



Modelamiento de los fenómenos de transporte
Teoría, problemas y resultados de investigaciones
Autor: ©Luis Carrasco Venegas

© Derechos de autor reservados 2018 respecto a la primera edición en español

© Derechos de edición, arte gráfico y diagramación reservados:
Empresa Editora Macro EIRL

Pares revisores:

Dr. Antonio Sánchez Solís - Docente titular de la Universidad Nacional Autónoma de México
Dr. Alfredo Palomino Infante - Docente principal de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Edición académica:
Luis Carrasco Venegas

Diseño de portada:
Fernando Cavassa Repetto

Diagramación:
Julissa Ventocilla Fernández

Diseño de interiores e ilustración:
José Eduardo Siesquén Aquije

Corrección de estilo:
Marilú Sujey Alberto Mamani

Edición gráfica y diagramación a cargo de
© Empresa Editora Macro EIRL
Av. Paseo de la República N.° 5613, Miraflores (Lima, Perú)

☎ Teléfono: (511) 748 0560
✉ E-mail: proyectoeditorial@editorialmacro.com
🌐 Página web: www.editorialmacro.com

Primera edición: setiembre 2018
Tiraje: 1000 ejemplares

Impresión:
Talleres gráficos de la Empresa Editora Macro EIRL
Jr. San Agustín N.° 612-624, Surquillo (Lima, Perú)
Setiembre 2018

ISBN N.° 978-612-304-557-9
Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N.° 2018-04948

Prohibida la reproducción parcial o total, por cualquier medio o método, de este libro sin previa autorización del autor.

Pedidos del texto impreso a nivel nacional e internacional: Directamente con el autor al (51) 946 034 991 (51) 996 230 230, o al correo electrónico clave012@yahoo.es.

Pedidos del texto en versión electrónica desde fuera del país a través del correo electrónico clave012@yahoo.es o mediante la página web <https://www.luiscarrascovenegas.com>.

1.1 El fluido desde el punto de vista de los fenómenos de transporte	19
1.2 Viscosidad.....	20
1.3 Estimación de la viscosidad de los fluidos.....	20
1.4 Viscosidad de líquidos.....	34
1.5 Clasificación de los materiales.....	37
1.6 Fluidos newtonianos	37
1.7 Desarrollo del perfil de velocidades	39
1.8 Clasificación del flujo de fluidos.....	48
1.9 Regímenes de flujo.....	49
1.10 Balance de cantidad de movimiento en un volumen de control	52
1.11 Fluidos no newtonianos.....	95
1.12 Determinación de los parámetros de los fluidos no newtonianos.....	105
1.13 Parámetros de flujo de fluidos no newtonianos.....	122
1.14 Modelo de Bingham	127
1.15 Parámetros de flujo en coordenadas cilíndricas.....	134
1.16 Ecuaciones variacionales de conservación o ecuaciones de conservación de materia y cantidad de movimiento	144
1.17 Punto de vista de Euler vs. punto de vista de Lagrange	146
1.18 Ecuación de continuidad	149
1.19 Ecuación de conservación de cantidad de movimiento desde el punto de vista microscópico	151
1.20 Otro método de deducción de la ecuación de continuidad	155
1.21 Otro enfoque de la deducción de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento.....	157
1.22 Transporte de cantidad de movimiento en régimen no estacionario y bidimensional.....	195

2

Capítulo

Transporte molecular de energía calorífica

219

2.1 Introducción	219
2.2 Mecanismos de transferencia de calor	220
2.3 Balance de energía en régimen estacionario.....	241
2.4 Transferencia de calor en paredes compuestas	255
2.5 Superficies extendidas o aletas de enfriamiento.....	266
2.6 Transferencia de energía con generación	302
2.7 Ecuación de conservación de energía	328

3

Capítulo

Transporte molecular de materia

355

3.1 Introducción	355
3.2 Ósmosis y ósmosis inversa.....	355
3.3 Diálisis.....	356
3.4 Difusión	356
3.5 Conceptos complementarios asociados a la transferencia de masa	357
3.6 Mecanismos de transferencia de materia	363
3.7 Ecuación general del transporte de masa molecular	364
3.8 Primera ley de Fick para difusión molecular	364
3.9 Difusión molecular y convectiva.....	367
3.10 Coeficiente de difusión de sistemas multicomponente.....	368
3.11 Difusión molecular en líquidos	370
3.12 Estimación de los coeficientes de difusión de gases a baja presión	371
3.13 Estimación de la difusividad de mezclas líquidas binarias por el método de Wilke-Chang	374

3.14 Introducción a los balances de materia considerando los volúmenes de control	379
3.15 Difusión y reacción química simultánea: factor de efectividad homogénea.....	420
3.16 Ecuación general de transferencia de masa	439
3.17 Distribución de concentración en un plato semicircular.....	475
3.18 Distribución de concentración y factores de efectividad isotérmico en partícula	486
3.19 Distribución de concentración y factor de efectividad no isotérmico en partículas catalíticas.....	502
3.20 Diseño de reactores catalíticos de lecho fijo	522

4

Capítulo

Balance macroscópico de cantidad de movimiento

555

4.1 Balance de cantidad de movimiento unidireccional	555
4.2 Balance de cantidad de movimiento en dos direcciones	561
4.3 Balance de cantidad de movimiento en un codo convergente	562
4.4 Balance macroscópico de cantidad de movimiento en un álabe fijo.....	567
4.5 Balance de cantidad de movimiento en un álabe móvil.....	569

5

Capítulo

Balance macroscópico de materia

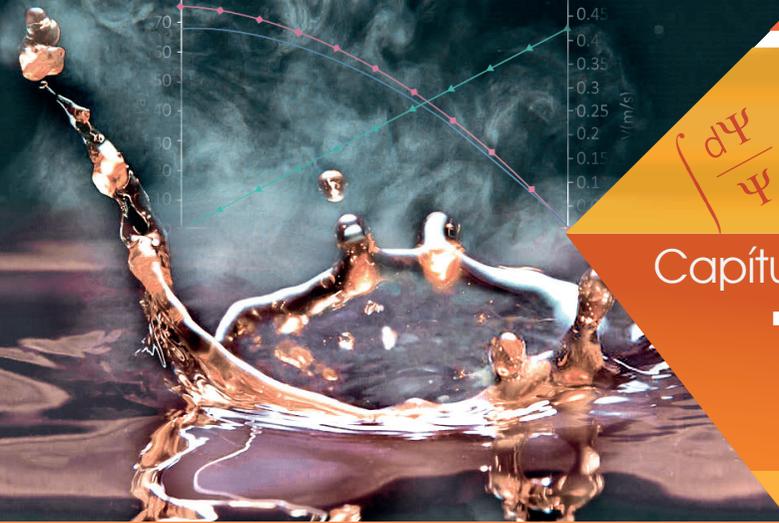
579

5.1 Balance macroscópico en sistemas no reaccionante.....	579
5.2 Balance de la materia en sistemas no reaccionantes que contienen solutos.....	606
5.3 Balance de masa de sistemas reaccionantes	618

6.1 Ecuación de balance macroscópico de energía para sistemas cerrados no reaccionantes	637
6.2 Balance macroscópico de energía para sistemas reaccionantes abiertos y cerrados	639
6.3 Balance macroscópico de energía mecánica en un proceso isotérmico	688
6.4 Balance macroscópico de energía mecánica en condiciones no isotérmicas para sistemas no reaccionantes	690
6.5 Balance macroscópico de energía para flujo compresible	713
6.6 Flujo adiabático de un gas ideal en una tubería horizontal	717
6.7 Condiciones de velocidad máxima y relación crítica de presión	721

7.1 Introducción	725
7.2 Dispersión de contaminantes en fase acuosa	725
7.3 Cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal.....	730
7.4 Modelamiento de la dispersión de contaminantes solubles con dispersión longitudinal	736
7.5 Modelamiento de la dispersión de contaminantes solubles con dispersiones longitudinal y lateral.....	741
7.6 Modelamiento de la dispersión de contaminantes solubles con dispersiones longitudinal, lateral y vertical en régimen turbulento.....	745
7.7 Modelamiento de la dispersión de contaminantes solubles con dispersiones longitudinal, lateral y vertical en régimen laminar	750
7.8 Dispersión de contaminante en fase gaseosa	753

ANEXO 1 Introducción al cálculo vectorial y tensorial.....	783
ANEXO 2 Longitudes, áreas y volúmenes diferenciales en diversos sistemas de coordenadas	786
ANEXO 3 Sistema general de coordenadas y sus equivalencias.....	788
ANEXO 4 Valores promedio de funciones.....	791
ANEXO 5 Aplicación del producto escalar de vectores	793
ANEXO 6 Cálculo del caudal usando una integral cerrada	794
ANEXO 7 Regresión lineal, multilineal y no lineal	796
ANEXO 8 Ecuaciones de conservación o ecuaciones variacionales	800
ANEXO 9 Ecuaciones del balance macroscópico	807
ANEXO 10 Analogía de los fenómenos de transporte	811



Capítulo

1

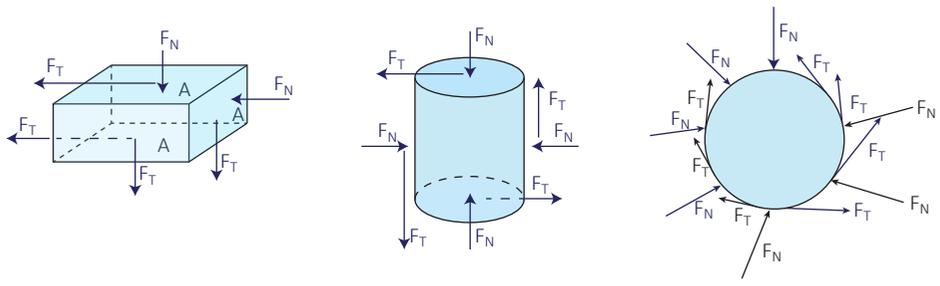
TRANSPORTE MOLECULAR DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

1.1 El fluido desde el punto de vista de los fenómenos de transporte

Es una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo de corte (denominado también esfuerzo cortante). Así, en ausencia de dicho esfuerzo, el fluido no sufrirá deformación alguna.

Un fluido es capaz de soportar la acción de dos tipos de fuerza: fuerza tangencial (F_T) por unidad de área (A), cuyo cociente se denomina esfuerzo de corte (τ), y fuerza normal (F_N) por unidad de área (A), cuyo cociente se denomina presión (P). En la figura 1.1 se esquematiza este hecho.

Figura 1.1 Esquema de las fuerzas normales (F_N) y fuerzas tangenciales (F_T) aplicadas a una porción de fluido.



Los diversos fluidos se clasifican en función de su comportamiento reológico en tres tipos:

- a) *Fluidos newtonianos*, cuando la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte es constante.
- b) *Fluidos no newtonianos*, cuando la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte es variable.
- c) *Fluidos viscoelásticos*, que poseen propiedades de fluido y sólido.

1.2 Viscosidad

Es una propiedad física de los materiales que consiste en la medida de la deformación de un fluido cuando se aplica una fuerza tangencial (F_t) por unidad de área (A).

La viscosidad es una propiedad de transporte que poseen los fluidos (líquidos y gases) a diversas condiciones de presión y temperatura, las mismas que tienen influencia sobre dicha propiedad y su conocimiento es fundamental para el dimensionamiento de los equipos de ingeniería.

1.3 Estimación de la viscosidad de los fluidos

1.3.1 Gases puros a baja presión

Existe una serie de correlaciones para el cálculo de la viscosidad de los gases a baja presión; sin embargo, la relación derivada de la teoría cinética molecular es una de las más utilizadas y se representa de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{26.69\sqrt{MT}}{\sigma^2\Omega_v} \quad (1.1)$$

donde

μ : es la viscosidad de la mezcla en micropoises.

σ : es el diámetro de colisión en Å.

Ω_v : es la integral de colisión, el cual es un parámetro adimensional que es una función ligeramente decreciente de la temperatura adimensional dada por $T^* = T/(\varepsilon/k)$.

ε : es la energía característica de interacción entre las moléculas (energía máxima de atracción entre dichas moléculas).

k : es la constante de Boltzmann.

M : es la masa molecular del gas.

Si el gas está constituido por esferas rígidas de diámetro σ (en lugar de moléculas reales con fuerzas de atracción y repulsión), Ω_v será igual a 1; por tanto Ω_v puede interpretarse como la desviación respecto al comportamiento de la esfera rígida.

a) Gases no polares

Se ha comprobado experimentalmente que, para grandes distancias entre moléculas, dichas fuerzas son de atracción e inversamente proporcionales a la distancia, y que cuando las moléculas se aproximan a distancias muy pequeñas, surgen fuerzas repulsivas entre ellas que varían mucho más rápido con la distancia.

Esta conducta se explica si la energía potencial (E_p) del sistema formado por dos moléculas varía con la distancia, tal como se muestra en la figura 1.2.

Según la teoría de Chapman y Enskog, cuyos trabajos fueron desarrollados de forma independiente, la energía potencial ($E_p(r)$) está relacionada con las fuerzas de interacción así:

$$F = -\frac{dE_p(r)}{dr} \quad (1.2)$$

En la ecuación, r es la distancia entre moléculas. No se conoce la forma exacta de la función $E_p(r)$, pero los resultados experimentales indican que una función empírica muy satisfactoria para las moléculas polares es el potencial de Lennard-Jones.

$$E_p(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (1.3)$$