



Transferencia de cantidad de movimiento, calor y materia

C. O. Bennett
J. E. Myers

*

EDITORIAL REVERTÉ

Transferencia de cantidad de movimiento, calor y materia

C. O. BENNETT

*Professor of Chemical Engineering
University of Connecticut
Storrs*

J. E. MYERS

*Professor of Chemical and
Nuclear Engineering
University of California
Santa Barbara*



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Título de la obra original:

Momentum, Heat, and Mass Transfer, Second Edition

Edición original en lengua inglesa publicada por:

McGraw-Hill Book Company, New York, U.S.A.

Copyright © McGraw-Hill, Inc.

Versión española por:

Dr. Joaquín Casal Fábrega

Departamento de Ingeniería Química de la
Universidad Politécnica de Barcelona

Revisada por:

Profesor Dr. Fidel Mato Vázquez

Catedrático de Química Técnica de la
Universidad de Valladolid

Edición en papel:

© Editorial Reverté, S. A., 1979

ISBN 978-84-291-7051-1

Edición e-book (PDF):

© Editorial Reverté, S. A., 2021

ISBN 978-84-291-9258-2

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15, Local B

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

e-mail: reverte@reverte.com

Internet: <http://www.reverte.com>

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

Índice analítico

Prólogo	ix
<i>1</i> Introducción	1
Part. 1 Mecánica de fluidos	15
<i>2</i> Introducción al comportamiento de los fluidos	17
<i>3</i> Balance global de materia	33
<i>4</i> Balance global de energía	47
<i>5</i> Balance global de cantidad de movimiento	71
<i>6</i> Medida del flujo	83
<i>7</i> Balance diferencial de materia	100
<i>8</i> Balance diferencial de energía	109
<i>9</i> Balance diferencial de cantidad de movimiento	115
<i>10</i> Algunas soluciones de las ecuaciones del movimiento	130
<i>11</i> Flujo en la capa límite	152
<i>12</i> Distribución de velocidades y rozamiento en el flujo turbulento	171
<i>13</i> Análisis dimensional y su aplicación a la mecánica de fluidos	204
<i>14</i> Algunas ecuaciones de diseño para el movimiento de fluidos incompresibles	224
<i>15</i> Filtración	253

Part. 2	Transferencia de calor	279
16	Introducción a la transferencia de calor	281
17	Conducción y conductividad calorífica	285
18	Conducción de calor en régimen estacionario	294
19	Conducción de calor en estado no estacionario	309
20	Métodos numéricos, gráficos y analógicos en el análisis de la conducción de calor	330
21	Coefficientes de transmisión de calor por convección	349
22	Transmisión de calor con flujo laminar	377
23	Transferencia de calor con flujo turbulento	401
24	Ecuaciones de diseño para la transmisión de calor por convección	427
25	Ebullición y condensación	459
26	Transmisión de calor por radiación	484
27	Equipo de intercambio de calor	518
Part. 3	Transferencia de materia	549
28	Introducción a la transferencia de materia	551
29	Difusión molecular y difusividad	556
30	Difusión en mezclas binarias	569
31	Coefficientes de transferencia de materia por convección	593
32	Transferencia de materia con flujo laminar	617
33	Transferencia de materia con flujo turbulento	628
34	Ecuaciones de diseño para la transferencia de materia por convección	648
35	Contacto continuo de fases inmiscibles	672
36	Transferencia simultánea de cantidad de movimiento, calor y materia	701
37	Separación por etapas de equilibrio. Fases inmiscibles	739
38	Contacto entre fases parcialmente miscibles	765
39	Destilación de mezclas binarias	786
40	Separación de mezclas multicomponentes	846
	Apéndices	871
	Índice alfabético	917

Prólogo

Este libro ha sido escrito como texto para el estudio de la transferencia de cantidad de movimiento, calor y materia, dirigido a estudiantes no graduados. No es un tratado completo, y no pretendemos cubrir todos los aspectos, teóricos o prácticos, de los extensos temas discutidos. En cambio, hemos procurado presentar las partes más importantes de la teoría y sus aplicaciones de una forma rigurosa y al mismo tiempo no recargada con excesivos detalles.

Un libro cubriendo un campo tan amplio de materias puede servir solamente como introducción. Un estudiante que desee aprender más deberá acudir a textos especializados en mecánica de los fluidos, transferencia de calor, transferencia de materia y operaciones básicas. Sin embargo, el estudiante de ingeniería se ve ahora obligado a estudiar tantos temas que nos parece esencial proporcionar una introducción unificada a los fenómenos de transporte que pueda ser cubierta en un curso anual. Hemos procurado discutir la mayoría de las partes importantes de los fenómenos de transporte y proporcionar además detalles suficientes que permitan al lector utilizar el material dado para la solución de problemas tipo.

Presentamos en este libro las operaciones básicas como aplicaciones de la teoría, y mostramos las bases de las correlaciones que el ingeniero ha utilizado en el pasado, con la esperanza de que él mismo pueda proporcionar nuevas

correlaciones en el futuro a medida que las necesite. El libro no está escrito únicamente para los mejores estudiantes o para estudiantes de escuelas técnicas. Está escrito para todos aquellos estudiantes que vayan a realizar esencialmente un trabajo para el cual sea imprescindible una comprensión fundamental de los fenómenos de transporte. A pesar de la organización de la materia tratada, basada en la teoría, esperamos que el estudiante que utilice nuestro libro sea capaz de aplicar los principios científicos a situaciones concretas, de hallar datos en un manual, de entender la terminología propia de la ingeniería, y asimismo de obtener la solución numérica de un problema.

Existen ya muchos textos conteniendo largas descripciones y numerosas representaciones de filtros, evaporadores y otros equipos de proceso. Aunque hemos utilizado los dibujos y representaciones suficientes para ilustrar la materia tratada, remitimos al lector a la obra de Perry, Chemical Engineers' Handbook para detalles de equipo y correlaciones empíricas.

A medida que aumenta el conocimiento en los distintos campos de la ingeniería, las diferencias entre las disciplinas disminuyen. Aunque la experiencia profesional de los autores se ha desarrollado en la ingeniería química, esperamos que este libro sea estudiado en cursos planeados para introducir a los ingenieros de cualquier especialidad a la transferencia de cantidad de movimiento, calor y materia. El tratamiento de la mecánica de fluidos y de la transferencia de calor presenta las leyes y conceptos fundamentales que todos los ingenieros deberían conocer. El estudio de la transferencia de materia ha sido limitado, hasta hace poco, casi enteramente a los ingenieros químicos. Recientemente, sin embargo, los ingenieros de otras especialidades han aumentado en gran manera su interés por la transferencia de materia. Nuestra opinión es que estos ingenieros saldrán beneficiados con una exposición que da la misma importancia a la transferencia de materia que a las transferencias de cantidad de movimiento y de calor.

Se da por sentado que nuestros lectores tienen un conocimiento básico de termodinámica, cálculo, y ecuaciones diferenciales ordinarias. La notación vectorial no ha sido utilizada en el texto principal, pero las ecuaciones importantes están desarrolladas en notación más condensada en los apéndices. De esta manera el profesor o el lector pueden escoger por sí mismos la forma de presentación de las ecuaciones básicas.

Toda la materia tratada y una selección de los problemas puede ser cubierta con aproximadamente 125 horas de clase. Este curso podrá ser impartido en cuanto se haya explicado previamente suficiente termodinámica y qui-

mica física. Si la materia aquí tratada ha de ser cubierta en un curso de unas 95 horas, como se ha hecho en nuestro caso, cierto número de capítulos pueden ser tratados cualitativamente u omitidos sin que se experimente una pérdida de continuidad; por ejemplo, en la Parte I, "Mecánica de Fluidos", aquellos capítulos que tratan sobre balances diferenciales y distribuciones de velocidad en régimen turbulento. El profesor competente se encontrará con varias opciones en la materia a tratar, y no nos atrevemos a aconsejarle sobre qué temas serán más apropiados para sus alumnos.

Este libro, en su presentación actual, es el resultado de muchos años de interacción con colegas y estudiantes demasiado numerosos para ser citados. Cuando lean esta edición, esperamos que se alegren ante la evidencia de que hemos tomado en cuenta a menudo sus consejos.

C. O. BENNETT

J. E. MYERS

**Transferencia de cantidad de movimiento,
calor y materia**

Introducción

Los ingenieros están empleados en muchas industrias en las cuales las materias primas son convertidas en productos por medio de reacciones químicas y cambios físicos. Algunas industrias que dependen de cambios químicos son la fabricación de ácido sulfúrico a partir de sulfuros minerales, la producción de amoníaco, y la conversión del petróleo en una serie de productos petroquímicos. En otras industrias, tales como la producción de azúcar a partir de remolacha azucarera o la extracción de aceite a partir de maíz, predominan los cambios físicos. Muchas operaciones industriales consisten en una secuencia de transformaciones físicas y químicas, y esta secuencia recibe el nombre de *proceso*.

El trabajo de muchos ingenieros en la industria implica el desarrollo de procesos y el diseño y explotación de plantas. Desarrollo de un proceso es una expresión utilizada por los ingenieros para describir la búsqueda del equipo y condiciones óptimas para el proceso. Los pasos que constituyen el proceso son normalmente conocidos; la combinación de estos pasos para que el proceso sea rentable cuando se realice con equipo a gran escala es lo que se denomina "desarrollo" de un proceso. La misión del ingeniero químico en el diseño consiste generalmente en determinar ciertas características generales y dimensiones del equipo. Por ejemplo, puede especificar la altura, diámetro, número

de platos, y método de control de una columna de destilación. El grosor de las paredes de la columna y las dimensiones de los cimientos serán especificados probablemente por ingenieros mecánicos, y los detalles de los sistemas de control estarán normalmente en manos de ingenieros eléctricos. La función del ingeniero en la explotación de una planta no es solamente supervisar la rutina de producción, sino también mejorar el rendimiento de la planta efectuando cambios en el proceso existente. Cada ingeniero puede desempeñar mejor su función si entiende los principios que hay detrás de los cambios físicos y químicos del proceso.

Las industrias químicas funcionaron mucho antes de que la profesión de ingeniero químico fuera reconocida. La tecnología de cada industria era considerada como una rama especial del conocimiento, y las personas que llevaban a cabo el trabajo hoy realizado por los ingenieros químicos, habían recibido formación como químicos, ingenieros mecánicos y técnicos. Pronto hubo cursos de ingeniería química basados en el estudio de la tecnología industrial. Estos cursos cambiaron grandemente con la introducción del concepto de operaciones básicas. La similitud de los cambios físicos que tenían lugar en industrias muy diferentes condujo al estudio de las muchas etapas comunes a las diversas industrias; esto empezó a ser conocido como operaciones *básicas*. Por ejemplo, se admitió que la evaporación de un líquido desde una disolución seguía los mismos principios tanto si ocurría en un proceso de fabricación de azúcar como de fertilizante. Así la evaporación se convirtió en una de las primeras operaciones básicas reconocidas. Muchos otros pasos condujeron a una configuración de las operaciones básicas, incluyendo flujo de fluidos, transferencia de calor, humidificación, secado, destilación, absorción de gases, extracción, desintegración mecánica de sólidos, cristalización, filtración y mezcla.

Al irse conociendo mejor las operaciones básicas, resultó evidente que no eran entidades distintas. La filtración era obviamente un caso especial de flujo de fluidos; la extracción y la observación de gases implicaban transferencia de materia. El secado y la destilación fueron aceptadas como operaciones en las cuales tanto la transferencia de calor como la de materia eran importantes. Las operaciones básicas fueron entendidas, por tanto, como casos especiales o combinaciones de transferencia de calor, transferencia de materia y flujo de fluidos. Estos fenómenos son denominados por los ingenieros fenómenos de *transporte* y son el fundamento de las operaciones básicas. Cualquier estudio fundamental sobre operaciones básicas se convierte al fin en un estudio de estos fenómenos de transporte.

La mayoría de las operaciones básicas importantes están afectadas por el comportamiento de los fluidos en el equipo de proceso. El reactor químico es normalmente el corazón del proceso, y aquí el ingeniero puede utilizar simultáneamente los principios de la mecánica de fluidos, transferencia de calor y transferencia de materia, así como cinética química y termodinámica. En la preparación de los reactivos y en la separación de los productos, las operaciones básicas de filtración, lixiviación, absorción, extracción y destilación, tienen una importancia considerable. Como fundamento de cada paso del proceso están los principios del flujo de fluidos y transferencia de calor; el fluido debe ser transportado y su temperatura debe ser controlada. En un proceso químico, donde la composición es una variable, los principios de la transferencia de materia son esenciales para el diseño de los equipos de separación o de reacción.

Los fenómenos de transporte, fundamentales en el estudio de las operaciones básicas, son también esenciales en los problemas de flujo de fluidos y transferencia de calor resueltos por los ingenieros mecánicos y aeronáuticos. Estos problemas tradicionalmente no han sido complicados por reacciones químicas y han implicado una geometría relativamente simple, tal como el flujo en una tubería o alrededor de un sólido de revolución. Debido a las complicaciones que surgen de la transferencia simultánea de calor y materia en un sistema con reacción química y de la complicada geometría de los aparatos de contacto entre fases, el enfoque empírico ha resultado fructífero para los ingenieros químicos. Hasta hace poco, la teoría básica de la mecánica de fluidos y de la transferencia de calor había sido estudiada principalmente por físicos e ingenieros mecánicos y aeronáuticos. Por otra parte, los ingenieros químicos han realizado significativas contribuciones a la transferencia de materia. Sin embargo, en los últimos años otros ingenieros han dirigido su interés hacia la transferencia de materia, mientras que los ingenieros químicos han encontrado muchas aplicaciones a la teoría de la mecánica de fluidos y de la transferencia de calor. La importancia práctica de la teoría se ha visto acrecentada en gran manera por las computadoras electrónicas de alta velocidad. Estos aparatos han hecho posible la aplicación de la teoría a complicadas situaciones para las cuales había que darse por satisfecho antiguamente con los métodos empíricos.

Se desprende claramente de la anterior discusión que a medida que los distintos ingenieros avanzan en el estudio de sus respectivos campos, las diferencias causantes de la especialización tradicional disminuyen. El estudio de los principios de los fenómenos de transporte se convierte en un tema

central para cada ingeniero, sin importar cuál sea su especialidad. Aunque muchos de los ejemplos que ilustran los principios presentados en este libro están tomados de aplicaciones de la ingeniería química, sólo el capítulo 15, "Filtración", y el capítulo 39, "Destilación de mezclas binarias", atañen a temas que pueden ser considerados especiales para el ingeniero químico.

El enfoque fundamental de los problemas de fenómenos de transporte y operaciones básicas concede al análisis matemático de dichos problemas una gran importancia. Además de su utilización en la realización de cálculos de diseño, el ordenador se usa también hoy en día para el control de las variables operativas de la planta. Para darle al ordenador esta aplicación, para poder suministrarle instrucciones que le permitan regir el proceso de manera que éste opere de una forma económicamente óptima, normalmente es necesario un modelo matemático del proceso. Este modelo dependerá de una detallada comprensión previa del proceso y de un análisis matemático del mismo.

En una planta controlada por ordenador las condiciones de operación pueden ser variadas frecuentemente de acuerdo con los cambios sufridos por las materias primas, actividad del catalizador, escala del equipo, condiciones ambientales o demanda del mercado. Por tanto, es necesario para el ingeniero entender el comportamiento no estacionario del proceso, cuyo estudio matemático es más complicado. Esto se denomina normalmente *dinámica del proceso*.

Debido a las razones expuestas anteriormente, el lector podrá comprobar que en este libro ha sido recalcado el enfoque analítico y matemático, con la esperanza de proporcionar una base firme para un trabajo ulterior en problemas de ingeniería más avanzados.

NOTACIÓN, UNIDADES Y DIMENSIONES

En la tabla presentada al final de este capítulo se da una explicación de la mayoría de los símbolos utilizados en el libro. Algunos de estos símbolos están explicados de forma más extensa en el texto, y otros, utilizados tan sólo unas pocas veces, han sido omitidos de la tabla.

En muchos razonamientos de mecánica se acostumbra a definir las llamadas unidades fundamentales, referidas a la ley de Newton:

$$F = Ma \quad (1-1)$$

Este procedimiento conduce a las siguientes relaciones:

Sistema centímetro-gramo-segundo (cgs):

$$1 \text{ dina} = \frac{(1 \text{ g})(1 \text{ cm})}{\text{seg}^2} \quad (1-2)$$

Sistema metro-kilogramo-segundo (mks):

$$1 \text{ newton} = \frac{(1 \text{ kg})(1 \text{ m})}{\text{seg}^2} \quad (1-3)$$

Sistema británico:

$$1 \text{ poundal} = \frac{(1 \text{ lb})(1 \text{ ft})}{\text{seg}^2} \quad (1-4)$$

En estos sistemas, las unidades de fuerza derivan de las unidades de masa, longitud y tiempo, que son consideradas normalmente como fundamentales en mecánica. En cuanto a dimensiones, hablamos del sistema $[M]$, $[L]$, $[\theta]$, y la fuerza tiene las dimensiones $[ML/\theta^2]$.

Por otra parte, en el llamado sistema ingenieril americano, se toma como unidad fundamental la libra fuerza, de forma que

$$1 \text{ libra fuerza} = \frac{(1 \text{ slug})(1 \text{ ft})}{\text{seg}^2} \quad (1-5)$$

La libra fuerza viene dada por $(0,4536)(9,807)$, o sea 4,448 newtones, lo que equivale a $4,448 \text{ (kg)(m)/seg}^2$. En este sistema $[F]$, $[L]$, $[\theta]$, un slug es igual a $1 \text{ (lb fuerza)(seg}^2\text{)/ft}$. y la masa tiene las dimensiones de $[F\theta^2/L]$.

En este libro se utilizan cuatro magnitudes fundamentales en vez de tres (*): kilogramo masa, kilogramo fuerza, metro y segundo. El kilogramo fuerza se define como la atracción que ejerce la gravedad, en un campo gravitacional normal ($g = 9,8067 \text{ m/seg}^2$), sobre una masa dada de platino (de un kilogramo masa). Con esta elección de unidades, es necesario utilizar una constante dimensional en la segunda ley de Newton,

(*) *N. del T.*—El sistema de unidades utilizado en la versión original de este libro es el ingenieril americano, cuyas magnitudes fundamentales son fuerza, masa, longitud y tiempo. Las correspondientes unidades son: libra fuerza (lb force), libra (lb), pie (ft), segundo (sec). El valor de la constante g_c para estas unidades es de $32,17 \text{ (lb)(ft)/(lb force)(sec}^2\text{)}$. Como unidad de temperatura se toma el grado Fahrenheit, y como unidad de calor la Btu.

Un cierto número de ejemplos y problemas se han mantenido en las unidades originales, con las que el lector debería familiarizarse también, ya que con ellas está expresada gran parte de la información técnica existente.

$$F = \frac{Ma}{g_c} \quad (1-6)$$

de forma que

$$1 \text{ kg fuerza} = \frac{(1 \text{ kg})(9,8067 \text{ m/seg}^2)}{g_c} \quad (1-7)$$

Por tanto, la constante g_c es

$$g_c = 9,8067 \text{ (m)(kg)/(kg fuerza)(seg}^2) \quad (1-8)$$

El kilogramo fuerza definido en este sistema $[F]$, $[M]$, $[L]$, $[\theta]$ tiene un valor fijo y no depende del valor local de g . El valor de g_c ha sido elegido, claro está, de forma que un kilogramo masa ejerce una fuerza de un kilogramo fuerza cuando está expuesto a la acción del campo gravitacional normal de la Tierra.

Existe actualmente una tendencia a adoptar el SI (*système international*).¹ Esta racionalización, muy avanzada en las unidades eléctricas, tardará todavía algún tiempo en alcanzar las industrias de proceso. Por tanto, mantengamos las unidades del sistema ingenieril europeo en la tabla de notación, pero un ingeniero competente debe estar preparado para utilizar ambos sistemas casi con la misma facilidad.

Para poder ser aplicada con cualquier sistema consistente de unidades, una ecuación debe ser dimensionalmente homogénea; es decir, todos los términos deben tener las mismas dimensiones. En el sistema $[F]$, $[M]$, $[L]$, $[\theta]$, la constante dimensional g_c es necesaria en la ley de Newton para garantizar la homogeneidad dimensional; su valor numérico depende del sistema de unidades elegido. Todos los números que aparezcan en una ecuación algebraica dimensionalmente homogénea son adimensionales. La ecuación (1-6) ya no sería dimensionalmente homogénea si se escribiera de la forma $9,8067F = Ma$. Esta ecuación sólo es válida para las unidades dadas en la ecuación (1-8). Por otra parte, en el sistema $[M]$, $[L]$, $[\theta]$, la Ec. (1-1) es dimensionalmente homogénea. Definiendo una dimensión fundamental menos y haciendo que F tenga las dimensiones de Ma , g_c tiene el valor de 1,0 sin dimensiones.

Hemos discutido hasta ahora sólo sistemas mecánicos. Si los efectos térmicos son importantes, utilizamos una dimensión de energía $[H]$ y una dimensión de temperatura $[T]$. Así el conjunto completo de magnitudes fundamentales utilizado en este libro es $[F]$, $[M]$, $[L]$, $[\theta]$, $[H]$, $[T]$. Claro está que el número podría reducirse, no sólo por lo que respecta a las magnitudes mecá-

¹ J. W. Mullin, *AICHE J.*, **18**:222 (1972).

nicas, como ya se ha razonado, sino también con respecto a $[H]$, que tiene las dimensiones $[FL]$.

Los símbolos V , H , etc., se refieren a propiedades intensivas, como por ejemplo m^3/kg o kcal/kg . Las propiedades extensivas están designadas por un sobrescrito, $\check{V} = MV$, $\check{H} = MH$, volumen total o entalpía total. También se utiliza un sobrescrito para designar cantidades molares: \tilde{V} o \tilde{H} , volumen molar, en $\text{m}^3/\text{mol}\cdot\text{kg}$, o entalpía molar, $\text{kcal}/\text{mol}\cdot\text{kg}$. El sobrescrito se utiliza también para distinguir entre G , flujo de masa, en $\text{kg}/(\text{hr})(\text{m}^2)$, y \tilde{G} , flujo molar en $\text{mol}\cdot\text{kg}/(\text{hr})(\text{m}^2)$; fracción de masa, x_A , y fracción molar, \tilde{x}_A ; y otros símbolos similares.

Las dimensiones de las variables utilizadas pueden ser deducidas de las unidades dadas en la tabla de notación. Es obvio que otro sistema consistente de unidades podría reemplazar al sistema kg fuerza, kg , m , seg , kcal , $^\circ\text{C}$ utilizado. Por ejemplo, la viscosidad μ tiene en la tabla las unidades $\text{kg}/(\text{m})(\text{seg})$ y por lo tanto las dimensiones de $[M]/[L][\theta]$. En el sistema cgs se convierte en $\text{g}/(\text{cm})(\text{seg})$ o poise; en el sistema ingenieril inglés, $\text{lb}/(\text{ft})(\text{hr})$. Las conversiones numéricas pueden ser realizadas con la ayuda de tablas apropiadas existentes en manuales.

Ejemplo 1-1. Como veremos, la viscosidad μ está relacionada con la tensión de cizalla τ y el gradiente de velocidad du/dy por la ecuación

$$\mu = \frac{g_c \tau}{du/dy}$$

Vamos a demostrar que esta ecuación es dimensionalmente homogénea en el sistema de la tabla de notación y en el sistema mks.

Sustituyendo las unidades en el segundo miembro de la ecuación, se obtiene

$$\frac{(\text{kg})(\text{m})}{(\text{kg fuerza})(\text{seg}^2)} \times \frac{(\text{kg fuerza})/(\text{m}^2)}{\text{m}/(\text{seg})(\text{m})}$$

o sea, $\text{kg}/(\text{seg})(\text{m})$, las unidades de la viscosidad. En el sistema mks, g_c se convierte en $(\text{kg}) \times (\text{m})/(\text{N})(\text{seg}^2)$, y la definición de 1 newton [Ec. (1.3)] implica que g_c es el número adimensional 1. Por lo tanto, μ es

$$\frac{1 \times (\text{N}/\text{m}^2)}{(\text{m})/[(\text{seg})(\text{m})]} = \frac{(\text{seg})(\text{N})}{\text{m}^2}$$

o el equivalente $\text{kg}/(\text{seg})(\text{m})$.

////

Es interesante observar que la utilización de g_c está implicada incluso en muchas aplicaciones prácticas del sistema métrico. Si en una estación de servicio, en Europa, se comprueba la presión de unos neumáticos, no se registrará en pascals (SI, N/m^2) o en bars (10^6 dinas/cm²), sino como "1800 gramos". Esto significa g fuerza/cm²; en este sistema de unidades, g_c es $980 (g)(cm)/(g \text{ fuerza})(seg^2)$.

TABLA DE NOTACIÓN

<i>Símbolo</i>	<i>Explicación</i>	<i>Unidades</i>
A	Área; área de una sección transversal	m ²
\mathcal{A}	Factor de absorción, $\bar{L}/m\bar{G}$	adimensional
A_i	Área interfacial	m ²
B	Caudal del producto de cola o de refinado	kg/hr
C	Velocidad del sonido	m/seg
C_D	Coefficiente de rozamiento	adimensional
C_{D^o}	Valor de C_D en ausencia de flujo global	adimensional
C_D^o	Coefficiente de un orificio definido por la Ec. (6-13)	adimensional
C_o	Calor específico a presión constante	kcal/(kg)(°C)
C_p	Calor húmedo definido por la Ec. (36-46)	kcal/(kg)(°C)
C_{pH}	Coefficiente de un rotámetro definido por la Ec. (6-16)	adimensional
C_v	Calor específico a volumen constante	kcal/(kg)(°C)
	Coefficiente de Venturi definido por la Ec. (6-11)	adimensional
D	Diámetro	m
	Caudal de destilado o de extracto	kg/hr
D_{AB}	Difusividad de A a través de B	m ² /hr
D_{ABe}	Difusividad turbulenta	m ² /hr
D_{ABT}	Difusividad térmica	kg/(hr)(m)
D/D_0	Operador derivada substancial	seg ⁻¹
E	Energía total definida por la Ec. (4-2)	(m)(kg fuerza)/kg
E_G	Eficacia de Murphree de una etapa para la fase vapor	adimensional
E_{GP}	Eficacia de Murphree para la fase vapor en un punto	adimensional
E_o	Eficacia global	adimensional
Eu	Número de Euler, $g_c p / u^2 \rho$	adimensional
F	Velocidad de alimentación	kg/hr
\check{F}_d	Fuerza de rozamiento	kg fuerza
\check{F}_g	Fuerza de gravedad	kg fuerza
\check{F}_{xd}	Fuerza en la dirección x debida al rozamiento en la superficie de control	kg fuerza
\check{F}_{xp}	Fuerza en la dirección x debida a la diferencia de presiones	kg fuerza
$\check{F}_x, \check{F}_y, \check{F}_z$	Componentes del vector fuerza	kg fuerza
$F_{12}, \bar{F}_{12}, \mathcal{F}_{12}$	Factores de visión para la transferencia de calor por radiación	adimensional
Fr	Número de Froude, u^2/gL	adimensional
G	Velocidad másica de la fase V	kg/(hr)(m ²)
G_B	Velocidad másica del componente B	kg/(hr)(m ²)
Gr	Número de Grashof, $gL^3\beta\Delta t/v^2$	adimensional
H	Entalpía	kcal/kg
H_A, H_x, H_y	Entalpía del componente A , de la fase L , o de la fase V	kcal/kg

TABLA DE NOTACIÓN (Continuación)

<i>Símbolo</i>	<i>Explicación</i>	<i>Unidades</i>
H_G, H_L	Altura de una unidad individual de transferencia	m
H_{OG}, H_{OL}	Altura de la unidad global de transferencia	m
H_{ix}, H_{iy}	Altura de la unidad de transferencia para la transmisión de calor	m
I	Intensidad de turbulencia	adimensional
	Intensidad de energía radiante	kcal/(hr)(m ²)
\bar{J}_A	Densidad de flujo de A con respecto a u	moles kg/(hr)(m ²)
J	Equivalente mecánico del calor, 426,7	(m)(kg fuerza)/kcal
J_A	Densidad de flujo de A con respecto a u	kg/(hr)(m ²)
K	Índice de consistencia	[(kg)(m)/seg ⁿ]
	Constante de la Ec. (12-40)	adimensional
K_A	Relación de vaporización en el equilibrio,	adimensional
K_{ABT}	Relación de difusión térmica	adimensional
$K_\rho, K_x, K_y, K_{\bar{x}}, K_{\bar{y}}$	Coefficientes globales de transferencia de calor	
L	Velocidad másica de la fase L	kg/(hr)(m ²)
	Longitud; espesor; escala de turbulencia	m
L_{AB}	Coefficiente fenomenológico definido por la Ec. (29-5)	mol kg/(m)(hr)(kcal)
L_C	Velocidad másica de C	kg/(hr)(m ²)
L_e	Longitud de entrada	m
L_f	Espesor de la torta	m
Le	Número de Lewis,	adimensional
M	Masa	kg
M_c	Masa de torta de filtración	kg
M_A, M_B, M_m	Peso molecular	kg/mol kg
Ma	Número de Match, u/C	adimensional
N	Número de etapas; número de tubos	adimensional
	Densidad de flujo con respecto a unos ejes fijos	kg/(hr)(m ²)
N_A	Densidad de flujo de A con respecto a unos ejes fijos	kg/(hr)(m ²)
N_p		
N_1	Número de partículas	adimensional
Nu	Número de filas de tubos	adimensional
Nu_a	Número de Nusselt, hL/k	adimensional
Nu_m	Número de Nusselt, h_aL/k	adimensional
Nu_x	Número de Nusselt medio h_mL/k	adimensional
O	Número de Nusselt local h_{xx}/k	adimensional
O_C	Velocidad de flujo de la fase L	kg/hr
P	Velocidad de flujo del componente C	kg/hr
	Presión aguas arriba	kg fuerza/m ²
	Potencia	(m)(kg fuerza)(seg)
$\bar{P}_x, \bar{P}_y, \bar{P}_z$	Componentes del vector cantidad de movimiento	(kg)(m)/seg
Pe	Número de Peclet,	adimensional
Pr	Número de Prandtl, $Cp\mu/k$	adimensional
Q	Calor absorbido por unidad de masa	kcal/kg
R	Velocidad de secado	kg/(hr)(m ²)
	Resistencia a la transferencia de calor	(°C)(hr)/kcal
R_i	Recuperación fraccionaria de la pérdida de carga	adimensional
R_m	Velocidad de generación de i	kg/hr
R_x, R_y, R_z	Resistencia al flujo del medio filtrante	m ⁻¹
$R(y)$	Componentes del vector fuerza resultante	kg fuerza
Re	Coefficiente de correlación	adimensional
Re_L	Número de Reynolds, $Du_{b\rho}/\mu$	adimensional
Re_p	Número de Reynolds, Lu_{op}/μ	adimensional
	Número de Reynolds, $Du_{b\rho}/(1 - \epsilon)$	adimensional

TABLA DE NOTACIÓN (Continuación)

Símbolo	Explicación	Unidades
Re_x	Número de Reynolds, $x_0\rho/\mu$	adimensional
S	Entropía	kcal/(kg)(°C)
\mathcal{S}	Factor de desorción, $m\tilde{G}/\tilde{L}$	adimensional
S_p	Área de la superficie de una partícula	m ²
S_v	Superficie específica, S_p/v_p	m ⁻¹
Sc	Número de Schmidt, $\mu/\rho D_{AB}$	adimensional
Sh	Número de Sherwood, $k_p L/D_{AB}$	adimensional
St	Número de Stanton, $h/C_p \mu \rho$	adimensional
T	Temperatura absoluta	°K
T_o	Temperatura de estancamiento	°K
U	Energía interna	kcal/kg
	Coefficiente global de transmisión de calor	kcal/(hr)(m ²)(°C)
V	Volumen específico	m ³ /kg
	Velocidad de flujo de la fase V	kg/hr
V_B	Velocidad de flujo del componente B	kg/hr
V_f	Volumen de filtrado	m ³
\tilde{V}_f	Volumen del flotador de un rotámetro	m ³
W	Trabajo realizado por unidad de masa	(m)(kg fuerza)/kg
	Densidad de flujo de energía radiante	kcal/(hr)(m ²)
	Densidad de flujo de energía radiante en el intervalo de λ a $\lambda + d\lambda$ dividido por $d\lambda$	kcal/(hr)(m ³)
$W_{B\lambda}$	Trabajo de árbol por unidad de masa	(m)(kg fuerza)/kg
W_s	Velocidad a la que se realiza un trabajo	(m)(kg fuerza)/hr
\tilde{W}_s	Velocidad de trabajo de árbol	(m)(kg fuerza)/hr
We	Número de Weber, $\rho u^2 L/\sigma$	adimensional
X, Y, Z	Componentes de la fuerza de campo	kg fuerza/kg
X_A	Proporción de masa de A en la fase L	adimensional
X_c	Humedad crítica	adimensional
X_e	Humedad de equilibrio	adimensional
Y	Corrección para Δt_{lm}	adimensional
Y_A	Proporción de masa de A en la fase V	adimensional
a	Área interfacial por unidad de volumen	m ² /m ³
a_A	Actividad del componente A	adimensional
a_x, a_y, a_z	Componentes de la aceleración a	m/seg ²
e	Altura efectiva de la rugosidad	m
f	Factor de fricción, $g_c D l w_f / 2 L u_b^2$	adimensional
f_p	Factor de fricción definido por la Ec. (14-21)	adimensional
g	Aceleración de la gravedad	m/seg ²
g_c	Constante, 9,81	(kg)(m)/(kg f.)(seg ²)
h	Coefficiente individual de transmisión de calor	kcal/(hr)(m ²)(°C)
h_a	Valor de h basado en Δt media aritmética	kcal/(hr)(m ²)(°C)
h_d	Coefficiente de ensuciamiento	kcal/(hr)(m ²)(°C)
h_{lm}	Valor de h basado en Δt media logarítmica	kcal/(hr)(m ²)(°C)
h_m	Valor medio de h (t_s constante)	kcal/(hr)(m ²)(°C)
h_r	Coefficiente de transmisión de calor por radiación	kcal/(hr)(m ²)(°C)
h_x	Valor local de h	kcal/(hr)(m ²)(°C)
h^o	Valor de h en ausencia de flujo global	kcal/(hr)(m ²)(°C)
\tilde{h}_R, \tilde{h}_n	Entalpía	kcal/mol kg
j_H	Factor j de Colburn para transferencia de calor	adimensional
j_M	Factor j de Colburn para transferencia de materia	adimensional
k	Conductividad calorífica	kcal/(hr)(m)(°C)
	Relación de calores específicos, C_p/C_v	adimensional

TABLA DE NOTACIÓN (Continuación)

Símbolo	Explicación	Unidades
k_x, k_y	Coefficiente individual de transferencia de materia basado en Δx_A o Δy_A	kg/(hr)(m ²)
$k_{\bar{x}}, k_{\bar{y}}$	Coefficiente individual de transferencia de materia basado en $\Delta \bar{x}_A$ o $\Delta \bar{y}_A$	mol kg/(hr)(m ²)
k_ρ	Coefficiente individual de transferencia de materia basado en $\Delta \rho_A$	m/hr
k_x^o, k_y^o	Valor de k_x o k_y en ausencia de flujo global	kg/(hr)(m ²)
k_ρ^o	Valor de k_ρ en ausencia de flujo global	m/hr
k'_ρ	Coefficiente de transferencia de materia definido por la Ec. (36-7)	m/hr
ℓ	Longitud de mezcla de Prandtl	m
lw	Fricción o trabajo perdido	(m)(kg fuerza)/kg
lw_f	lw debido únicamente a la fricción en la tubería	(m)(kg fuerza)/kg
m	Relación de masa entre la torta filtrante húmeda y seca; número de etapa; constante de la relación de equilibrio $\bar{y}_A = m\bar{x}_A$	adimensional
n	Índice de comportamiento del flujo; número de etapa	adimensional
n_G, n_L, n_{OG}, n_{OL}	Número de unidades de transferencia	adimensional
P	Presión total	kg fuerza/m ²
p_A	Presión de vapor de A	kg fuerza/m ²
\bar{p}_A	Presión parcial de A	kg fuerza/m ²
p_i	Presión en el medio filtrante	kg fuerza/m ²
p_o	Presión de estancamiento; presión de la corriente libre	kg fuerza/m ²
p_s	Tensión mecánica sobre la torta filtrante	kg fuerza/m ²
q	Velocidad de transmisión de calor	kcal/hr
	Velocidad volumétrica de flujo	m ³ /hr
	Moles de líquido producido en el plato de alimentación por mol de alimentación	adimensional
r	Radio	m
r_H	Radio hidráulico	m
r_A, r_i	Velocidad de generación de A o i	kg/(hr)(m ³)
S	Fracción de masa de sólido en una suspensión	adimensional
	Velocidad fraccionaria de renovación de superficie	seg ⁻¹
t	Temperatura	°C
t_{as}	Temperatura de saturación adiabática	°C
t_b	Temperatura media o de mezcla	°C
t_m	Temperatura del medio fluido	°C
t_o, t_∞	Temperatura en el exterior de la capa límite	°C
$t_{s\ell}$	Temperatura de la superficie	°C
t_{sv}	Temperatura del vapor saturado	°C
t_s	Temperatura del líquido saturado	°C
t_{wb}	Temperatura húmeda	°C
u	Velocidad; módulo del vector velocidad	m/seg
u_b	Velocidad media	m/seg
u_{br}	Velocidad en el anillo del rotámetro	m/seg
u_{bs}	Velocidad superficial	m/seg
u_o	Velocidad en el exterior de la capa límite	m/seg
u_x, u_y, u_z	Componentes del vector velocidad	m/seg
u_{ys}	Velocidad normal a la superficie, en la superficie	m/seg
u'_x, u'_y, u'_z	Componentes de la velocidad fluctuante	m/seg
$\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$	Componentes de la velocidad media temporal	m/seg

TABLA DE NOTACIÓN (Continuación)

Símbolo	Explicación	Unidades
u^*	Velocidad de fricción	m/seg
u^+	u/u^*	adimensional
v_p	Volumen de una partícula	m^3
w	Velocidad de flujo de masa	kg/hr
x, y, z	Distancias en coordenadas cartesianas.	m
x	Distancia desde el borde de ataque	m
x_A	Fracción en masa de A, especialmente en la fase L	adimensional
x_e	Espesor de la película de condensado	m
y	Distancia desde la superficie	m
y_A	Fracción en masa de A, especialmente en la fase V	adimensional
y^+	$y u^*/\nu$	adimensional
z	Altura de la torre; altura de fluido en un manómetro	m
α	Ángulo entre el vector velocidad y la normal hacia el exterior de la superficie de control	radianes
	Difusividad térmica, $k/\rho C_p$	m^2/hr
	Resistencia específica de la torta	m/kg
	Coefficiente de absorción; volatilidad relativa	adimensionales
α_{AB}	Volatilidad relativa de A con respecto a B	adimensional
α_e	Difusividad térmica de remolino	m^2/hr
β	Ángulo entre la dirección x y la vertical hacia abajo	radianes
	Relación de diámetros	adimensional
	Coefficiente de expansión térmica	$(^\circ K)^{-1}$
Γ	Flujo de materia por unidad de perímetro	kg/(hr)(m)
γ	Velocidad de variación del ángulo ϕ	radianes/seg
γ_A	Coefficiente de actividad del componente A	adimensional
Δ	Operador que indica final menos inicial, o salida menos entrada; por ejemplo, $\Delta w = w_2 - w_1$	adimensional
	Flujo neto hacia el extremo de una cascada	kg/hr
δ	Espesor de la capa límite	m
δ_c	Espesor de la capa límite de concentración	m
δ_m	Espesor de película	m
δ_{th}	Espesor de la capa térmica límite	m
ε	Fracción de huecos; emisividad	adimensional
η	Distancia adimensional, $y\sqrt{u_o}/\nu x$	adimensional
η_f	Eficacia de una aleta	adimensional
η_p, η_t	Rendimiento de una bomba o una turbina	adimensional
θ	Tiempo	seg
	Ángulo en coordenadas polares	radianes
Λ	Número de Kármán, $Re\sqrt{f}$	adimensional
λ	Calor latente	kcal/kg
	Longitud de onda	m
μ	Viscosidad	kg/(m)(seg)
μ_A	Potencial químico de A	kcal/mol kg
ν	Viscosidad cinemática	m^2/hr
ν_e	Viscosidad cinemática de remolino	m^2/hr
ρ	Densidad	kg/ m^3
	Reflexividad	adimensional
ρ_A	Concentración de A	kg/ m^3
ρ_{Am}	Concentración de A en un medio fluido	kg/ m^3

TABLA DE NOTACIÓN (Continuación)

<i>Símbolo</i>	<i>Explicación</i>	<i>Unidades</i>
ρ_{A_0}	Concentración de A en el exterior de la capa límite	kg/m ³
ρ_{A_s}	Concentración de A en la superficie	kg/m ³
ρ_s	Densidad de un sólido	kg/m ³
σ	Tensión superficial	kg/m ³
	Constante de Stefan-Boltzmann	kcal/(hr)(m ²)(°K) ⁴
τ	Transmisividad	adimensional
	Esfuerzo cortante	kg fuerza/m ²
τ_s	Esfuerzo cortante en la superficie	kg fuerza/m ²
$\bar{\tau}^t$	Esfuerzo total	kg fuerza/m ²
$\bar{\tau}^r$	Esfuerzo de Reynolds	kg fuerza/m ²
Φ	Función de disipación	kg/m ³
ϕ	Ángulo definido en la Fig. 9-4; variable angular en coordenadas esféricas	radianes
	Función de potencial	m ² /seg
ψ	Función de corriente	m ² /seg
Ω	Energía potencial	(m)(kg fuerza)/kg
ω	Velocidad angular	radianes/seg

PARTE 1

Dinámica de fluidos

2

Introducción al comportamiento de los fluidos

Muchos de los problemas que surgen en el estudio de los procesos pueden ser resueltos mediante una consideración del proceso desde un punto de vista exterior al mismo. Los cambios que ocurren dentro del recinto físico serán medidos por medio de las propiedades de las corrientes de entrada y salida y los intercambios de energía, en forma de calor y trabajo, entre el sistema y sus alrededores. Este enfoque trae inmediatamente a la mente la idea de un sistema termodinámico y la subsiguiente aplicación del primer principio de la termodinámica. Lo que se va a denominar *balance global de energía* es sencillamente la aplicación de la termodinámica a una situación general.

Las mismas observaciones valen también para el caso más sencillo —el balance global de materia— y su relación con el concepto usual de balance de materiales utilizado en los estudios estequiométricos. El balance global de fuerzas, implicando flujos de cantidad de movimiento en vez de energía o masa, quizás resulte menos familiar al estudiante.

Utilizamos el término *global* para referirnos a estos balances debido a nuestro punto de vista exterior al recinto; los detalles de lo que sucede dentro no entran en el análisis. Sin embargo, en muchas ocasiones desearíamos tener en cuenta los detalles del proceso que tiene lugar dentro del recinto

y, para conseguirlo, será útil realizar balances similares para un elemento de volumen pequeño o diferencial. Estos balances diferenciales podrán a continuación ser integrados para situaciones en las cuales conozcamos algunas de las propiedades características de un fluido, tal como la viscosidad de un líquido newtoniano. Por este método de análisis podemos obtener una representación detallada de lo que suceda dentro del recinto del proceso. Por ejemplo, la distribución de velocidades puede ser determinada por un análisis diferencial, mientras que las velocidades medias de entrada y salida son todo lo que pueda tenerse en consideración en un balance global.

Los balances globales pueden obtenerse, en general, mediante la integración de los balances diferenciales; recíprocamente, estos últimos pueden obtenerse por la reducción del recinto considerado a un volumen diferencial. Por razones de claridad y para evitar ciertas complicaciones matemáticas, en este libro los dos tipos de balance serán deducidos independientemente; empezaremos por el balance global debido a su relativa sencillez y a su utilidad en la resolución de muchos problemas.

A pesar de que los balances globales de materia, energía y cantidad de movimiento pueden ser deducidos y utilizados sin una consideración extensa de los detalles del comportamiento del fluido, será útil tener unas ideas preliminares sobre la naturaleza de un fluido y de su flujo.

Viscosidad de fluidos newtonianos

En el estudio de la viscosidad distinguiremos un fluido de un sólido por su comportamiento al estar sometidos a una fuerza. Mientras que un sólido elástico se deforma proporcionalmente a la fuerza aplicada, un fluido en similares circunstancias continúa deformándose —es decir, fluyendo— a una velocidad que aumenta al aumentar el esfuerzo aplicado. Estas ideas quedarán más claras con una definición cuantitativa de la viscosidad. En la Fig. 2-1 un fluido en movimiento laminar está contenido entre dos láminas paralelas infinitas.

Si la lámina superior se mueve con velocidad constante con respecto a la inferior, tendrá lugar una variación estacionaria de velocidad en el fluido comprendido entre las dos láminas. Para fluidos newtonianos, la tensión de cizalla o esfuerzo cortante τ (la fuerza aplicada por unidad de área de la lámina necesaria para mantener una velocidad constante) es proporcional a Δu e inversamente proporcional a Δy .