

PROCESOS DE SEPARACIÓN: UN ENFOQUE INTEGRADO

Por Ing. Federico G. Salazar, correo@fsalazar.bizland.com

RESUMEN

Es importante para el estudiante que culmina sus estudios de pregrado en Ingeniería Química el tener una integración de conceptos relacionados con los procesos industriales y concretamente en las llamadas operaciones unitarias, que constituyen la base de la disciplina. En muchos casos esta integración no concreta totalmente sobre la interpretación de los fenómenos de transporte y mucho menos su relación con la termodinámica y la aplicación de sus leyes en estos procesos. Este artículo constituye una primera aproximación al tema a manera de ilustración para que el estudiante que esta terminando sus estudios y se encuentra en la fase de preparación del proceso de graduación integre ente enfoque ampliado.

DESCRIPTORES

Ingeniería química, operaciones unitarias, fenómenos de transporte, leyes termodinámicas, números adimensionales.

ABSTRACT

It is important for the student that culminates in chemical engineering undergraduate studies have an integration of concepts related to industrial processes and specifically in the so-called unit operations, which form the basis of the discipline. In many cases this integration is not specifically integrated with the phenomena of transport and much less with thermodynamics and the application of its laws in these processes. This article constitutes a first approach to the topic un a way for illustration to the student who is completing his studies and is working on his graduation process that integrates this wider approach.

KEYWORDS

Chemical engineering, unit operations, transport phenomena, thermodynamics laws, adimensionales numbers.

PROCESOS DE SEPARACIÓN EN INGENIERÍA QUÍMICA: UN ENFOQUE INTEGRADO

PRESENTACION

Desde la perspectiva de la Ingeniería Química, la materia puede ser sometida básicamente a dos tipos de procesos industriales básicos: separación y transformación. Un tercero tipo de operación de importancia es el transporte a través de tuberías, bandas, canaletas, dependiendo de la fase con que se este trabajando, pero básicamente los materiales no sufren cambios apreciables.

Los *procesos de separación*, tal como su nombre lo indica, se refieren a todas aquellas actividades que buscan separar y clasificar las diferentes sustancias que constituyen un flujo de alimentación o materia prima, utilizado en un proceso industrial o de laboratorio, para obtener productos distintivos. Estos procesos se realizan en equipos integrados que trabajan como unidades propias, dando origen al concepto de Operaciones Unitarias. En muchos casos las operaciones unitarias están relacionadas con procesos que se basan en el principio de diferencias de concentraciones y la propiedad de las sustancias conocida como difusividad molecular (tendencia a difundirse en un medio).

Por su parte, los *procesos de transformación*, son referidos a todos aquellos procedimientos y actividades que modifican la materia desde su sustancia, es decir, partiendo de una materia determinada modificarla para obtener una nueva sustancia completamente diferente de la que lo origina. Estas operaciones se realizan a través de las reacciones químicas y el manejo y control de la cinética de reacción. Los equipos o unidades utilizadas son naturalmente los reactores químicos.

A raíz de este planteamiento, aparecen varios puntos que debemos enfatizar:

1. para la Ingeniería Química, un proceso de transformación no se refiere al tratamiento de la materia prima para cambiar su aspecto físico, forma y tamaño, y en consecuencia su presentación y empaque (inquietudes estas últimas más propias de la ingeniería industrial y del diseño gráfico), sino se refiere a procesos que modifican la materia sustancialmente desde su estructura para producir nuevas sustancias vía reacciones químicas.
2. los procesos de separación por su parte, no involucran en su conceptualización la presencia de reacciones químicas (a excepción de los procesos de intercambio iónico en donde se puede dar algún tipo de reacción básica)
3. en los procesos industriales, generalmente los procesos de separación y los de transformación nunca van solos sino se requiere una combinación de ellos para llegar a obtener productos deseables.
4. el concepto de Operaciones Unitarias tradicionalmente se refiere a los procesos industriales que se manejan en forma integral, en donde por medio uno o varios equipos especializados e interconectados se consigue una separación de materiales, utilizando diversos fenómenos y formas de impulso par que los procesos ocurran. Se puede aplicar calor y lograr diferencias de temperatura; otros basados en el esfuerzo o tensión mecánica aplicada y diferencias de presión; y finalmente diferencias de concentración y difusividad química, para realizarlos.

CONCEPTOS BÁSICOS

TRANSFERENCIA DE MASA Y ENERGÍA EN LA NATURALEZA

Se plantea un análisis de los tipos de transferencia desde el punto de vista de la termodinámica y de los fenómenos de transporte.

Termodinámica:

En cualquier proceso que ocurra espontáneamente en la naturaleza puede transferirse materia y energía a través de las paredes de un sistema en análisis. La transferencia de energía ocurre en forma de trabajo o de calor y queda plasmada en la ecuación del balance de energía de la primera ley

$$\Delta \dot{E} = \dot{Q} + \dot{W} \quad [\text{J/s}] = [\text{W}]$$

“...el cambio en la energía total del sistema dependerá de la magnitud de los flujos de calor y trabajo, desde y hacia el sistema”. Estamos hablando de potencia.

Si la transferencia es de masa, sin flujos de trabajo y calor, tenemos que

$$\Delta \dot{E} = (m_{\text{final}} \bar{E}_{\text{final}} - m_{\text{inicio}} \bar{E}_{\text{inicio}}) / \theta \quad [\text{kg}][\text{J/kg}]/\text{s} = [\text{W}]$$

o

$$\Delta \dot{E} = \dot{m}_{\text{final}} \bar{E}_{\text{final}} - \dot{m}_{\text{inicio}} \bar{E}_{\text{inicio}} \quad [\text{kg/s}][\text{J/kg}] = [\text{W}]$$

Podemos ver que el transporte de masa también involucra transferencia de potencia

Fenómenos de transporte:

Primer fenómeno. El flujo de fluidos puede ocurrir espontáneamente si el fluido se encuentra a mayor presión interna con respecto al mismo fluido a una distancia determinada. Adquiere velocidad y se impulsa si no encuentra ninguna obstrucción. Sin embargo, siempre tendrá que vencer una resistencia a fluir ocasionada por las paredes que contienen al fluido. Se habla entonces de la fuerza de arrastre que depende de la viscosidad y densidad de la sustancia y el nivel de velocidad alcanzado.

Es interesante analizar por un instante, el mismo fenómeno realizado en el espacio, ya que prácticamente no se encuentra resistencia a fluir, sin embargo se requiere de un mayor impulso a vencer al inicio por la falta del punto de apoyo físico.

La Ley de Viscosidad de Newton se plantea (para fluidos newtonianos)

$$\tau = \tau_{\text{paredes}} = R_f / A \quad [\text{N}]/[\text{m}^2] = [\text{Pa}]$$

Fricción del fluido = Fuerza de arrastre / área de contacto = Presión

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy} \quad [\text{Pa}\cdot\text{s}][\text{m}/\text{s}]/[\text{m}] = [\text{Pa}]$$

Fricción del fluido = (Viscosidad)(velocidad del fluido) / (distancia a la pared)

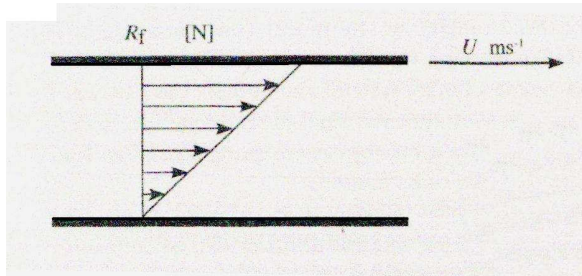


Figura No. 1. Transferencia de Impulso

Fuente: Asano (2006)

Un fluido no newtonianos, por su parte, es aquel que al aplicarle una fuerza no se acelera sino reacciona en forma diferente, se comprime por ejemplo (una masa de plastilina)

Por otra parte, indudablemente estamos planteando transferencia de energía en forma de trabajo para hacer fluir nuestro fluido

$$\Delta\dot{E} = \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p = \dot{W} + Q_f \quad [\text{J}/\text{s}] = [\text{W}]$$

Lo anterior es especialmente cierto si el fluido no se recalienta sino el esfuerzo por fricción se libera como calor \$Q_f\$.

Segundo fenómeno. La transferencia espontanea de calor ocurre cuando una región se encuentra a mayor temperatura que otra situada a una distancia determinada y se transfiere energía, para llenar o equilibrar ese espacio con menor nivel de energía. Lo sabemos, espontáneamente fluir el calor a la región mas fría.

La Ley de Fourier de conducción de calor se plantea

$$q = Q / A \quad [\text{W}]/[\text{m}^2] = [\text{W}/\text{m}^2]$$

Flux de calor = Flujo neto de calor / área de contacto

$$q = -\kappa \frac{dT}{dy} \quad [\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}][\text{K}]/[\text{m}] = [\text{W}/\text{m}^2]$$

Flux de calor = (conductividad térmica)(temperatura)/(distancia de flujo)

La conductividad térmica es función del calor específico y la densidad de la sustancia.

Por otra parte, indudablemente estamos planteando transferencia de energía en forma de calor que fluye, y tiene que provenir de nuestro sistema

$$\Delta\dot{E} = \Delta\dot{H}_k = \dot{Q} \quad [\text{J}/\text{s}] = [\text{W}]$$

Lo anterior es especialmente cierto teniendo presente que la región emisora tiende a enfriarse gradualmente conforme pierde calor, sin que ocurra flujo de masa ni trabajo sensibles. Si llegara a ocurrir paralelamente flujo de masa estaríamos hablando de calor por convección. En otros casos podría haber radiación, además del calor por conducción.

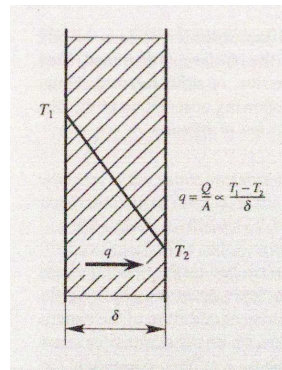


Figura No. 2. Transferencia de Calor

Fuente: Asano (2006)

Tercer fenómeno. La transferencia espontánea de masa ocurre cuando masa en una región que se encuentra a mayor concentración que otra región situada a una distancia determinada, ocurriendo espontáneamente flujo de masa, para llenar o equilibrar el espacio con menor masa. Lo hemos podido comprobar, espontáneamente fluiría el olor de un perfume al destapar el frasco que lo contiene.

La Ley de Fick de conducción de masa se plantea

$$J_A = -cD \frac{dx_A}{dy} \quad [\text{kmol/m}^3][1/\text{m}^2\text{s}]/[1/\text{m}] = [\text{kmol/m}^2\text{s}]$$

Flux difusional = (densidad molar)(difusividad)(fracción molar)/(distancia de flujo)

La difusión de masa es función de la concentración y la difusividad de la sustancia (volatilidad, solubilidad, etc).

Por otra parte, indudablemente estamos planteando transferencia de energía en forma de masa que fluye, y tiene que provenir de nuestro sistema.

$$\Delta \dot{E} = \Delta \dot{H} = 0 \quad [\text{J/s}] = [\text{W}]$$

Lo anterior es especialmente cierto teniendo presente que la región emisora tenderá a perder masa gradualmente conforme se difunde, cambiando la concentración del sistema aunque su energía específica permanezca constante. No ocurre flujo de trabajo ni calor apreciables. Si llegara a ocurrir paralelamente flujo de calor o trabajo estaríamos hablando de flujo de masa por convección forzada. En casos especiales podría sentirse un descenso de temperatura por el efecto de vaporización de la sustancia difundida, relacionado también con la convección forzada de masa.

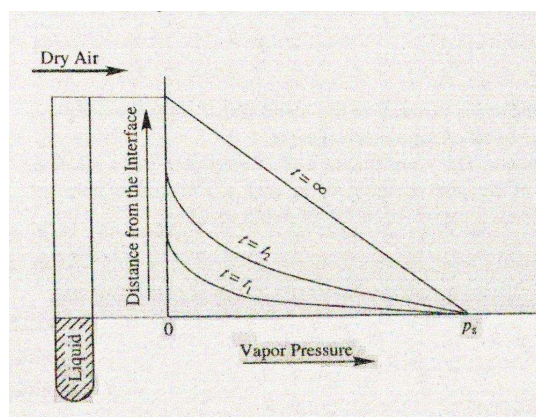


Figura No. 3.
Transferencia de Masa

Fuente: Asano (2006)

Se resume en la siguiente tabla lo dicho anteriormente.

Tabla No. 1. Transferencias masa y energía en las fronteras de los sistemas

Flujo	Vector de impulso	Ley	Efecto	Propiedades relacionadas	Disciplina asociada
Energía	Trabajo	Newton	Velocidad	Viscosidad y densidad	Mecánica de fluidos
	Calor	Fourier	Temperatura	Calor específico y densidad	Transferencia de calor
Masa	Masa	Fick	Concentración	Difusividad química y concentración	Mezcla / separación

Fuente: propia

OPERACIONES UNITARIAS

Cada una de las actividades básicas que componen un proceso industrial se llama operación unitaria. Tradicionalmente en la ingeniería de procesos se limita el término de operación unitaria a las operaciones en donde existe una transformación física de la materia prima dejando para el análisis de reactores las transformaciones químicas. Desde el punto de vista de la ingeniería industrial se habla de la transformación de la materia prima en productos sin especificar si existió transformación física, química o ambas a la vez.

Generalizando, diremos que son las acciones necesarias para la transformación de materias implicadas en un proceso químico industrial. Los cambios que puede sufrir la materia son:

- Modificar su masa o composición (separación de fases, mezcla, reacción química).
- Modificar el nivel o calidad de la energía que posee (enfriamiento, cambio de fase, aumento de presión,)
- Modificar sus condiciones de movimiento (aumentando o disminuyendo su velocidad).

Siguiendo esta clasificación, las operaciones unitarias físicas son: mezclado, sedimentación, flotación, adsorción, etc.

Las operaciones unitarias químicas son: combustión, hidratación, oxidación, reducción, entre otras.

Tabla No. 2. Procesos industriales asociados con la materia

Tipo	Vector de impulso	Propiedades relacionadas	Disciplina asociada
Transformación	Afinidad y reacción química	Concentración Temperatura Presión	Cinética química
Transporte	Fuerza de arrastre	Densidad, viscosidad, presión, velocidad	Flujo de fluidos
Separación	Concentración	Densidad, viscosidad, calor específico, difusividad volatilidad temperatura miscibilidad	Operaciones unitarias

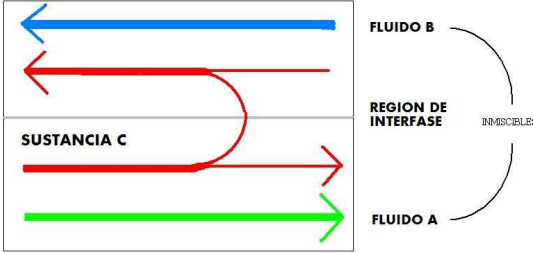
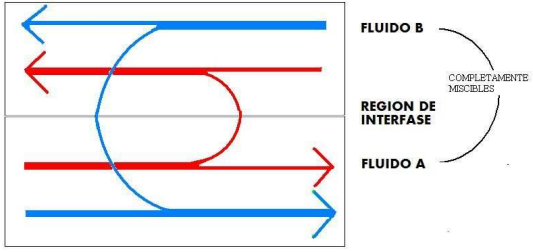
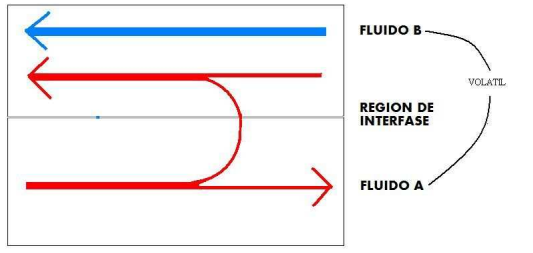
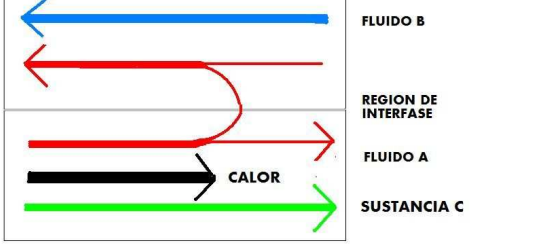
PROCESOS DE SEPARACION

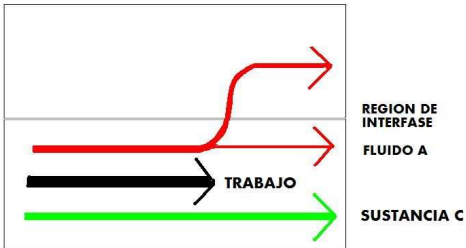
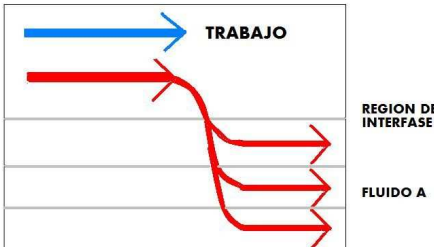
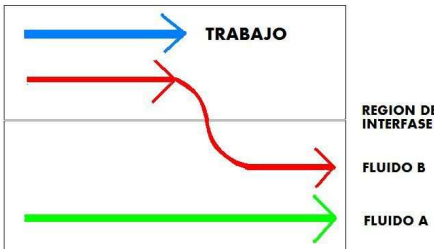
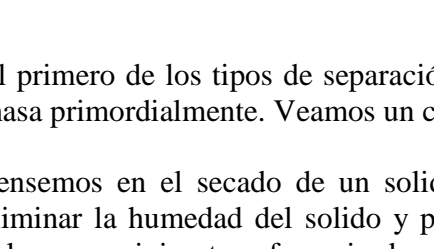
Con relación a los procesos de separación industriales tenemos que dividirlos en al menos tres tipos básicos: ya sea por transferencia de masa, de calor o de momentum. Es de tener presente sin embargo que prácticamente en ningún caso se procesa la materia sobre la base de un solo fenómeno, y esto se debe a que se aplica uno de los fenómenos como vector impulsor del proceso y luego se fortalece aplicando cualquiera de los otros dos fenómenos, si no ambos. Ilustraremos a continuación.

Otro aspecto de mucha importancia en el análisis de los procesos de separación es tener presente que se realizan con la presencia de diversas fases de agregación de la materia. Pero es en la interfase en donde ocurre el proceso de transferencia y generalmente asociada una capa límite a ambos lados de dicha interfase, en donde las sustancias varían sus condiciones para permitir o dificultar la transferencia.

En la Tabla No. 3 se representa esquemáticamente los mecanismos de transferencia en interfase para los diversos procesos industriales de separación existentes. En cada caso se incluyen las fases que intervienen en el proceso y el vector o impulso que hace que el proceso se realice. Mas adelante ejemplificamos y ampliamos el significado de esta tabla.

Tabla No. 3. Operaciones Unitarias de Separación

ESQUEMAS DE TRANSFERENCIA DE MASA	PROCESO	VECTOR	FASES
	Extracción líquido-líquido	Inmiscibilidad total o parcial	Líquido B Líquido A Sustancia C
	Absorción/desorción	Inmiscibilidad total	Gas B Líquido A Sustancia C
	Adsorción	Afinidad química	Sólido B Líquido/gas A Sustancia C
	Lixiviación	Solubilidad	Líquido B Sólido A Sustancia C
	Secado	Volatilidad Temperatura Concentración	Gas B Sólido A Sustancia C
	Destilación	Volatilidad relativa	Gas B Gas A Líquido A Líquido B
	Humidificación	Volatilidad	Gas B Gas A Líquido A
ESQUEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	PROCESO	VECTOR	FASES
	Evaporación	Volatilidad Temperatura Calor	Gas B Gas A Líquido A
	Concentración/Cristalización	Volatilidad temperatura Calor	Gas B Gas A Líquido A Sustancia C

ESQUEMAS DE TRANSFERENCIA DE MOMENTUM	PROCESO	VECTOR	FASES
	Centrifugación	Densidad Viscosidad Fuerza centrífuga	Líquido B Líquido A
	Filtrado	Densidad Viscosidad Gravedad/fuerza	Líquido B Sólido A
	Molienda y tamizado	Densidad Fuerza	Sólido A
	Mezclado	Densidad Fuerza	Líquido A Sustancia B

Fuente: propia

El primero de los tipos de separación es aquel basado en el fenómeno de transferencia de masa primordialmente. Veamos un caso.

Pensemos en el secado de un sólido. Nos viene a la mente que se requiere calor para eliminar la humedad del sólido y por lo tanto se trata de un proceso de transferencia de calor que origina transferencia de masa. Pero no es así, ya que seguramente ha tenido la experiencia de dejar algún alimento en la refrigeradora en un recipiente sin tapar y en el transcurso de unos días podrá comprobar que el sólido está reseco. Proceso en frío, lento pero en frío. El mecanismo de secado se lleva a cabo por el fenómeno de transferencia de masa, ya que el aire del refrigerador estaba seco y eso origina un impulso para que el agua del sólido se difunda hacia el gas y ocupar ese espacio de menor concentración de agua.

Claro, en los procesos industriales el interés es realizar el mismo efecto pero a una velocidad mucho mayor, en términos de eficiencia de proceso. Como se logra? Realizando una transferencia de calor al aire lo cual incidirá en dos aspectos muy importantes: a) el calor excedente provocará por transferencia la volatilización del líquido humectante acortando el tiempo de secado, pero además, y quizás más importante, b) el aumento de

temperatura del aire incidirá en una reducción de su humedad relativa (aunque la humedad total inicial permanezca constante); es decir, el calor excedente aumenta la capacidad del aire de recibir mas agua en su seno sin llegar a saturación. Fisicoquímicamente se explica en el aumento de la velocidad de las moléculas del aire y mayor volumen específico que permite compartir mas espacio con las moléculas de agua.

Contrariamente, podríamos agregar aire muy caliente pero saturado y no conseguiríamos realizar el secado. En un recinto saturado con vapor, por ejemplo en un baño turco ruso seria imposible secar una toalla, pero si se trata de un baño sauna a la misma temperatura el secado seria viable.

Un caso extremo de secado es la liofilización en donde el solido se lleva a congelación. Su humedad interna se vuelve hielo. En esas condiciones se pone en una cámara hermética prácticamente al vacio y luego, se proporciona calor con una chispa eléctrica que es suficiente para sublimar el agua de humedad dejando el solido completamente seco. Un secado en frio de este tipo es muy propio para el manejo de proteínas por ejemplo en la industria alimenticia y farmacéutica.

La humidificación y acondicionamiento de aire es un proceso similar en su mecanismo al del secado, solamente que visto desde la parte del gas y siendo la otra fase únicamente liquida en vez de un solido y un líquido como en el secado.

Así mismo, dejo al lector el análisis de los otros procesos de transferencia de masa: extracción liquido-liquido, absorción, adsorción y lixiviación cuyo mecanismo es similar al del secado, variando en cada caso las fases involucradas, el número de fluidos y la dirección de la transferencia.

Una variante la introduce la destilación en donde la transferencia de masa es doble o cruzada (en los otros procesos mencionados anteriormente no ocurre). Cada componente presente busca migrar a la otra fase en donde hay menos concentración, favoreciéndose el proceso por efecto de las volatilidades relativas y la adición de calor.

Por otra parte, hay procesos de separación cuyo mecanismo dominante es la transferencia de calor. Veamos el caso de la cristalización y para ello, el proceso de obtención de sal en una salinera a la orilla del mar. En una de las fases tenemos sal soluble y no volátil disuelta en agua y en la otra, aire. Asumiendo que el aire contenga muy poca humedad relativa y dejáramos el proceso de transferencia de masa avanzar a temperatura constante digamos de 25C, el secado y cristalización podría durar muchos meses o quizás años. Entonces, en las salineras se aprovecha el calentamiento del agua y aire por la radiación solar. El proceso se acelera y en una salinera se obtiene sal cristalizada en alrededor de un mes.

En la operación unitaria de cristalización el proceso se acelera transfiriendo grandes cantidades de calor a la fase liquida provocando la ebullición del agua y permitiendo la cristalización en un tiempo corto. La separación se dio por transferencia de calor básicamente.

Finalmente, existen los procesos de separación por transferencia de trabajo: centrifugación y filtrado son ejemplos. Caso especial es la reducción de tamaño que requiere trabajo y puede dar base a la separación por tamizado. Se incluye además en la tabla No. 3, como una extensión al tema, el proceso de mezclado entre fases que es así mismo un proceso de transferencia de trabajo y esfuerzo.

NÚMEROS ADIMENSIONALES

Los números adimensionales son formulas que relacionan propiedades, condiciones de operación y configuraciones espaciales de los sistemas en análisis relacionados de tal forma que se obtienen valores que nos indican el grado de transferencia de momentum, calor o masa que esta ocurriendo.

El ejemplo clásico y familiar es el Número de Reynolds que sirve para evaluar el tipo de flujo existente en el transporte de un fluido determinado a condiciones específicas. Cuantifica la velocidad media del fluido con la geometría del sistema (puede ser una longitud de tubería o un diámetro) y lo relaciona con las propiedades del fluido que intervienen en el proceso de transporte, es decir la viscosidad y densidad (viscosidad cinemática). En realidad relaciona la fuerza de inercia con la fuerza viscosa para un grosor de capa del fluido. Acorde al valor calculado podemos predecir si el flujo es turbulento, transitorio o laminar en la región contigua a la interfase. ¿Influyen la temperatura y presión? Si, y se refleja en los valores de la viscosidad cinemática y la velocidad media, respectivamente.

El Número de Prandtl cuantifica el calor específico con la viscosidad y lo relaciona con la conductividad térmica del fluido. Compara el grosor de la capa de temperatura con el grosor de la capa de velocidad, ambas cercanas a la interfase. Un fluido con un Prandtl menor a 1a unidad nos indica que a las condiciones en que esta fluyendo sirve como aislante térmico ya que no permite el desarrollo de un perfil de temperatura.

Por su parte, el Número de Schmidt relaciona la viscosidad cinemática con el difusividad molecular para darnos idea de la magnitud de transferencia de masa a las condiciones del fluido en la región contigua a la interfase. Evalúa el grosor de la capa de transferencia de masa con el grosor de la capa de velocidad, cercanas a la interfase. Un fluido con un Schmidt menor a la unidad nos indica que sirve de “aislante” a la difusión de masa desde la interfase, a las condiciones en que fluye.

Otros números, como los de Nusselt y Sherwood evalúan directamente la magnitud de la transferencia de calor o masa respectivamente. Stanton o el factor-J sirven para evaluar el grado de transferencia por turbulencia en el fluido. Pecle't nos indica la relación entre la transferencia por conducción o natural y la convectiva.

A manera de complemento y para completar la ilustración, se adiciona la tabla siguiente que contiene algunos de los números adimensionales más importantes, en donde se muestran las posibles combinaciones de mecanismos de transferencia.

Tabla No. 4. Números Adimensionales más Importantes en transferencia de masa y calor

	Símbolo	Nombre	Definición	Referencia
Flujos	Nu	Nusselt	$\frac{hL}{\kappa}$	Tasa de transferencia de calor
	Sh	Sherwood	$\frac{N_A L}{\rho D(\omega_s - \omega_\infty)}$	Tasa de transferencia de masa
	St_H	Stanton de calor	$\frac{Nu}{RePr}$	Tasa de transferencia turbulenta de calor
	St_M	Stanton de masa	$\frac{Sh}{ReSc}$	Tasa de transferencia turbulenta de masa
	j_D	factor-J de masa	$St_M Sc^{2/3}$	Tasa de transferencia turbulenta de masa
	j_H	factor-J de calor	$St_H Pr^{2/3}$	Tasa de transferencia turbulenta de calor
Condiciones de operación y propiedades físicas	Fo_H	Fourier de calor	$\frac{\kappa t}{\rho c_p L^2}$	Transferencia de calor transitoria
	Fo_M	Fourier de masa	$\frac{Dt}{L^2}$	Transferencia de masa transitoria
	Gz_H	Graetz de calor	$\left(\frac{\pi D_T}{4L}\right) RePr$	Transferencia de calor en tubería
	Gz_M	Graetz de masa	$\left(\frac{\pi D_T}{4L}\right) ReSc$	Transferencia de masa en tubería
	Gr	Grashof	$\frac{g\beta\Delta T^3 L^3 \rho^2}{\mu^2}$	Convección natural de calor
	Pe_H	Peclet de calor	$RePr$	Relación calor por conducción/convección
	Pe_M	Peclet de masa	$ReSc$	Relación masa por conducción/convección
	Pr	Prandtl	$\frac{c_p \mu}{\kappa}$	Grosor de capa de temperatura
	Re	Reynolds	$\frac{\rho L U_\infty}{\mu}$	Grosor de capa de velocidad limite
	Sc	Schmidt	$\frac{\mu}{\rho D}$	Grosor de capa de concentración
	B	Transferencia de masa	$\left(\frac{\omega_s - \omega_\infty}{1 - \omega_s}\right)$	Fuerza impulsora adimensional de masa

Fuente: Asano (2006)

CONCLUSIONES

Sobre el análisis realizado en este documento podemos notar que para el estudiante de la ingeniería química es importante dominar los conceptos relacionados con los procesos de separación, transformación y transporte de materiales. En este sentido su dominio sobre el concepto de los fenómenos de transporte de esfuerzo, calor y masa, es muy importante.

Con relación a los procesos de separación deberá conocer los principios que gobiernan cada una de las operaciones unitarias existentes y reconocer cual es el mecanismo de separación empleado, sobre la base de los tres fenómenos de transporte mencionados.

En este sentido, es importante poder localizar la propiedad o condición de las sustancias que se debe de alterar para que ocurran estas separaciones. Por ejemplo, cambios de temperatura producirán modificaciones en la presión de vapor, densidad, viscosidad y difusividad molecular de la sustancia. En igual forma variaciones de presión inciden en esas propiedades y cambios en la cantidad relativa de masa también alteran esas condiciones.

Un segundo punto de importancia será a partir de lo anterior poder deducir cual sería la forma más adecuada para lograr ese cambio en las propiedades que permitan con más facilidad la separación propuesta. A través de manejo directo de energía en forma de calor o por trabajo agregado, empleando sustancias compatibles entre sí o aprovechándose de su inmiscibilidad relativa (incompatibilidad o afinidad química).

Finalmente, con toda esa base podrá iniciar el diseño de equipo o equipos necesarios para realizar las operaciones de separación propuestas. El escalamiento final desde condiciones de laboratorio a planta piloto y escala industrial dependerá en principio de las magnitudes de materia a procesar.

La intención de este documento es aportar al estudiante graduando algunos elementos que deben de ser completados y continuados, especialmente en relación a las consideraciones termodinámicas y de equilibrio imprescindibles para obtener los niveles de eficiencia de operación que la industria de procesamiento requiere, especialmente contabilizando y optimizando todos los flujos de materiales y energía para disminuir los impactos ambientales negativos que el proceso pueda ocasionar.

BIBLIOGRAFÍA

ASANO, KOICHI (2006). Mass Transfer: from fundamentals to Modern Industrial Applications. Wiley-VCH. Tokyo.

FOUST, A.; WENZEL, L.; CLUMP, C.; MAUS, L. & ANDERSEN, L. (1960). Principles of Unit Operations. Wiley International. New York.

McCABE, WARREN; SMITH, JULIAN & HARRIOTT, PETER (1991). Operaciones Básicas en la Ingeniería Química. 4ª edición. McGraw Hill. Madrid.

EGRAFIAS

JURADO, JUAN PEDRO (1998). Operaciones Unitarias I. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional La Plata. Consultado en: <http://www.frlp.utn.edu.ar/quimica/Practicas/FRLP%20Syllabus%20Quimica/Op-Unit-I/OpUnit1.pdf>

Las Salineras de Maras. Consultado en: <http://www.perutoptours.com/index07cumarass.html>

Operaciones Unitarias. Consultado en: sabanet.unisabana.edu.co/ingenieria/especializacion/ambiental/material/nivelatorio/4introduccion/guia_2.doc

SALAZAR, FEDERICO G.



Ingeniero Químico graduado del TEC de Monterrey, México. Con estudios de maestría en Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela. Posgrado en Integración Regional de la Universidad Rafael Landívar, especialización en Desarrollo y Ambiente de FLACSO-Guatemala. Docente universitario de la Universidad Rafael Landívar, del Valle de Guatemala, San Carlos de Guatemala y Mariano Gálvez. Actualmente en la Dirección de Investigación de URL.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ADICIONALES

TREYBAL, ROBERT (1980). Mass Transfer Operations. McGraw Hill. Tokyo.

MANRIQUE, JOSE ANGEL (2002). Transferencia de Calor. 2ª. Edición. Alfaomega Grupo Editor S.A. México

HINES, ANTHONY & MADDOX, ROBERT (1987). Transferencia de Masa, Fundamentos y Aplicaciones. 1ª edición. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.

GEANKOPLIS, CHRISTIE (1986). Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. CECSA. México.

SHERWOOD, THOMAS; PIGFORD, ROBERT & WILKE, CHARLES (1975). Mass Transfer. McGraw Hill. Tokyo.

ECKERT, E & DRAKE, ROBERT. (1972). Analysis of Heat and Mass Transfer. McGraw Hill. Tokyo.

WELTY, J; WILSON, E. & WICKS, C. (1976). Fundamentals of momentum, heat and mass transfer. 2nd edition. John Wiley & Sons. New York.

BIRD, R.; STEWART, W. & LIGHTFOOT, E. (1982). Fenómenos de Transporte. Editorial Reverté S.A. Barcelona.

BRANAN, CARL (2005). Rules of Thumb for Chemical Engineers. 4th edition. Elsevier. Oxford.