

Aplicación de conceptos clásicos de la Física en la práctica ingenieril. La ley de Stokes como herramienta conceptual en el análisis de procesos de deshidratación del petróleo

José G. Delgado-Linares,^{1*} Carlos Gutiérrez,¹ Franklin Salazar,¹ Mairis Guevara,¹ Ronald Mercado¹ y Juan Carlos Pereira²

ABSTRACT (Application of classical concepts of physics in engineering practice. Stokes' Law as conceptual tool in analysis of Petroleum Dehydration Processes)

Several physical processes have been used in breaking of water-in-crude oil emulsions (petroleum dehydration); heating, water and diluents addition and electrical field application are the most common ones. In all cases, the effect of each operational parameter on the main variables that determine sedimentation rate of water droplets in emulsions can be predicted by Stokes' Law, which constitutes a simple mathematical expression very useful for chemical engineers in design and operation of separation processes of emulsified systems.

KEYWORDS: Stokes' Law, sedimentation, petroleum dehydration, emulsions

Introducción

El acelerado desarrollo de la tecnología en la industria de procesos crea la necesidad de profesionales de la ingeniería cada día más versátiles y capaces de hacer frente a los retos que les impone el medio en el cual se desenvuelven. En esencia, se requieren ingenieros formados bajo la premisa de la excelencia académica y profesional y, como bien lo expone Tavera (2000), poseedores de claridad y profundidad en los conocimientos, enfoque sistémico en la solución de los problemas y actitud interdisciplinaria.

Las universidades e institutos de educación superior tienen ante sí un reto ineludible en la configuración de planes de estudio acordes con las exigencias del mercado. La Ingeniería Química particularmente, constituye una disciplina tecnológica signada por la actualización y renovación continua. El proceso de enseñanza-aprendizaje involucrado en la formación de un ingeniero químico integral debe basarse en el desarrollo de las destrezas estudiantiles orientadas a solucionar problemas efectivamente; algunas de estas destrezas se basan en el análisis concienzudo del problema y sus posibles solu-

ciones y en el establecimiento de conexiones entre dicho problema y el conocimiento técnico/científico requerido para solucionarlo (Woods y col., 2000).

Queda establecida entonces, la importancia de concebir la Ingeniería Química como una disciplina que aplica las leyes y fundamentos de las ciencias puras (física, química y matemática) para resolver problemas asociados con situaciones reales (Anaya, 2001). Esto implica el plantear las diversas asignaturas que conforman el currículo de la Ingeniería Química como un sistema integrado donde los contenidos impartidos en cada asignatura se relacionen lógicamente entre sí y cuya aplicación práctica se haga evidente al estudiante; es mucho más fácil asimilar conceptos cuando se conoce su aplicación directa en el campo laboral.

Las asignaturas que comprenden el ciclo básico y profesional de la carrera de Ingeniería Química deben ser desarrolladas de tal manera que sean percibidas por el futuro ingeniero como un conjunto cuyas partes se complementan entre sí y cuyo objetivo principal es el de aportar herramientas para el análisis, diseño y optimización de productos y procesos de la industria química. Además, cada tema debe desarrollarse de forma progresiva, para que el estudiante pueda comprender los fenómenos involucrados en cada proceso, incrementado paso a paso la complejidad y el nivel de detalle hasta el punto de mejorar la capacidad de análisis del estudiante (Delgado y col., 2009).

El vertiginoso avance de la ciencia durante el siglo pasado generó igualmente una evolución continua en los planes de estudio de la Ingeniería Química, incorporando disciplinas que van desde la química industrial hasta la tecnología computacional. Armstrong (2006) propone la actualización de los

¹ Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela.

* **Correo electrónico:** josedel@ula.ve

² Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Correo electrónico: gutierrezc@ula.ve

Fecha de recepción: 1 agosto de 2011.

Fecha de aceptación: 5 mayo de 2012.

currículos organizándolos en tres principios básicos: transformaciones moleculares, análisis multi-escala y síntesis y análisis de sistemas; tales principios involucran el estudio de procesos a nivel atómico y molecular, su escalado a nivel microscópico y la integración a sistemas funcionales complejos. Por lo tanto, sin importar el campo de acción del ingeniero químico, el buen manejo de conceptos y principios de las ciencias básicas o puras constituyen un sólido basamento sobre el cual se erige una versátil formación.

De acuerdo con lo planteado, y con el objeto de ilustrar el empleo de una ley de la física como herramienta de análisis y diseño de procesos químicos, en el presente trabajo se relaciona la Ley de Stokes con el proceso de deshidratación del petróleo. Este caso de estudio se ha seleccionado tomando en cuenta la gran relevancia que tienen los hidrocarburos como fuente de energía para numerosos países de nuestro continente, a la vez que se establece un excelente puente entre conceptos propios de la mecánica de los fluidos y la química industrial.

Ley de Stokes

Todo evento físico es regido por leyes fenomenológicas que constituyen relaciones matemáticas entre las diversas variables que lo determinan. Ejemplos clásicos de esto son: la atracción gravitatoria entre los planetas, la interacción entre partículas cargadas eléctricamente, el flujo de líquidos en medios porosos y la velocidad de sedimentación de una partícula inmersa en un líquido, entre muchos otros.

En el caso de la sedimentación gravitatoria de una partícula en un líquido viscoso, las fuerzas actuantes (figura 1) se equilibran y su velocidad terminal alcanza un valor constante.

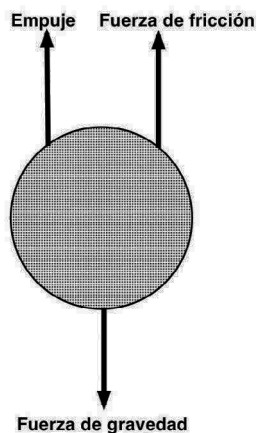
Matemáticamente el balance de fuerzas sobre la partícula mostrada en la figura 1 puede expresarse como:

$$\text{Peso de la Partícula} = \text{Empuje de Arquímedes} + \text{Fuerza de Fricción} \quad (1)$$

Lo que resulta en (De Nevers, 2005):

$$\frac{4}{3} \rho_p \pi R^3 g = \frac{4}{3} \rho_f \pi R^3 g + 6\pi R \eta V \quad (2)$$

Figura 1. Fuerzas que actúan sobre una partícula que sedimenta en un medio líquido bajo la acción de la gravedad.



Donde:

R = radio de la partícula

ρ_p = densidad de la partícula

ρ_f = densidad del fluido

η = viscosidad del fluido

g = fuerza de la gravedad

V = velocidad terminal de sedimentación

A partir de la ecuación 2 puede determinarse la velocidad de sedimentación de la partícula, cuya expresión resultante es:

$$V = \frac{2(\rho_p - \rho_f)gR^2}{9\eta} \quad (3)$$

Ésta es conocida como la **Ley de Stokes**, aplicable en sistemas donde las partículas son esferas no deformables ni mutuamente interactuantes moviéndose en el seno de un fluido viscoso en régimen laminar.

La expresión 3 sugiere que la velocidad de sedimentación es proporcional a la diferencia de densidades de los materiales respectivos (partícula, fluido), a la fuerza de gravedad y al cuadrado del radio de la partícula e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. A pesar de las restricciones impuestas por el modelo propuesto para su deducción, esta sencilla ley fenomenológica constituye una importante herramienta teórica en la formulación y diseño de procesos industriales; tal es el caso del dimensionamiento de separadores líquido-líquido en los que la velocidad de asentamiento y de ascenso de los líquidos pesado y liviano en una fase continua pueden ser calculados a partir de la ley de Stokes y luego ser comparada con los tiempos de residencia de los líquidos en el equipo con el propósito de garantizar la separación de ambas fases (Svreck and Monnery, 1994). Igualmente la Ley Stokes puede emplearse para estimar la velocidad de caída de una partícula en la floculación de sólidos suspendidos en procesos de sedimentación libre (Geankoplis, 1998) y en la separación de agua emulsionada en la deshidratación del petróleo, entre otros.

Procesamiento del Petróleo. Enfoque General

No es secreto para nadie la importancia del petróleo como fuente primaria de energía para el planeta; más del 30% de la energía consumida por la civilización actualmente proviene del petróleo, a lo que debe sumarse la enorme cantidad de productos no combustibles que indirectamente derivan de él.

Sin embargo, dada la complejidad en su composición, los procesos de transformación de petróleo son numerosos y requieren, sin duda, una inversión notable para convertir una mezcla de hidrocarburos de origen fósil en combustibles de consumo directo para transporte y calefacción.

En la figura 2 se sintetizan las principales etapas del procesamiento de petróleo, desde el yacimiento hasta el mercadeo de sus derivados. Cada proceso involucrado está integrado por un sinnúmero de operaciones y procesos unitarios cuya

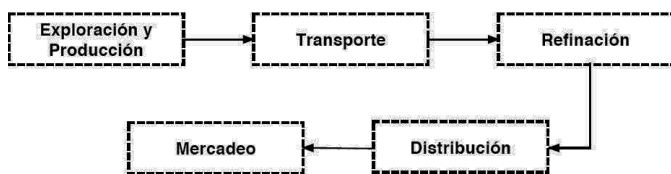


Figura 2. Etapas del procesamiento del petróleo.

complejidad está determinada por el tipo de crudo, es decir, mientras más pesado es éste, más complejo su procesamiento, lo que se traduce en refinerías de mayor tamaño con secciones de conversión molecular de alta severidad.

Caso de estudio. Deshidratación del petróleo

Dada la orientación de este trabajo, centraremos nuestra atención en una operación indispensable en la etapa de exploración y producción del crudo: la **deshidratación**. Como su nombre lo indica, el objetivo de este proceso es la separación del agua que se produce junto con el petróleo, y que se encuentra dispersada en su seno en forma de pequeñas gotas, formando una emulsión de agua en aceite (W/O, del inglés Water in Oil). El agua proviene naturalmente del yacimiento o de los procesos de estimulación de pozos y su proporción global puede variar entre 1% y más del 90% (pudiendo estar como agua libre o agua emulsionada); no obstante, en las emulsiones W/O esta relación oscila en el intervalo comprendido entre 1% y 60%, y el tamaño de gota tiene igualmente un rango variable (1 – 1000 μm) (Smith, 1992; Fingas y col., 1999; Fingas y Fieldhouse, 2003).

En el yacimiento y estaciones de producción se tienen todos los componentes necesarios para la generación de una emulsión: 1) dos fases líquidas inmiscibles (agua y petróleo); 2) energía, aportada por dispositivos de bombeo mecánico, restricciones, válvulas, codos y otros equipos de manipulación en superficie, y 3) agentes emulsificantes o surfactantes, bien sea que están presentes naturalmente en el crudo (resinas y asfaltenos) o son añadidos en las operaciones de recuperación mejorada de petróleo (Liu y col., 2006; Smith, 1992; Egloff y col., 1937).

La presencia de agua en el petróleo constituye un problema debido a que:

- Disminuye la eficiencia de los procesos de transferencia de calor.
- Incrementa la viscosidad del crudo, lo cual implica el uso de equipos de bombeo más potentes y de mayor consumo de energía.
- El agua emulsionada normalmente contiene sales que generan corrosión y depósitos en las tuberías de transporte y equipos de refinación.
- Genera daños en los internos de los equipos de separación física, tales como columnas de destilación, por vaporización violenta.
- Disminuye el precio del petróleo.

Figura 3. Etapas involucradas en la ruptura de una emulsión de agua en petróleo.

Por lo antes expuesto, la deshidratación del crudo es una necesidad ineludible para cualquier país productor y comercializador de petróleo. La separación del agua se traduce en la ruptura de la emulsión y formación de una nueva fase (acuosa) fácilmente separable por gravedad.

La ruptura de una emulsión comprende fundamentalmente tres etapas (Jeffreys y Davies, 1971):

- a) Acercamiento de las gotas de la fase dispersa entre sí, hasta llegar a flocular (distancia típica 0.5-1 μm). Como, $\rho_{\text{agua}} > \rho_{\text{crudo}}$ tiene lugar un proceso de sedimentación.
- b) Drenaje de la película inter-gota, hasta alcanzar un espesor del orden de 0.1 μm o menos.
- c) Ruptura de la película inter-gota y coalescencia.

En la figura 3 se muestra un esquema de estas etapas.

Normalmente el acercamiento de las gotas se lleva a cabo bajo la acción de la gravedad. Debido a esto, estamos ante un sistema de numerosas gotas desplazándose en un fluido viscoso; asumiendo la forma esférica de cada gota y despreciando su interacción mutua y deformación, el fenómeno descrito puede entonces modelarse, de manera muy general, por la Ley de Stokes (ecuación 3). Una dispersión de agua en crudo no es una mezcla de comportamiento fluido-dinámico sencillo, dado que el elevado número de gotas que pudiese estar presente complicaría aún más la predicción de las propiedades fisicoquímicas del sistema; no obstante, como ya fue mencionado, en las etapas previas a la ingeniería de detalle de un proceso e incluso a la hora de tomar una decisión en campo sobre la variación de tal o cual parámetro en una operación, el conocimiento de leyes físicas fundamentales y su relación con el proceso real, proporcionan al ingeniero una idea clara y

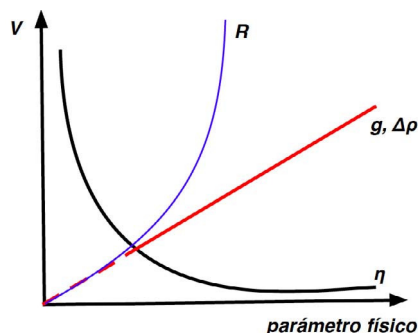


Figura 4. Efecto de los parámetros relacionados por la Ley de Stokes sobre la velocidad de sedimentación.

simplificada del comportamiento del sistema facilitando significativamente el establecimiento de criterios y la toma de decisiones.

En este orden de ideas, se establece la importancia de la Ley de Stokes como instrumento conceptual en la optimización de procesos orientados a la ruptura de emulsiones petroleras. Es válido preguntarse: ¿Qué procesos físicos favorecen la deshidratación?, ¿qué variables físicas deben manipularse para aumentar la eficiencia de la deshidratación? y ¿cómo?

Las respuestas a las interrogantes planteadas están intrínsecas, al menos en parte y cualitativamente, en la misma expresión de la Ley de Stokes. Variables como: densidades de las fases (agua y petróleo), viscosidad del crudo y radio de las gotas, son determinantes en la deshidratación del petróleo por métodos físicos. De esta manera y con base en la ecuación 3, a medida que aumenta la diferencia de densidad de los fluidos ($\Delta\rho$) y el radio de las gotas (ambos parámetros involucrados en la Ley de Stokes) se incrementa la velocidad de sedimentación y consecuentemente de deshidratación; el mismo efecto lo tiene una disminución de la viscosidad del crudo (denominador de la expresión 3). El efecto de aumentar el radio de las gotas de agua es mucho más significativo debido al exponente dos (2) del término. En la figura 4 se presenta de manera esquemática el efecto de las diferentes variables involucradas sobre la velocidad de sedimentación de las gotas de agua.

Nótese que las configuraciones de las curvas mostradas en la figura 4 son establecidas de acuerdo con un tratamiento meramente matemático de la ecuación 3; el estudio detallado de cada parámetro puede mostrar un comportamiento algo diferente; no obstante, y enfatizando en lo mencionado en párrafos anteriores, las tendencias son las mostradas.

Se plantea a continuación la pregunta de cómo modificar tales variables, con el objeto de favorecer el aumento de la velocidad de sedimentación de las gotas de agua en el crudo. Tanto la viscosidad como la diferencia de las densidades son afectadas por la temperatura. Un incremento de la temperatura induce una disminución de la viscosidad del petróleo y de las densidades de ambas fases (principalmente del crudo) (Bird y col., 2001). Dependiendo del tipo de crudo, incluso pueden emplearse diluentes (normalmente cortes de destila-

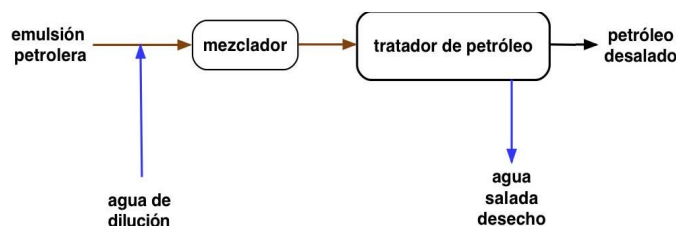


Figura 5. Desalación de petróleo por dilución con inyección de agua en etapa simple.

ción tipo nafta) para reducir la viscosidad cuando esta es muy elevada, como es el caso de los crudos pesados. Generalmente la mayoría de las instalaciones de superficie para procesamiento de petróleo incluyen separadores con calentamiento incorporado (Smith, 1992; Petroleum Extension Services, 1990; Van Dyke, 1997).

A pesar de que el valor de la fuerza de gravedad (g) no está sujeto a modificación como tal, su efecto puede magnificarse empleando centrifugación en ciertas situaciones prácticas (Smith, 1992).

El aumento del radio de las gotas ocurre paralelamente a su coalescencia; sin embargo, cuando las gotas son muy pequeñas o tienen elevado contenido salino, se añade agua fresca (figura 5) con el objeto de aumentar su tamaño y generar un gradiente de concentraciones que facilita la transferencia de masa y la dilución respecto a la sal (Smith, 1992).

Normalmente se aplican además campos eléctricos que polarizan las gotas y aumentan su atracción mutua, acelerando de esta manera la coalescencia (Nöik y col., 2006). El tratamiento físico de las emulsiones petroleras son combinaciones de los métodos mencionados, a tal punto que en un mismo equipo se aplican de manera simultánea logrando una sinergia positiva entre ellos, tal y como se muestra en la figura 6. En este equipo, denominado deshidratador electrostático horizontal, el crudo con agua emulsionada ingresa a la primera sección donde se pone en contacto indirecto con un tubo calentador; las gotas de agua comienzan a coalescer y separarse

Figura 6. Deshidratador electrostático horizontal de petróleo.

como una fase bien diferenciada. La emulsión remanente junto con el crudo rebosa a la segunda sección de tratador, donde atraviesa un conjunto de electrodos horizontales en forma de placas, cargados con alto voltaje.

La interfase agua-petróleo está dispuesta por debajo de los electrodos, evitando de este modo la inmersión de tales dispositivos en el agua y la generación de un eventual corto circuito. El tiempo de residencia del crudo es tal, que permite la separación gravitatoria de la fase acuosa formada a medida que circula por el aparato. Finalmente el agua separada y el crudo deshidratado fluyen en corrientes independientes a la siguiente etapa del tratamiento.

Retomando la secuencia de etapas de la ruptura de una emulsión, debe destacarse que sólo la velocidad de la primera etapa es regida por la Ley de Stokes, en tanto que la segunda depende de sustancias adsorbidas en la interfase, y la última es prácticamente instantánea. Por lo anterior, claramente se establece la importancia de esta sencilla relación matemática en la interpretación de la interacción de parámetros físicos conjugados en una de las etapas determinante del procesamiento del petróleo.

Finalmente, es necesario mencionar que en conjunto con la aplicación de calor y campo eléctrico, la adición de sustancias químicas (agentes deshidratantes) anfífilas favorecen la ruptura de la película asfáltica que rodean las gotas de agua y en consecuencia aceleran la ruptura de la emulsión W/O. La química deshidratante, como también se le llama en conjunto a estas sustancias, interactúa con los emulsificantes naturales presentes en el crudo (resinas y asfaltenos) modificando el ambiente fisicoquímico para alcanzar una reducción significativa de la estabilidad (persistencia en el tiempo) de la emulsión (Salager, 1990; Goldzal y Bourrel, 2000; Rondón y col., 2006).

Aplicación de la Ley de Stokes en el dimensionamiento y operación de deshidratadores de petróleo

La selección de las variables operatorias de un determinado proceso, así como las dimensiones de los equipos que lo integran, dependen de si la situación a considerar es el diseño del proceso o por el contrario la optimización de las condiciones operatorias de equipos ya instalados. En ambos casos los fundamentos fisicoquímicos y las correlaciones matemáticas que describen el fenómeno son las mismas, no obstante el algoritmo de cálculo y los criterios de operación son diferentes.

Las operaciones de deshidratación de petróleo no escapan de esta realidad; por lo tanto, la Ley de Stokes contribuye a fijar geometrías y dimensiones de tratadores de emulsiones (deshidratadores o separadores), si se está en la fase de diseño; por el contrario, si el objetivo es incrementar la eficiencia de equipos que se encuentran en funcionamiento, la Ley de Stokes permite discernir sobre las variables operatorias a modificar para alcanzar una rápida separación del agua y cuantificar el efecto que tal variación tiene sobre el desempeño global del proceso.

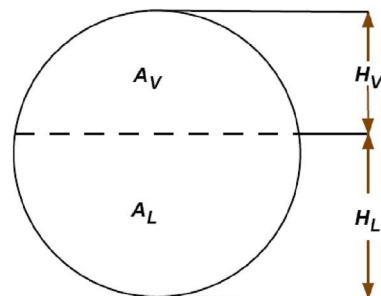


Figura 7. Corte transversal de un separador horizontal.

El diámetro del recipiente puede ser estimado a partir del caudal de fase líquida Q_L , fijando para ello los tiempos de retención y emergencia (Svreck y Monnery, 1993), y de una relación Longitud/Diámetro (L/D) que varía entre 1,5 y 6 en separadores horizontales.

A partir del diámetro se pueden establecer alturas que representaran longitudes ocupadas por el vapor (H_V) y el líquido (H_L). Visto en un corte transversal de un separador donde no se muestran los sistemas de calentamiento o aplicación de diferencia de potencial eléctrico (figura 7), estas alturas definen secciones de áreas A_V y A_L respectivamente. Conocida el área y el volumen de la fase líquida es posible, de acuerdo con la geometría del sistema, determinar aproximadamente la longitud L , del recipiente para albergar esa cantidad de líquido.

Asumiendo que la separación de líquido-vapor no es controlante puesto que este tipo de separadores es posterior a procesos de estabilización (separación del gas) y eliminación del agua libre, se puede calcular la velocidad de asentamiento de las gotas de fase pesada (agua) en la fase liviana (crudo), U_L , a partir de la Ley de Stokes.

$$U_L = \frac{2.061131 \times 10^5 D_p^2 (\rho_{\text{agua}} - \rho_{\text{crudo}})}{\eta_{\text{crudo}}} \quad (4)$$

donde el diámetro de partícula está en μm , las densidades en lb/pie^3 , la viscosidad en $\text{lb}/\text{pie} \cdot \text{s}$ y la velocidad terminal se expresa en pulg/min .

Con la velocidad de asentamiento y la altura correspondiente H_L se puede obtener el tiempo de asentamiento, T_L , de las gotas de fase pesada (agua) en la fase continua (crudo).

$$T_L = \frac{H_L}{U_L} \quad (5)$$

Tomando como base el diámetro y la longitud del recipiente previamente estimada, el tiempo de residencia se calcula a partir del caudal de fase líquida, como sigue:

$$\theta_L = \frac{L \cdot A_L}{Q_L} \quad (6)$$

El tiempo de residencia puede ser comparado con el de asentamiento, y debe cumplirse que $\theta_L > T_L$ para que en el equipo con las dimensiones definidas se pueda llevar a cabo la

separación. Si esta relación no se cumple evidentemente deben hacerse modificaciones de la geometría del recipiente, como por ejemplo aumentar su longitud.

Si se parte de la premisa de que se tiene un equipo de longitud y diámetro dado, es posible entonces verificar a partir de la Ley de Stokes, cómo ciertos parámetros físicos pueden ser modificados de manera de garantizar que el tiempo de asentamiento de las gotas de fase pesada en la fase continua sea menor al tiempo de residencia del líquido en el separador. Un efecto directo puede notarse al incrementar la temperatura a través del calentador ubicado en una sección del separador electrostático, en este caso la viscosidad del crudo (η_{crudo}) disminuye y el diámetro de partícula aumenta (D_p), tal como lo expresa la siguiente relación:

$$D_p = 500 \cdot (\eta_{\text{crudo}})^{-0.675} \quad (\text{Arnold y Stewart, 1986}) \quad (7)$$

Igualmente, la diferencia de densidad entre las fases deventrá mayor cuando la temperatura del sistema se incrementa; no obstante, este efecto no es tan marcado como el de la viscosidad y debe manejarse con cautela pues en ciertos casos un aumento exagerado en la temperatura produce una disminución en la diferencia de densidad (Smith, 1992).

De acuerdo con la Ley de Stokes, un aumento en la temperatura genera incremento en la velocidad de sedimentación de las gotas, y en consecuencia la eficiencia del proceso de deshidratación también aumenta.

Conclusión

La Ley de Stokes, concepto físico fundamental en la enseñanza básica de la Ingeniería Química, se puede aplicar en la modificación favorable de variables operacionales y dimensionamiento de equipos en diversos procesos de producción y tratamiento de petróleo. Su fácil comprensión aporta a los profesionales de la ingeniería química una excelente herramienta conceptual-práctica en la búsqueda de alternativas para incrementar la efectividad de los procesos deshidratación de petróleo. El aumento de la velocidad de sedimentación de las gotas de agua en el crudo, a partir de la modificación de las propiedades físicas del sistema en estudio, producto de cambios en las variables operacionales (tales como temperatura), da cuenta de la estrecha relación que existe entre una ley fundamental y un proceso industrial de vital importancia en la actualidad.

Referencias

Anaya, Durand, A., Reflexiones sobre la Enseñanza de la Ingeniería Química, *Educ. quím.*, **12**(2), 79–87, 2001.
Armstrong, R. A., Vision of the Chemical Engineering Curriculum of the Future, *J. Chem. Educ.*, **40** (2), 104–109, 2006.
Arnold, K. y Stewart, M., *Surface Production Operation*, Gulf Publishing Co., Houston, Texas, 1986.
Bird, B. B., Stewart, W. E. y Lightfoot, E. N., *Fenómenos de Transporte*, Editorial Reverté, S. A., México, 2001.
De Nevers, Noel., *Fluid Mechanics for Chemical Engineers*,

3rd edition, McGraw-Hill International Edition, New York, USA, 2005.

Delgado, J. G., Delgado, A. y Mercado, R., Balances de Materia y Energía simplificados, aplicados a un proceso de craqueo catalítico de petróleo, *Educ. quím.*, **20**(4), 456–460, 2009.
Egloff, G., Nelson E., Maputo, C. y Wirteh, C., Improper Acidizing Presents Desalting problems to Refining Industry, *Oil & Gas J.*, **14**, 57–73, 1937.
Fingas, M. y Fieldhouse, B., Studies of the Formation Process of Water-in-Oil Emulsions, *Mar. Pollut. Bull.*, **47**, 369–396, 2003.
Fingas, M., Fieldhouse, B. y Mullin, J., Water-in-oil Emulsions Results of Formation Studies and Applicability to Oil Spill Modelling, *Spill Sci. Technol. Bull.*, **5**, 81–91, 1999.
Geankoplis C. J., *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*, Editorial CECSA, México, 1998.
Goldszal, A. y Bourrel, M., Demulsification of Crude Oil Emulsions: Correlation to Microemulsion Phase Behavior, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**, 2746–2751, 2000.
Jeffreys, G. y Davies, A. C., *Coalescence of Liquid Droplets and Liquid Dispersion, Recent Advances in Liquid-Liquid Extraction*, C. Hanson (ed.), Pergamon Press, New York, USA, 1971.
Liu, Q., Dong, M., Yue, X. y Hou, J., Synergy of Alkali and Surfactant in Emulsification of Heavy Oil in Brine, *Colloids Surf.*, **A**(273), 219–228, 2006.
Nöik, C., Chen, J. y Dalmazzone, C., *Electrostatic Demulsification on Crude Oil: A State-of-the-Art Review*, SPE 103808, Beijing, Chinese, 2006.
Petroleum Extension Services, University of Texas at Austin. *Treating Oilfield Emulsions*, 4th Edition, Texas, USA, 1990.
Rondón, M., Bouriat, P., Lachaise, J. y Salager, J. L., Breaking of Water-in-Crude Oil Emulsions. 1. Physicochemical Phenomenology of Demulsifier Action, *Energy & Fuels*, **20**, 1600–1604, 2006.
Salager, J. L., The Fundamental Basis for the Action of a Chemical Dehydrant. Influence of the Physical and Chemical Formulation on the Stability of an Emulsion, *Int. Chem. Eng.*, **30**, 103–116, 1990.
Smith, V. H., Crude Oil Emulsions, Cap. 19. En: *Petroleum Engineering Handbook* (pp. 19–1 a 19–34), Howard B. Bradley (Ed.), Society of Petroleum Engineers, Texas, USA, 1992.
Svreck, W. Y. y Monnery, W. D., Design Two-Phase Separators within the Right Limits, *CEP*, **89**(10), 53–60, 1993.
Svreck W. Y. y Monnery, W. D., Successfully Specify Three-Phase Separators, *CEP*, **90**(9), 29–40, 1994.
Tavera Escobar, F., *La Calidad de la Enseñanza de la Ingeniería ante el siglo XXI*, Limusa, México, 2000.
Van Dyke, K., *Fundamentals of Petroleum*, Petroleum Extension Services, University of Texas at Austin, Texas, USA, 1997.
Woods, D. R., Felder, R., Rugarcia, A. y Stice, J., E., The Future of Engineering Education III. Developing Critical Skills, *Chem. Eng. Educ.*, **34**(2), 108–117, 2000.