



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 | Coefficiente 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 |

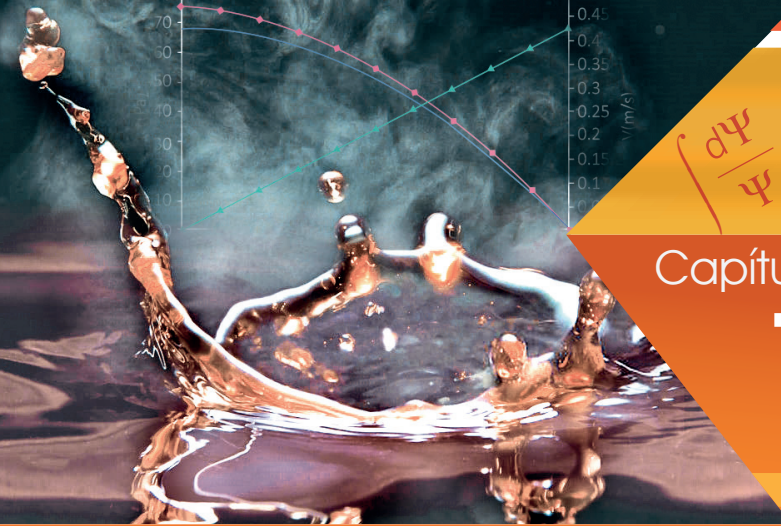
5 **Capítulo** Balance macroscópico de materia 579

| | |
|---|-----|
| 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

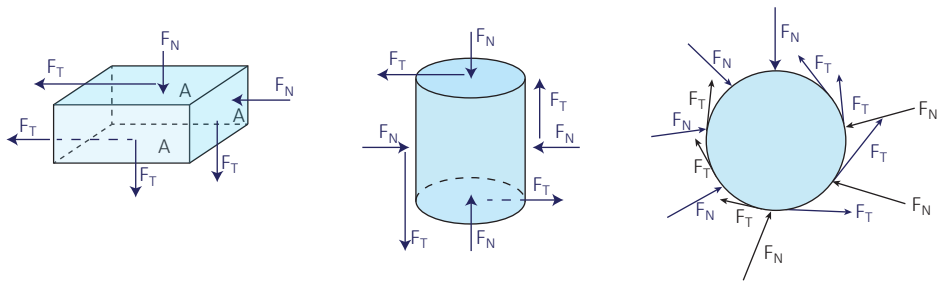
TRANSPORTE MOLECULAR DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

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.

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