiente (7).

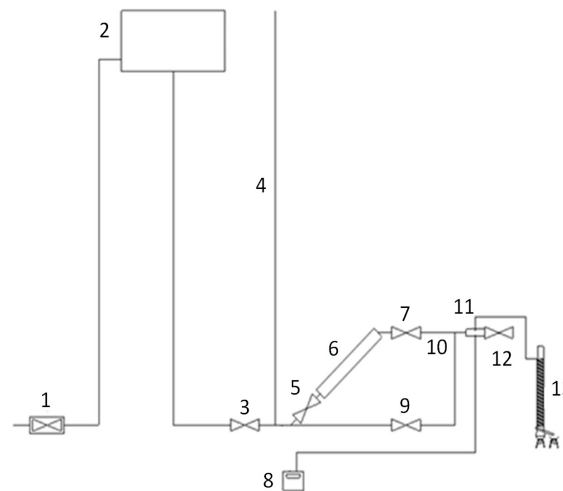


Figura 4 | Sistema hidráulico con toma de agua (1); depósito de regulación (2); válvulas de esfera (3), (5), (7), (9), (12); piezómetro (4); inyector de aceite (6); manómetro digital (8); zona de mezcla agua-aceite (10); conexión de entrada de flujo en separador (11); separador helicoidal (13).

La inyección de aceite en el sistema era propiciada por (6), siendo este elemento una tubería transparente de PE, de 40 mm de diámetro interior y con una capacidad volumétrica de unos 2000 cm³, que era llenada con aceite de oliva virgen extra al inicio de cada sesión de ensayos. En este punto, conviene notar que, básicamente, los flujos bifásicos tratados durante los experimentos podían ser calificados como dispersiones de aceite en agua (o emulsiones inestables de aceite en agua) de acuerdo con las clasificaciones y descripciones realizadas por Trallero et al. (1997) o por Elseth y Melaaen (2001). Dichos flujos eran creados en la zona de mezcla (10) gracias al uso de las válvulas (3), (7) y eventualmente la (12) –para generar más turbulencia–. Normalmente, la válvula (9) se dejaba completamente abierta, lo que permitía chequear y comparar (al inicio y al final de cada ensayo) las alturas de presión medidas por el piezómetro (4) y el manómetro digital (8) –ambas equivalentes por regla general–. En la práctica, la corriente de

agua proveniente de (3) - (9) servía para interceptar y mezclarse con las pequeñas gotas de aceite que procedían transversalmente del recorrido (6) - (7). La presencia de vórtices en la zona de mezcla (10), y la acción de la válvula (7) que propiciaba la ruptura de la corriente de aceite en pequeñas gotas, favorecían la creación de los flujos antes mencionados. Como la capacidad de (6) era sólo de unos dos litros, se decidió trabajar con concentraciones de aceite bajas (inferiores al 12% como se verá más adelante) para poder desarrollar un mayor número de experimentos en cada sesión de trabajo. Esta decisión también estaba justificada al observar durante los experimentos que los rendimientos de separación eran bajos a altas concentraciones de aceite, lo que hacía menos interesante trabajar en esta zona de funcionamiento.

Los caudales (q) de agua y aceite (véase más adelante la Figura 10) fueron medidos volumétricamente –aplicando un tiempo t para recoger un volumen V – usando recipientes de plástico (vasos), probetas graduadas y un cronómetro digital (con precisión de ± 0.01 s). El procedimiento seguido se describe a continuación: las muestras recogidas durante los ensayos (dos por experimento, tal y como se muestra en las figuras 3 ó 5) eran codificadas y cuidadosamente introducidas en cajas de cartón. Entonces, se aplicaba un periodo de decantación natural no inferior a 24 – 48 horas (de forma similar a como refieren otros autores como Bejaoui et al., 2013; o Gila et al., 2016) hasta verificar visualmente que el aceite y el agua estaban separados. En este sentido, merece señalarse que los vasos de plástico empleados para recoger las muestras eran pequeños, con una capacidad cercana a los 300 cm³ y con una altura de unos 15 cm, y además no eran llenados por completo –normalmente sólo hasta unos 10 cm como máximo–, lo que reducía apreciablemente el tiempo de decantación.



Figura 5 | Muestras de ejemplo, tomadas del separador con $R=13.15$ mm, con un rendimiento cercano al 100%. La de la parte izquierda fue recogida de la sección exterior del separador y la de la derecha fue tomada del lado interior de dicho dispositivo.

De forma similar a como se puede medir cualquier longitud usando una regla, sólo los volúmenes de aceite contenidos en cada vaso fueron medidos, de forma preliminar y sin necesidad de extracción, comparando su contenido con el de otros recipientes ya graduados y creados al uso (ver Figura 6).

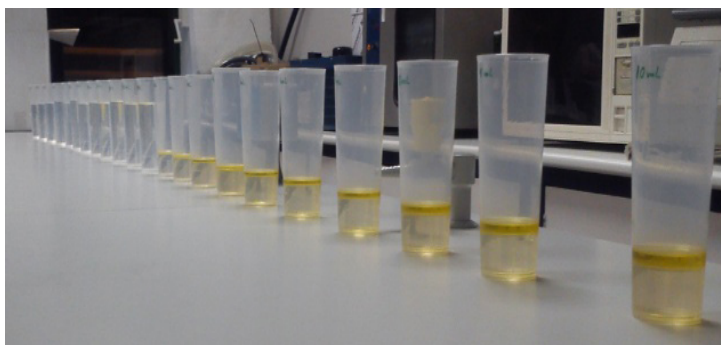


Figura 6 | Imágenes de los vasos de referencia (o “patrón”)

Estos vasos de referencia (o “patrón”) fueron preparados previamente con diferentes y conocidas cantidades de aceite en agua (oscilando entre $0.03 \text{ cm}^3 - 12 \text{ cm}^3$ de aceite por cada $70 \text{ cm}^3 - 200 \text{ cm}^3$ de agua) y los mismos fueron empleados para obtener un conocimiento inicial del contenido de aceite en cada muestra (con un error del orden o inferior al $\pm 20\%$). Una vez que el contenido de aceite era estimado de forma aproximada, la muestra contenida en un vaso dado –con aceite y agua– era vertida cuidadosamente dentro de una probeta calibrada. En este punto, nótese que se usaron probetas con capacidad de $100 \text{ cm}^3 - 250 \text{ cm}^3$ (y precisión de $\pm 0.5 \text{ cm}^3 - 1 \text{ cm}^3$, respectivamente) dependiendo del contenido original de las muestras tratadas. Tras un tiempo suficiente, hasta verificar de forma efectiva que el aceite y el agua no estaban mezclados dentro de la probeta –de ahí el interés de usar previamente los vasos “patrón”–, los contenidos de agua y aceite eran medidos. Con este conocimiento, el caudal (q), de aceite o agua, era calculado por medio del simple ratio: $q = V / t$.

Teniendo en cuenta las características hidráulicas del sistema empleado, y el procedimiento seguido para determinar los caudales de aceite y agua, *a priori*, el valor de la concentración de aceite (o el caudal) no eran conocidos al inicio de cada experimento para una presión de trabajo dada. Sin embargo, de un ensayo a otro sí era posible observar (cualitativamente) si dichas variables aumentaban o disminuían al accionar las válvulas de control, hecho que fue usado para cubrir un variado rango de caudales, concentraciones de aceite y pérdidas de carga tal y como se verá en el próximo apartado. Para asegurar que todos los ensayos se llevaban a cabo en condiciones similares, la temperatura del flujo era medida regularmente en el depósito (2) y a la salida del separador (13). Dado que todos los experimentos se realizaron bajo un ambiente estable, la temperatura de los flujos ensayados se mantuvo en torno a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ en todos los casos. En estas condiciones, las propiedades físicas del aceite de oliva empleado –medidas por los autores– fueron: densidad $\rho = 909.14 \text{ kg/m}^3$ y viscosidad cinemática $\nu = 7.97 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (Molina y Vallesquino, 2015). A este respecto, indicar brevemente que la densidad ρ fue obtenida a partir de las correspondientes medidas de pesos y volúmenes (usando una balanza y probetas de 250 cm^3 con precisiones respectivas de $\pm 0.1 \text{ g}$ y $\pm 1 \text{ cm}^3$). La viscosidad ν fue determinada aplicando la ecuación de Hagen–Poiseuille con un tramo recto de tubería, en el que se hacía circular el fluido bajo régimen laminar, cuidando adecuadamente las condiciones de contorno y empleando medios similares a los ya descritos en este estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La determinación de los rendimientos de separación en los ensayos realizados es un elemento fundamental que puede ser empleado para comprobar si el diseño helicoidal es una alternativa interesante para llevar a cabo la construcción de separadores. Teniendo en cuenta la forma con la que los dispositivos utilizados llevaban a cabo la separación del agua y del aceite, se estimó oportuno adoptar la siguiente ecuación para calcular el rendimiento relativo η (en %) entre las secciones interior y exterior de dichos dispositivos:

$$\eta = \frac{q_{o_{int}} - q_{o_{ext}}}{q_o} \cdot 100, \quad (2)$$

en donde $q_{o_{int}}$ es el caudal de aceite extraído del lado interior del separador, $q_{o_{ext}}$ es el caudal homólogo extraído del lado exterior y q_o el caudal total de aceite. Tal y como está planteada la Ecuación 2, se considera que un rendimiento es del 100% cuando $q_{o_{int}} = q_o$ (todo el aceite se recoge por el interior y $q_{o_{ext}} = 0$). Si $q_{o_{int}} = q_{o_{ext}}$ estaríamos en un caso en el que se captaría igual cantidad de aceite por el lado interior y por el lado exterior, por lo tanto, en ese supuesto $\eta = 0\%$. Por último, si $q_{o_{ext}} = q_o$ (lo que implica que $q_{o_{int}} = 0$) estaríamos en un caso en el que $\eta = -100\%$ (situación en la que ocurriría una separación total pero no de la forma deseada, pues el aceite es un fluido menos denso y se espera que su sección de salida sea la interior). Con el planteamiento descrito, todos los rendimientos relativos por encima de cero ($q_{o_{int}} > q_{o_{ext}}$) serían útiles en principio, pues cumplirían con el propósito para el que se diseñó cada separador.

Teniendo presente lo anterior, y con el fin de caracterizar de forma aproximada la mejor zona de funcionamiento de los separadores construidos, en las figuras 7, 8 y 9 se muestran los rendimientos alcanzados por dichos dispositivos teniendo en cuenta variables como la concentración de aceite C en los flujos ensayados ($\text{m}^3_{\text{aceite}}/\text{m}^3_{\text{total}}$, expresados en %), el número de Reynolds (Re) y la pérdida de carga (h) sufrida entre sus extremos. De acuerdo con la Figura 7, los mejores rendimientos de separación alcanzados en este estudio se encuentran en una zona de trabajo en la que la concentración C es del orden o inferior al 2%, siendo menos

adecuados los resultados obtenidos con aquellos flujos en los que se superó claramente este porcentaje. No obstante, para valores de C inferiores al 2% existen también un buen número de casos en los que la separación no ha sido satisfactoria, por lo que es evidente que la posible influencia de otros factores (como Re o h) deba ser estudiada.

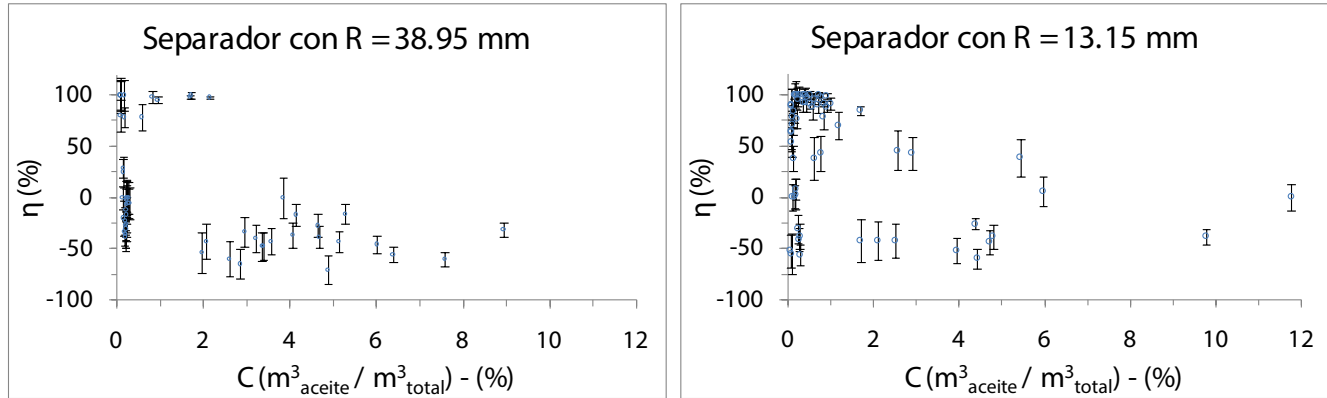


Figura 7 | Datos experimentales de η en función de C ($\text{m}^3 \text{aceite} / \text{m}^3 \text{total}$, expresados en %).

Es por ello que en la Figura 8 se muestran los valores de η en función del número de Reynolds. Para aportar claridad al gráfico, se representan con círculos aquellos resultados en los que la concentración de aceite en los flujos a separar fue menor o igual al 2%. Por su parte, se indican con pequeños cuadrados aquellos rendimientos en los que $C > 2\%$.

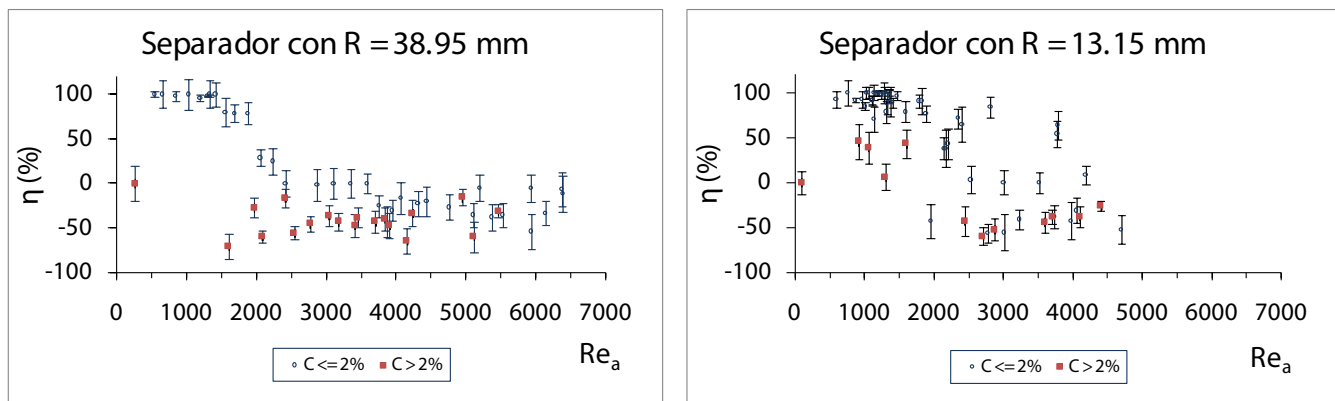


Figura 8 | Datos experimentales de η en función de Re_a considerando concentraciones (C) de aceite mayores y menores al 2%.

Puesto que los flujos tratados eran bifásicos, en el cálculo de Re se ha tomado como simplificación un valor aparente (Re_a) definido a partir de la fase mayoritaria. En este caso, dicho valor Re_a ha sido estimado considerando sólo la parte del caudal total (q_t) que estaba compuesta por agua ($q_a = q_t - q_o$) y cuya viscosidad cinemática a 25°C se estimó en $\nu \approx 0.884 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Singh y Heldman, 2009):

$$Re_a = \frac{4 \cdot q_a}{\pi d \nu} = \frac{4 \cdot (q_t - q_o)}{\pi d \nu}, \quad (3)$$

recordando que $d = 4.048 \text{ mm}$ es el diámetro interior del conducto helicoidal. En este punto, merece señalarse que con el separador con $R = 38.95 \text{ mm}$ se observa que para aproximadamente $Re_a > 2000$ no es posible encontrar puntos con buena separación, independientemente del valor de C . Para valores inferiores, y con bajas concentraciones de C , es posible tener puntos con muy buena separación (del orden del 100%) en el rango aproximado de $Re_a = 500 - 1500$. A partir de $Re_a > 1500$, los valores comienzan a caer hasta ser completamente desfavorables para $Re_a > 2000$.

Para el separador con $R=13.15$ mm se pueden encontrar resultados similares, dado que para $Re_a \approx 500 - 2000$ es común encontrar buenos rendimientos de separación cuando $C \leq 2\%$ (en muchos casos mayores al 90%). Para $Re_a > 2000$ se pueden alcanzar rendimientos de separación aceptables en algunos casos si $C \leq 2\%$, pero en general son desfavorables si la concentración de aceite es mayor al 2%.

En conjunto, y teniendo en cuenta lo comentado en relación con η , Re_a y C en los dos separadores ensayados, podría destacarse que los mejores rendimientos obtenidos se dan con valores de Re_a pequeños y con concentraciones de trabajo reducidas, del orden o inferiores a $0.02 \text{ m}^3_{\text{aceite}}/\text{m}^3_{\text{total}}$. En otros trabajos (Zhao et al., 2009; 2012; Niu et al., 2010), en los que se emplean separadores helicoidales con un diseño alternativo, las separaciones más eficientes (con $E \approx 1 - qo_{\text{ext}} / qo \approx 91\%$) se alcanzaron con valores de $C \leq 0.4\%$, radio de hélice $R=500$ mm, diámetro de tubería $d=25.4$ mm y $Re_a \approx 8600$, lo que sugiere que son posibles otras soluciones pero sólo válidas para valores de C muy pequeños.

En lo que se refiere a la energía necesaria para alcanzar los rendimientos comentados, en la Figura 9 se representan los valores de η en función de la pérdida de carga h que se produce a lo largo de cada separador. Nótese que dicha variable equivale en este caso, si se consideran similares las alturas cinéticas de entrada y salida del flujo en el separador, a:

$$h \approx H_i + \Delta z, \quad (4)$$

siendo H_i la altura de presión medida en cada ensayo a la entrada del separador, véase (11) en la Figura 4, y Δz es la diferencia de cota existente entre los puntos de entrada y salida del mismo ($\Delta z=0.635$ m para el separador con $R=38.95$ mm, y $\Delta z=0.73$ m en el caso ligado a $R=13.15$ mm). De nuevo, se usan símbolos diferentes –círculos y cuadrados– para representar los valores de η según sea el valor de C empleado (inferior o superior al 2%).

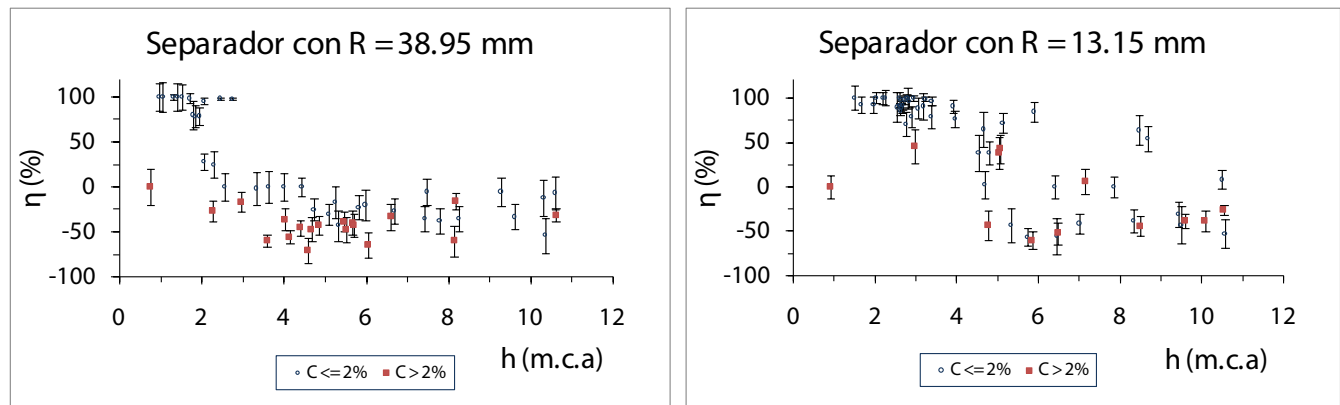


Figura 9 | Datos de η en función de la pérdida de carga h (m.c.a) considerando concentraciones (C) de aceite mayores y menores al 2%.

Si en la Figura 9 se observan primero los resultados ligados al dispositivo con $R=38.95$ mm, se puede destacar que la zona de altos rendimientos (del 100% prácticamente) está por debajo de unos 3 m.c.a., y que para $h > 3$ m.c.a es difícil encontrar puntos con rendimientos positivos. Cuando $C > 2\%$ se puede ver, en general, que para este dispositivo los rendimientos no son buenos (son negativos), logrando justamente lo contrario de lo que se pretende (por la parte exterior del separador sale más aceite que por la parte interior). En el separador con $R=13.15$ mm se observa que para valores de h del orden o inferiores a 4 m.c.a se obtienen rendimientos muy aceptables cuando $C \leq 2\%$. A partir de ese valor, los rendimientos positivos tienden a empeorar y es frecuente incluso la obtención de rendimientos negativos, independientemente de la concentración, lo que hace no deseable esa zona de funcionamiento. En conjunto, los dos separadores ensayados muestran unos requerimientos energéticos muy bajos a la hora de tratar eficazmente suspensiones como las analizadas en estos experimentos (véase a este respecto, más adelante, la Tabla 1) hecho que supone un aspecto a no despreciar ante futuros diseños basados en este tipo de tecnología.

Considerando también la pérdida de carga h , en la Figura 10 se representan los valores de caudal (q) a la entrada de cada separador, para el caso del agua (qa) y del aceite (qo), a concentraciones $C \leq 2\%$ y $C > 2\%$ (obviamente, $qa + qo = q_t$). A la

vista de la figura, es resaltable en ambos separadores que los valores de qa no difieren demasiado a diferentes concentraciones, aunque, lógicamente, para valores de $C > 2\%$ los caudales de agua son algo menores que para $C \leq 2\%$ (dado que hay más aceite ocupando la sección de la tubería). Por su parte, los caudales de aceite son mucho más pequeños que los de agua (del orden de 10 – 1000 veces), probablemente siendo éste el motivo que explique por qué qa no se ve tan afectado por C y por qué es posible (dentro de un orden) inyectar diferentes concentraciones de aceite para valores similares de h . De acuerdo con estos resultados, se podría aceptar, en general, que son requeridos mayores niveles de concentración de aceite en las corrientes estudiadas para producir aumentos significativos en los niveles de energía requeridos. Asimismo, se observa una tendencia ascendente tanto de qa como de qo al aumentar el valor de h (aunque en el caso de qo se observa mayor variabilidad por la forma en la que se decidió inyectar el aceite dentro de la zona de mezcla). En ambos casos, la tendencia indicada podría ser ajustada (como aproximación grosera) a una función potencial con exponente característico cercano a 1. Esto sustentaría, en general, el carácter laminar de la corriente dado que $Re_a < Re_{crit}$ en todos los ensayos (puede comprobarse para ambos separadores a partir de las ecuaciones 1 y 3). En conjunto, los caudales tratados en todos los experimentos no sobrepasaron los 20 cm³/s. En la mejor zona de trabajo ($C \leq 2\%$ y $h < 3$ m.c.a. para el dispositivo con $R=38.95$ mm; $C \leq 2\%$ y $h < 4$ m.c.a para el caso con $R=13.15$ mm) los caudales de aceite y agua fueron, respectivamente, del orden o inferiores a 0.1 cm³/s y 5 cm³/s.

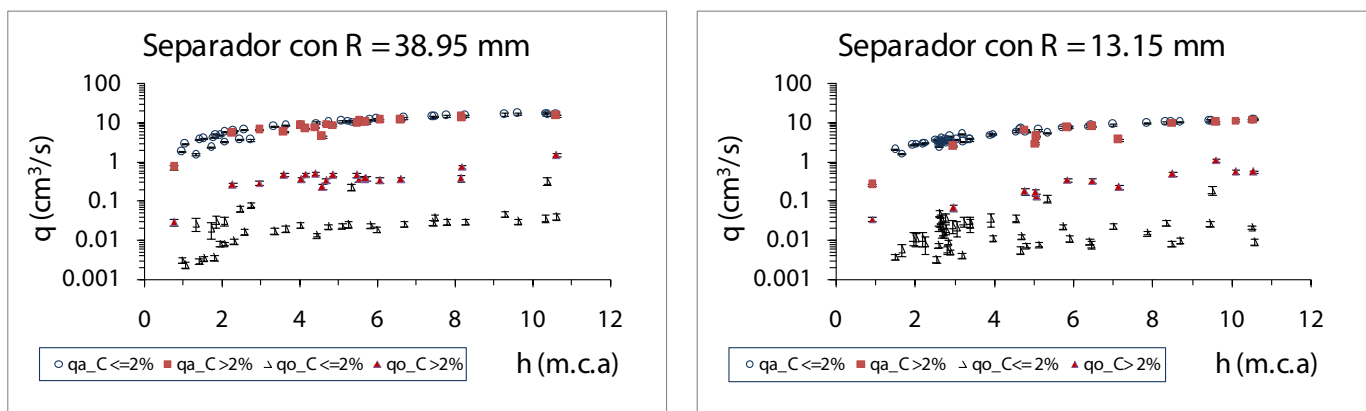


Figura 10 | Caudales de aceite (qo) y agua (qa), en función de las pérdidas de carga h , para valores de C mayores y menores al 2%.

Continuando con el análisis de la información recabada de los experimentos realizados, pero aplicando un enfoque alternativo, en los apartados que siguen se mostrarán otros resultados con el fin de indagar sobre las posibles causas que han podido influir en la obtención de los rendimientos de separación antes comentados. En esta ocasión, junto con los valores de Re_a o el rendimiento η , se tendrá en cuenta la proporción existente entre el caudal obtenido de la parte exterior de cada separador (q_{ext}) y el de la parte interior del mismo (q_{int}) –véase como referencia la Figura 3.

RANGO DE OPERACIÓN CON UN RATIO q_{ext} / q_{int} UNIFORME

Procediendo por partes, en la Figura 11 se muestra la relación experimental entre el ratio q_{ext} / q_{int} y el número de Reynolds Re_a para ambos tipos de separadores. Puede verse que dicho ratio tiende a estabilizarse al aumentar Re_a , independientemente del valor de concentración de aceite C existente en cada ensayo. Para el separador con $R=38.95$ mm dicha relación se aproxima (cuando $Re_a > 2000$) a un valor cercano a 1.5, y para el dispositivo con $R=13.15$ mm el ratio q_{ext} / q_{int} tiende aproximadamente a 2 para valores de $Re_a > 2000$. Resulta, pues, que el separador con menor radio de hélice (R) exhibe una relación q_{ext} / q_{int} algo mayor que la del dispositivo con $R=38.95$ mm. Esta situación es coherente si se acepta la premisa de que cuanto más intensa sea la fuerza centrífuga existente, mayor será el nivel de distorsión –hacia el lado exterior de la hélice– sufrido por el perfil de velocidades de los flujos circulantes, y mayor será por tanto el valor del ratio q_{ext} / q_{int} . Puesto que de forma global se puede asumir que la fuerza centrífuga F_c es proporcional a U_m^2 / R (Zhang et al., 2006; Zhao et al., 2009), siendo U_m la velocidad axial media del flujo (que es

tangencial a la curvatura de la hélice), es esperable que en el separador con menor radio R se pongan en juego mayores valores de F_c , y de ahí los resultados obtenidos.

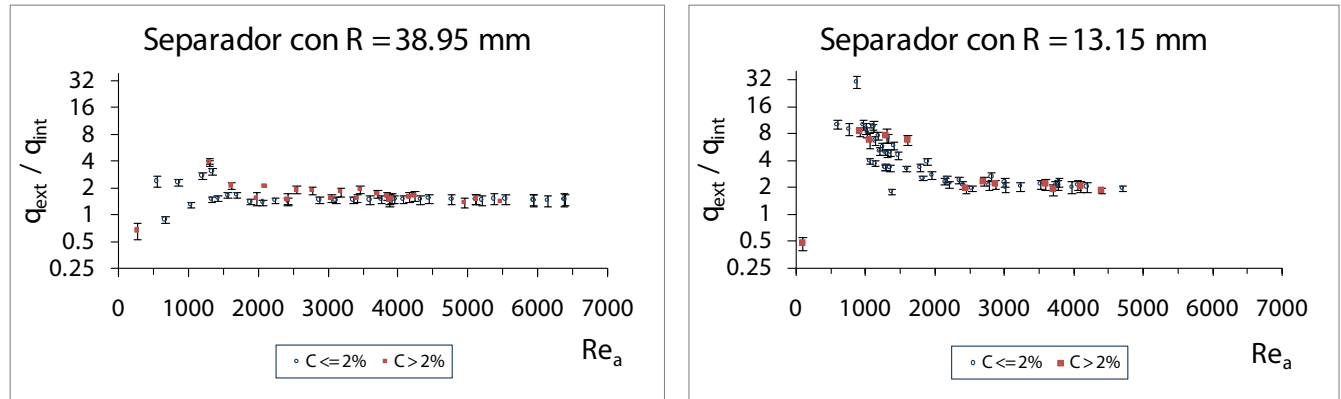


Figura 11 | Valor del ratio q_{ext}/q_{int} en función de Re_a considerando series de concentraciones C mayores y menores al 2%.

Por otra parte, el carácter estable de la relación q_{ext}/q_{int} mostrado en ambos separadores (para valores de $Re_a > 2000$) viene a confirmar, en general, que la distorsión en el perfil de velocidades, antes citada, debe tener una forma casi fija en el rango de Re_a señalado. Este comportamiento podría ser similar al de un flujo monofásico helicoidal desarrollado en una tubería de sección circular –véase como ejemplo la Figura 2–, lo que lleva a suponer que, bajo las condiciones descritas, los flujos ensayados podrían tener en muchos casos características propias de una dispersión (o emulsión) que habría sido originada por la mezcla de fases, especialmente para valores de $C > 2\%$.

Para comprobar la afirmación anterior, en la Figura 12 se presenta el ratio q_{ext}/q_{int} en función del rendimiento η para valores de $Re_a > 2000$. En este caso, se observa en ambos dispositivos que los valores de η son negativos para concentraciones de aceite $C > 2\%$, lo que implica que por el lado exterior del separador sale más aceite que por el lado interior –véase la Ecuación 2–. Dado que el aceite de oliva es menos denso que el agua, si ambos fluidos discurrieran sin mezcla por el interior de la tubería debería ocurrir que por el lado interior del conducto debería salir más aceite que por el lado exterior –debido a la acción de la fuerza centrífuga–. Puesto que ocurre todo lo contrario en este conjunto de ensayos, parece razonable suponer que cuando la concentración de aceite C es lo suficientemente grande (mayor del 2%), y la agitación en el flujo alcanza cierto grado de intensidad ($Re_a > 2000$), la mezcla de agua y aceite parece inevitable formando un conjunto homogéneo (propio de una emulsión o dispersión bien mezclada) que se comportaría como un flujo monofásico –véase como muestra la Figura 13.

Flujos como el anteriormente descrito han sido caracterizados por otros autores en tuberías horizontales (Trallero et al., 1997; Elseth y Melaaen, 2001) bajo *velocidades superficiales* de agua (U_{sw}) del orden o superiores a 1.6 m/s y concentraciones de aceite bajas o moderadas (del orden o inferiores al 20%). En este estudio, con valores de $U_{sw} > 0.45 - 0.5$ m/s y $C > 2\%$ es coherente la presencia de dispersiones bien mezcladas probablemente causadas por la acción de vórtices de Dean –véase la Figura 2–. En este punto, debe notarse que como concepto práctico, habitualmente usado en el estudio de corrientes multifásicas, se define la velocidad superficial (U_{sF}) de un fluido F , que forma parte de una corriente dada, como (Trallero et al., 1997):

$$U_{sF} = \frac{q_F}{\pi d^2/4}, \quad (5)$$

en donde q_F es el caudal asociado únicamente al fluido F y d es el diámetro interior del conducto. De acuerdo con la definición expuesta, se puede verificar en este estudio que para un flujo de agua ($U_{sF} = U_{sw}$) en el que $U_{sw} > 0.45 - 0.5$ m/s va a ocurrir que $Re_a > 2000$ (de acuerdo con la Ecuación 3 y teniendo en cuenta que $U_{sw} = Re_a \times \nu/d$).

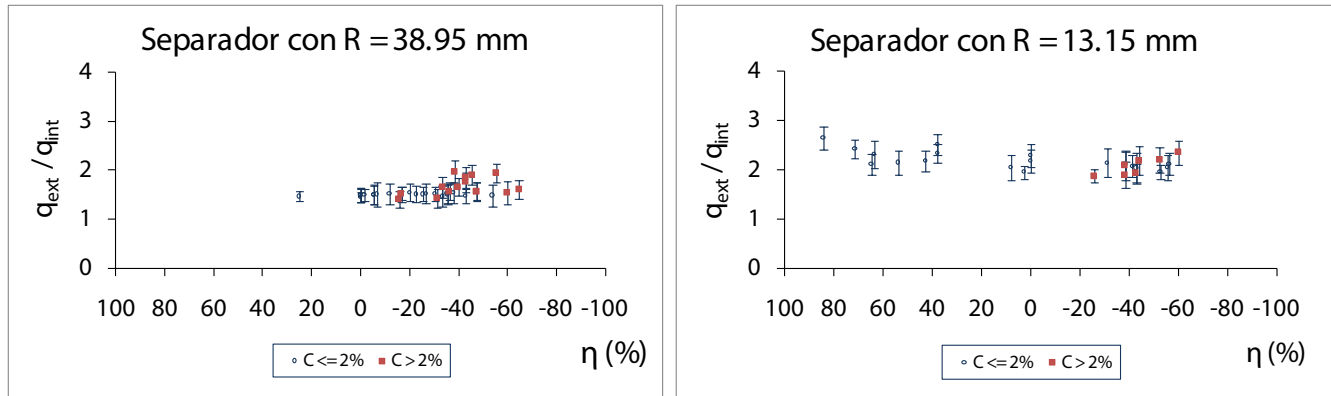


Figura 12 | Valores del ratio q_{ext}/q_{int} en función del rendimiento η para valores de $Re_a > 2000$.

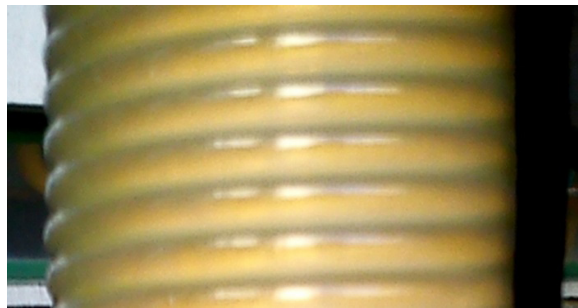


Figura 13 | Ejemplo de flujo tratado por el separador con $R = 38.95$ mm para $Re_a > 2000$ y $C > 2\%$.

Si se aplica un análisis similar a los resultados relacionados con los valores de $Re_a > 2000$, pero considerando esta vez concentraciones de aceite $C \leq 2\%$ (véanse de nuevo las figuras 11 y 12), se desprende que entre los separadores ensayados existen diferencias que requieren una interpretación adicional. Aunque en ambos dispositivos la relación q_{ext}/q_{int} sigue siendo estable, en el caso del separador con $R = 38.95$ mm se observa que $\eta \leq 0$ en la práctica totalidad de los experimentos (ver Figura 12), pero para el separador con $R = 13.15$ mm se comprueba que el rendimiento de separación puede ser mayor o menor que cero de forma aparentemente errática. En conjunto, parece razonable considerar que las dispersiones que pueden producirse entre aceite y agua en el separador con $R = 13.15$ mm son más heterogéneas y variables dentro de cada sección de paso. Por el contrario, en el dispositivo con $R = 38.95$ mm podría haber una mayor homogeneidad, por lo que los rendimientos de separación (negativos en la mayoría de casos) se asemejan a los ya registrados en los ensayos con $C > 2\%$ y $Re_a > 2000$.

RANGO DE OPERACIÓN CON UN RATIO q_{ext}/q_{int} VARIABLE

Con un comportamiento claramente diferente al mostrado por los ensayos anteriores, para valores de $Re_a < 2000$ se podía observar en la Figura 11 que la relación q_{ext}/q_{int} no se mantenía estable, pero precisamente en ese rango de Re_a puede comprobarse que se obtienen los mejores rendimientos en ambos separadores –véanse como muestra las figuras 8 ó 14.

Yendo paso a paso, es notable que en el dispositivo con $R = 38.95$ mm se observa que la relación q_{ext}/q_{int} puede llegar a valores del orden de 4, y que en el separador con $R = 13.15$ mm el ratio q_{ext}/q_{int} puede alcanzar fácilmente valores de 8 e incluso más –véanse las figuras 5 y 14–. Esto supone, por ejemplo, que por el lado exterior del separador con menor radio R se puede extraer 8 veces más caudal que por el lado interior, a pesar de que las áreas de las secciones de separación son iguales. De nuevo,

si se acepta la premisa de que la fuerza centrífuga F_c es proporcional a U_m^2 / R , es esperable que en el separador con menor radio R exista una mayor relación q_{ext} / q_{int} (fruto de un campo centrífugo más intenso).

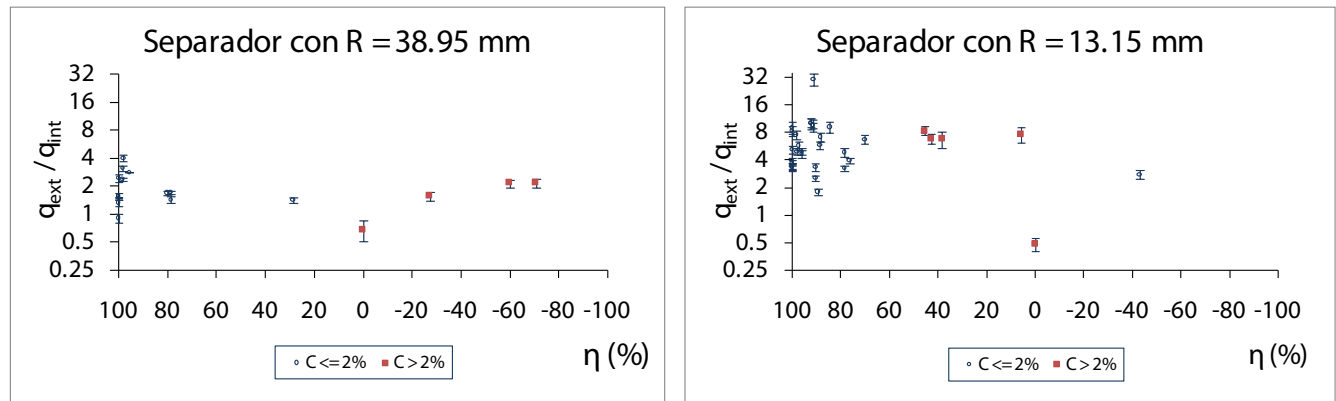


Figura 14 | Valores del ratio q_{ext} / q_{int} en función del rendimiento η para valores de $Re_a < 2000$

A diferencia de lo comentado en el apartado dedicado al ratio q_{ext} / q_{int} uniforme, el carácter –en este caso variable– de la relación q_{ext} / q_{int} hace pensar que el perfil de velocidades del flujo puede tener una forma no fija (dependiente de Re_a) y que el flujo circulante ya no se asimila a una corriente monofásica –véase como muestra la Figura 15–. En estas condiciones, y tomando como referencia los patrones de flujo establecidos por Trallero et al., (1997) o Elseth y Melaaen (2001), es razonable considerar que, dependiendo del valor de Re_a , el flujo aquí tratado podría ser del tipo Do/w & w (*dispersión de aceite en agua y agua*) o incluso ST & MI (*flujo estratificado con mezcla en la interfase*). Teniendo en cuenta lo anterior, si la fracción de espacio (volumen) que ocupa el aceite dentro de una sección y tramo dado –también conocida como ‘*holdup*’, Elseth y Melaaen (2001); Montoya et al. (2009)– se limita a la zona interior del conducto (ver Figura 1) los rendimientos de separación serán normalmente positivos y muy altos. Por el contrario, si el aceite va más allá, y se sitúa en la parte exterior de la tubería, los rendimientos tenderán a ser peores e incluso por debajo de cero.

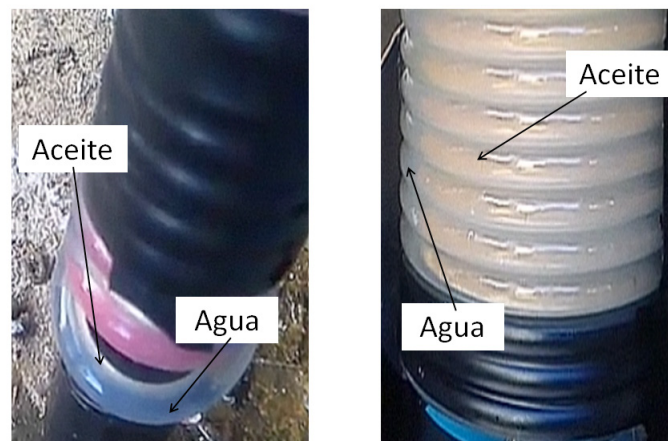


Figura 15 | Ejemplos de flujos bifásicos ligados a altos rendimientos de separación.

Para los casos en los que $Re_a < 2000$ y $C \leq 2\%$, se observa en general que los rendimientos obtenidos son elevados en ambos separadores –véase la Figura 14–, lo que indicaría que la mayor parte del aceite discurriría por la parte interior del conducto. Comparativamente, el dispositivo con $R = 38.95$ mm parece mostrar un comportamiento ligeramente mejor al que presenta el que tiene $R = 13.15$ mm, dado que la mayoría de los ensayos alcanzan un valor $\eta > 95\%$ (en el primer caso) frente a los rendimientos de

separación proporcionados por el dispositivo con menor radio (normalmente mayores al 90%). Los resultados en este segundo caso son consistentes con la premisa de que una pequeña fracción del volumen de aceite (*'holdup'*) pudiera estar localizada en la parte exterior del separador debido a una ligera deformación producida en la tubería –por el molde de enrollado usado–. En este sentido, puede señalarse que el material del tubo utilizado para construir ambos separadores era PE flexible. En la práctica, se observaba que el conducto con $R=13.15$ mm parecía presentar una deformación mayor, cercana a adoptar una forma elíptica, debido a que el tubo tenía que adaptarse a una geometría más restrictiva (con menor radio de giro). Esta circunstancia debería ser tenida en cuenta en diseños futuros, dado que un leve *'aplastamiento'* de la tubería durante la construcción del separador podría contrarrestar las posibles ganancias aportadas por un radio de giro más pequeño (con un campo centrífugo asociado más intenso).

Por otra parte, para los casos en los que $Re_a < 2000$ y $C > 2\%$, se observa que los rendimientos de separación empeoran en ambos separadores (ver Figura 14), especialmente en el de $R=38.95$ mm (con un campo centrífugo más débil), lo que probablemente indica que el volumen de aceite en estos ensayos tiende a ser más abundante en el lado exterior del tubo. En este contexto, y como caso particular que merece una atención aparte, se puede destacar el comportamiento detectado en el flujo cuando Re_a es muy pequeño ($Re_a < 500$) y la concentración de aceite $C > 2\%$ –véanse también las figuras 8 y 11–. Bajo estas condiciones ocurre excepcionalmente, en ambos separadores, que $q_{ext} / q_{int} < 1$ (sale más caudal por el lado interior que por el lado exterior) y que $\eta \approx 0\%$ (fluye igual cantidad de aceite por el lado interior y por el lado exterior).

Como posible explicación a estos resultados puede referirse la baja intensidad de la fuerza centrífuga bajo estas condiciones, así como la propia geometría del separador. A este respecto se puede indicar que cuando Re_a es muy pequeño es esperable que la fuerza centrífuga sea del orden o inferior a otras fuerzas como la gravedad o las ligadas a la tensión superficial. En esta situación el flujo de aceite, menos denso que el de agua, tendería a discurrir por la parte superior del conducto o incluso adherido a las paredes. En esta situación, el rendimiento de separación η podría ser del orden de 0 pues la distribución de aceite dentro de cada sección no dependería, de forma importante, de la distancia al centro de la hélice. Por otro lado, el hecho de que $q_{ext} / q_{int} < 1$ podría ser explicado por la forma en la que está diseñada la zona de separación –véase la Figura 3– en la que los flujos emitidos tienen que adaptarse a una superficie convergente (en la parte interior) y a una superficie divergente en la parte exterior. Para fluidos como el agua o el aceite (newtonianos), que normalmente experimentan una menor resistencia hidrodinámica cuando convergen que cuando divergen, es esperable que fluya más caudal por la parte interior del separador (que por la exterior) cuando la energía disponible es escasa (inferior a 1 m.c.a cuando $Re_a < 500$).

Relacionados con este último caso, pero empleando un diseño diferente (con $d=25$ mm y $R=150$ mm o $R=400$ mm), en otros estudios se ha observado (Zhang et al., 2006) que es posible obtener eficiencias de separación cercanas al 80% incluso con altas concentraciones de aceite, del orden del 50-60%. En estos casos se constata que, cuando la velocidad media del flujo es pequeña, la fuerza de la gravedad ejerce una gran influencia sobre la distribución del agua y del aceite dentro del conducto, permitiendo la existencia de rendimientos de separación aceptables cuando se practican pequeños orificios de descarga (en la parte inferior-exterior de determinadas secciones de paso situadas en el tramo final del separador) para evacuar el contenido de agua circulante.

Finalmente, y como complemento o resumen a todo lo ya expuesto, en la Tabla 1 se muestran algunos datos que pueden ser de interés para caracterizar y comparar el comportamiento de los dispositivos tratados en este estudio, junto con los de otras alternativas de separación empleadas con sistemas líquido-líquido (Niu et al., 2010; Zhao et al., 2012; Bejaoui et al., 2013). En este punto, conviene valorar que para el caso de la centrífuga de platos los datos proporcionados en la Tabla 1 proceden de conocidos fabricantes de los que no se indican marcas o modelos con el fin de evitar cualquier conflicto de intereses. Nótese igualmente que, en dicha tabla, P y t_r representan, respectivamente, la potencia y el tiempo de residencia requeridos, por un dispositivo dado, para llevar a cabo una separación bajo unas condiciones de rendimiento determinadas. El resto de variables son las mismas que han sido empleadas a lo largo de este estudio. Como aproximación, en este trabajo la potencia P ha sido estimada con los separadores helicoidales y gravitatorios (decantadores) como:

$$P \approx \rho \cdot g \cdot q_t \cdot h_r, \quad (6)$$

en donde ρ es la densidad del fluido (por lo general entre 900-1000 kg/m³), g es la aceleración gravitatoria, q_t es el caudal total procesado y h_r es la altura de presión requerida (las alturas cinéticas pueden ser despreciadas y se considera que $h_r \approx h$ en el caso

de los separadores helicoidales). El tiempo de residencia t_r ha sido estimado como sigue (en donde V_s es el volumen de fluido que llena el separador en un instante dado):

$$t_r = \frac{V_s}{q_t} \quad (7)$$

Tabla 1 | Datos de interés de diferentes tipos de separadores aplicados a flujos bifásicos de agua y aceite.

Separador	Helicoidal 13.15 mm	Helicoidal 38.95 mm	Helicoidal 500 mm	Centrífuga de platos	Decantador gravitatorio
P (W)	0.03 – 0.19	0.02 – 0.1	3.75	5000 – 15000	< 3.7
q_t (cm ³ /s)	1.7 – 5.1	1.6 – 4.0	153	400 – 1500	< 75
P / q_t (J/cm ³)	0.004 – 0.011	0.003 – 0.007	0.025	10 – 13	< 0.05
h_r (m.c.a)	1.5 – 4	1 – 3	2.5	10 – 40	< 5
t_r (s)	25 – 75	30 – 80	105	2 – 5	> 16000
C (%)	< 2	< 2	0.4	No limitada	No limitada
η (%)	> 90	> 95	< 91	> 96	> 90

Puesto que los separadores helicoidales de este trabajo han sido diseñados a pequeña escala, las comparaciones con otras tecnologías deben ser tomadas como una primera aproximación. A pesar de esto, es notable que dichos separadores presentan los requerimientos energéticos más bajos y sus tiempos de residencia son pequeños para alcanzar rendimientos de separación destacables. La centrífuga de platos se muestra como el dispositivo con t_r más bajo para rendimientos de separación elevados, pero energéticamente es la más costosa. Los decantadores gravitatorios usualmente necesitan tiempos de residencia largos para poder llegar a rendimientos de separación elevados (lo que puede producir defectos en los aceites de oliva a comercializar), sin embargo, sus requerimientos energéticos son pequeños. La propuesta helicoidal con $R=500$ mm (Niu et al., 2010; Zhao et al., 2012) muestra resultados comparables a los dados por los separadores helicoidales aquí presentados, pero las concentraciones de aceite tratadas y los rendimientos de separación alcanzados son algo más pequeños que los logrados en este estudio. En conjunto, es razonable considerar que los resultados ligados a los dispositivos propuestos en este trabajo abren una vía para abordar el diseño de este tipo de dispositivos desde otros puntos de vista, lo que ofrece nuevas alternativas a considerar en la separación de sistemas líquido-líquido.

CONCLUSIONES

El uso de separadores helicoidales, para el tratamiento de dispersiones de agua y aceite en el sector del aceite de oliva, es un campo de estudio abierto que merece el desarrollo de trabajos futuros. La simplicidad de diseño de estos dispositivos, y sus bajos requerimientos energéticos, los sitúan como una posible alternativa a considerar en dicho sector.

En sistemas agua-aceite, con el agua como fase mayoritaria y bajo condiciones óptimas de operación ($Re_a < 2000$ y concentración de aceite $C \leq 2\%$), es posible obtener rendimientos de separación cercanos al 100% empleando dispositivos con radio de hélice reducido ($R=13.15$ mm y $R=38.95$ mm), pequeño diámetro de tubo ($d \approx 4$ mm) y bajos requerimientos energéticos ($h < 4$ m.c.a). Asimismo, el rango de operación en el que estos separadores funcionan de forma adecuada está caracterizado por un reparto variable del flujo entre la parte interior y exterior del conducto ($q_{ext} / q_{int} \neq \text{constante}$) y la presencia de flujos bifásicos del tipo Do/w & w (*dispersión de aceite en agua y agua*) o ST & MI (*flujo estratificado con mezcla en la interfase*).

Teniendo en cuenta la metodología de ensayo seguida, basada en el uso de modelos a pequeña escala, es evidente que las condiciones de funcionamiento antes indicadas sólo deben ser tomadas como una primera aproximación para el desarrollo de diseños futuros. No obstante, el montaje en paralelo de estos dispositivos podría hacer posible el tratamiento de dispersiones con un mayor caudal. Asimismo, la mejora de los rendimientos de separación, en cada caso, podría ser lograda a través del acoplamiento en serie de este tipo de separadores. Por último, la energía requerida (h) en diseños futuros va a depender fuertemente, entre otras variables, de la viscosidad de la sustancia mayoritaria. Por este motivo, si en lugar de usar agua se empleara aceite como fase principal (problema inverso al aquí tratado pero muy común en almazaras cuando se trata de abordar tareas de clarificación del

aceite), es esperable que las secciones de paso de los conductos a emplear (d) debieran ser mayores que la aquí utilizada para poder mantener los valores de h a un nivel bajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer a la Universidad de Córdoba, y a su Departamento de Bromatología y Tecnología de los Alimentos, el uso de sus instalaciones y los fondos aportados.

REFERENCIAS

- Bejaoui, M.A., Gila, A., Allouche, Y., Aguilera, M.P., Jiménez, A., Beltrán, G. 2013. Eficiencia de la clarificación del aceite de oliva virgen mediante decantación y centrifugación. *Actas del XVI Simposio Científico-Técnico del Aceite de Oliva - Expoliva 2013*. Jaén (España), IND, 36, 1-6.
- Cerretani, L., Gómez, A.M., Bendini, A. 2010. *Aspectos tecnológicos de la producción del aceite de oliva. El Aceite de Oliva Virgen: Tesoro de Andalucía*. Servicio de Publicaciones de la Fundación Unicaja. Málaga (España). Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/educacion/vscripts/wbi/w/rec/4423.pdf>. [Último acceso: enero 2019].
- Ciofalo, M., Arini, A., Di Liberto, M. 2015. On the influence of gravitational and centrifugal buoyancy on laminar flow and heat transfer in curved pipes and coils. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.074>
- Di Liberto, M., Di Piazza, I. y Ciofalo, M. 2013. Turbulence structure and budgets in curved pipes. *Computers & Fluids*, 88, 452-472. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.09.028>
- Elseth, G., Melaaen, M.C. (Dir). 2001. *An Experimental Study of Oil / Water Flow in Horizontal Pipes*. PhD Thesis. University College Kjølne Ring. Norway. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11250/231213>. [Último acceso: enero 2019].
- Gila, A., Beltrán, G., Bejaoui, M. A., Sánchez, S., Nopens, I., Jiménez, A. 2016. Modeling the settling behavior in virgin olive oil from a horizontal screw solid bowl. *Journal of Food Engineering*, 168, 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.07.016>
- Hermida, J.R. 2000. *Fundamentos de Ingeniería de Procesos Agroalimentarios*. Mundi-Prensa. Madrid.
- Hermoso, M., González, J., Uceda, M., García-Ortiz, A., Morales, J., Frías, L., Fernández A. 1996. *Elaboración de aceite de calidad. Obtención por el sistema de dos fases*. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Disponible en: http://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337166142Elaboracixn_de_aceite.pdf. [Último acceso: enero 2019].
- Kumar, V., Nigam, K.D.P. 2005. Numerical simulation of steady flow fields in coiled flow inverter. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 4811-4828. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.05.037>
- Molina, A., Vallesquino-Laguna, P. (Dir.). 2015. *Estudio aplicado sobre decantación centrífuga de baja energía*. Trabajo Final de Grado. ETSIAM. Universidad de Córdoba.
- Montoya, G., García, K., Valecillos, M. T., García, J., and Romero, C. 2009. Determinación de altura de fase y hold up para flujo bifásico líquido-líquido en tuberías horizontales por medio de procesamiento de imágenes. *Memorias del VIII Congreso Anual de Ingeniería ASME USB*. Caracas - Venezuela, AUSB2009 - 010101, 1-10.
- Niu, D., Zhao, L., Hua, Z. 2010. Performance Study of De-Oiling Spiral Tube Separators. *Proceedings 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE)*. Chengdu, IAN-11495871, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2010.5517595>
- Sinng, R.P., Heldman, D.R. 2009. *Introduction to Food Engineering*. Elsevier - Academic Press. London. UK.

- Srinivasan, S., Nadapurkar, S., Holland, F.A. 1970. Friction factors for coils. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 48, T156-T161.
- Trallero, J.L., Sarica, C., Brill, J.P. 1997. A Study of Oil / Water Flow Patterns in Horizontal Pipes. *SPE Production & Facilities*, August 1997, 165-172. <https://doi.org/10.2118/36609-PA>
- Uceda, M., Jiménez, A., Beltrán, G. 2006. Olive oil extraction and quality. Trends in olive oil production. *Grasas y Aceites*, 57(1), 25-31. <https://doi.org/10.3989/gya.2006.v57.i1.19>
- Vashisth, S., Nigam, K. D. P. 2009. Prediction of flow profiles and interfacial phenomena for two-phase flow in coiled tubes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(1), 452-463. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.06.006>
- Vidnes, J., Engvik, S.A., Sangesland, S. (Dir.), Gjersvik, T.B. (Dir). 2015. *Analysis of Compact Separation Systems and Experimental Study of Centrifugal Separation in Helically Coiled Pipes*. Master Thesis. Department of Production and Quality Engineering. NTNU - Trondheim. Disponible en <http://hdl.handle.net/11250/2351197>. [Último acceso: enero 2019].
- Zhang, J., Guo, J., Gong, D.T., Wang, L.Y., Tang, C., Zheng, Z.C. 2006. An investigation on oil/water separation mechanism inside helical pipes. Proceedings of the Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 18(3), 343-347. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(06\)60076-0](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(06)60076-0)
- Zhao, L., Xu, L., Hua, Z., Ma, Z., Cao, H. 2009. Numerical Simulation and Experimental Study on Helical Pipe Oil-Water Separator For Deoiling. *Proceedings 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE)*. Beijing, IAN-10778074, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2009.5163130>
- Zhao, L., Xu, B., Jiang, M., Li, F., Hua, Z. 2012. Flow-field distribution and parametric-optimisation analysis of spiral-tube separators. *Chemical Engineering Research and Design*, 90, 1011-1018. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.11.014>
- Zhu, H., Li, Z., Yang, X., Zhu, G., Tu, J., Jiang, S. 2017. Flow regime identification for upward two-phase flow in helically coiled tubes. *Chemical Engineering Journal*, 308(15), 606-618. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.100>