

# **MECÁNICA DE FLUIDOS**

CAUDEX VITELIO PEÑARANDA OSORIO

*SEGUNDA EDICIÓN*

Peñaranda Osorio, Caudex Vitelio, autor

Mecánica de fluidos / Caudex Vitelio Peñaranda Osorio. -- Segunda edición. -- Bogotá: Ecoe Ediciones, 2024.

320 páginas, il., col.; 17x24 cm - (Matemáticas y Ciencias. Física: mecánica de fluidos).

Incluye datos curriculares del autor -- Incluye referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-508-295-3 (impreso) - 978-958-508-296-0 (pdf) - 978-958-508-297-7 (digital)

1. Estática de fluidos 2. Dinámica de fluidos 3. Propiedades de los fluidos I. Peñaranda Osorio, Caudex Vitelio, autor.

CDD: 532.02 Ed. 23

---



**Colección:** Matemáticas y ciencias

**Área:** Física: mecánica de fluidos

**ECOE**  
**EDICIONES**

► Caudex Vitelio Peñaranda Osorio

© Ecoe Ediciones Ltda.

e-mail: [info@ecoeediciones.com](mailto:info@ecoeediciones.com)

[www.ecoeediciones.com](http://www.ecoeediciones.com)

Carrera 19 # 63C 32, Tel.: 248 14 49

Bogotá, Colombia

► Cita sugerida: Peñaranda Osorio, C.V. (2024). *Mecánica de fluidos*. Ecoe Ediciones.

**Primera edición:** Bogotá, agosto de 2018

**Segunda edición:** Bogotá, julio de 2024

**ISBN:** 978-958-508-295-3

**e-ISBN (PDF):** 978-958-508-296-0

**e-ISBN (ePub):** 978-958-508-297-7

Coordinadora editorial: Ana María Rueda G.

Coordinadora de producción editorial:

Alejandra Rondón Forero

Editora júnior de contenidos: Alejandra Cely R.

Carátula: Natalia Herrera Farfán

Diagramación: Denise Rodríguez Ríos

Impresión: Carvajal Soluciones

de Comunicación S.A.S.

Carrera 69 #15-24

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio  
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

---

## **Dedicatoria**

A mi esposa María Lourdes,  
mi único y verdadero amor,  
secretaria, correctora de  
pruebas, abogada, consejera,  
enfermera, compañera,  
amante y amiga.

Al doctor Marco Falcón  
Ascanio, ilustre docente  
del IMF de la Universidad  
Central de Venezuela,  
quien no alcanzó  
a disfrutar el café Valdez  
que siempre esperaba con  
mi llegada, aquella triste  
y aciaga tarde caraqueña.

A mis estudiantes de la  
Universidad Distrital  
Francisco José de Caldas.

# CONTENIDO

<b>PRESENTACIÓN</b> .....	XXVII
<b>PREFACIO</b> .....	XXIX
<b>CAPÍTULO 1. NOCIONES GENERALES</b> .....	1
1.1. La mecánica de fluidos y la ingeniería.	
Reseña histórica .....	1
1.2. Sistemas de unidades .....	3
1.2.1. Magnitudes fundamentales y derivadas .....	3
1.2.2. Representación dimensional y la Ley de la homogeneidad dimensional .....	4
1.2.3. Sistema Internacional, Inglés Gravitacional, Técnico Inglés y Cegesimal .....	5
1.2.4. Equivalencias y fracción unitaria .....	8
1.3. Ejercicios .....	11
1.4. Problemas .....	11
<b>CAPÍTULO 2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS</b> .....	13
2.1. Definición de fluido .....	13
2.1.1. Fuerzas superficiales y de cuerpo (máscas). Esfuerzos: tensiones normales .....	14
2.1.2. Tensión en un punto .....	14
2.1.3. Clases de fluidos .....	19
2.2. Propiedades de los fluidos .....	20
2.2.1. Densidad .....	20
2.2.2. Peso específico .....	20
2.2.3. Gravedad específica .....	20
2.2.4. Volumen específico .....	21
2.2.5. Viscosidad dinámica o absoluta .....	21
2.2.6. Viscosidad cinemática .....	22
2.2.7. Presión de vapor .....	22
2.2.8. Tensión superficial .....	23

2.3. Ejercicios .....	26
2.4. Problemas .....	27
<b>CAPÍTULO 3. ESTÁTICA DE LOS FLUIDOS.....</b>	<b>29</b>
3.1. Presión en un punto .....	29
3.2. Ecuación fundamental de la hidrostática. Variación de las presiones en una masa fluida incompresible en reposo .....	30
3.3. Ley de Pascal.....	32
3.4. Prensa hidráulica .....	33
3.5. Presión de los gases .....	33
3.6. Presión atmosférica .....	34
3.7. Unidades de presión.....	35
3.8. Piezómetros y manómetros.....	35
3.8.1. Piezómetros.....	35
3.8.2. Manómetros en U.....	36
3.8.3. Manómetros de líquidos inmiscibles .....	37
3.8.4. Manómetros diferenciales .....	37
3.8.5. Manómetro diferencial compuesto .....	38
3.9. Fuerzas sobre superficies planas .....	40
3.9.1. Fuerzas sobre superficies horizontales.....	40
3.9.2. Fuerzas sobre superficies inclinadas .....	42
3.9.3. Fuerzas sobre superficies verticales.....	45
3.9.4. Fuerza hidrostática sobre superficies curvas.....	46
3.10. Fuerzas en tuberías .....	49
3.11. Principio de Arquímedes. Empuje hidráulico .....	50
3.12. Estabilidad y flotación.....	52
3.13. Traslación y rotación de masas líquidas .....	54
3.13.1. Traslación de masas líquidas. Movimiento lineal.....	55
3.13.2. Rotación de masas líquidas .....	56
3.14. Problemas .....	58
<b>CAPÍTULO 4. FLUJO DE LOS FLUIDOS.....</b>	<b>63</b>
4.1. Método euleriano y lagrangiano.....	63
4.1.1. Método euleriano .....	64
4.1.2. Método lagrangiano .....	64
4.1.3. La derivada material.....	64
4.2. Tipos de flujo.....	67
4.2.1. Fluido ideal o inviscido .....	67
4.2.2. Fluido real o viscoso.....	67
4.2.3. Fluido unidimensional, bidimensional y tridimensional.....	67
4.2.4. Flujo estable e inestable.....	67
4.2.5. Otros tipos de flujo.....	68
4.3. Líneas de corriente, estelas y trayectorias.....	68
4.3.1. Coordenadas de las líneas de corriente .....	69
4.4. Sistema y volumen de control .....	72

4.4.1	Sistema .....	72
4.4.2	Volumen de control.....	72
4.4.3	Representación del volumen de control y del sistema.....	72
4.4.4	Propiedades extensivas e intensivas de un fluido.....	73
4.4.5	Teorema de Transporte de Reynolds .....	74
4.4.6	Generalización del Teorema de Transporte de Reynolds.....	76
4.5	Análisis integral de flujo de fluidos.....	78
4.5.1	Deducción de la ecuación de continuidad mediante el análisis integral de flujo de fluidos .....	79
4.5.2	Deducción de la ecuación de la cantidad de movimiento lineal mediante el análisis integral de flujo de fluidos .....	85
4.5.3	Deducción de la ecuación de momento de la cantidad de movimiento mediante el análisis integral de flujo de fluidos .....	90
4.5.4	Deducción de la ecuación de energía mediante el análisis integral de flujo de fluidos.....	97
4.5.5	Derivación de la ecuación de Bernoulli a partir de la ecuación de energía. Línea de energía y piezométrica .....	100
4.5.6	Flujo estable en la media con fricción.....	102
4.6	Análisis diferencial de flujo de fluidos.....	111
4.6.1	Movimiento de traslación.....	111
4.6.2	Deformación lineal.....	112
4.6.3	Deformación angular .....	113
4.6.4	Deducción de la ecuación de continuidad mediante el análisis diferencial de flujo de fluidos .....	116
4.6.5	Deducción de la ecuación de cantidad de movimiento lineal a partir de las ecuaciones de movimiento mediante el análisis diferencial de flujo de fluidos .....	118
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DIMENSIONAL .....</b>		<b>125</b>
5.1	Conceptos básicos .....	125
5.2	El Teorema $\pi$ de Buckingham.....	125
5.3	Modelos hidráulicos. Similitud hidráulica .....	129
5.3.1	Similitud geométrica .....	130
5.3.2	Similitud cinemática.....	130
5.3.3	Similitud dinámica .....	130
<b>CAPÍTULO 6. TUBERÍAS.....</b>		<b>135</b>
6.1	Pérdidas.....	136
6.1.1	Estudios experimentales sobre el factor de fricción.....	136
6.2	Estimación del diámetro requerido a partir de las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White.....	140
6.3	Diseño de una tubería simple a partir de las pérdidas disponibles y de los caudales de diseño .....	150
6.3.1	Derivación de una útil ecuación de diseño a partir de la combinación de las ecuaciones de Darcy-Weisbach y de Colebrook-White .....	150
6.3.2	Reemplazo de una tubería simple por dos tuberías en serie para aprovechar eficientemente las pérdidas disponibles.....	154
6.4	Tuberías en serie .....	159

6.5	Tuberías en paralelo .....	172
6.5.1	Comprobación del diseño .....	175
6.6	Redes .....	183
6.6.1	Redes abiertas.....	184
6.6.2	Redes cerradas.....	205
6.7	Problemas .....	221
<b>CAPÍTULO 7. DISPOSITIVOS DE AFORO, ORIFICIOS Y COMPUERTAS .....</b>		<b>223</b>
7.1	Venturímetros .....	223
7.2	Tubo Pitot .....	226
7.3	Orificios.....	227
7.4	Orificios con descarga sumergida .....	228
7.5	Compuertas .....	230
<b>CAPÍTULO 8. BOMBAS .....</b>		<b>233</b>
8.1	Clasificación de las bombas.....	233
8.1.1	Bombas de desplazamiento positivo (BDP).....	233
8.1.2	Bombas dinámicas.....	236
8.2	Instalación de una bomba.....	240
8.3	Altura útil o efectiva o altura dinámica total .....	245
8.4	Carga de aspiración neta positiva (CANP) .....	247
8.5	Selección de la bomba .....	248
<b>CAPÍTULO 9. FLUJO CON SUPERFICIE LIBRE .....</b>		<b>259</b>
9.1	Elementos geométricos de la sección de un canal.....	259
9.2	Diferentes tipos de flujo.....	260
9.2.1	Flujo uniforme .....	263
9.3	Concepto de energía específica.....	269
9.4	Momentum y coeficiente de Boussines.....	273
9.5	Fuerza específica .....	277
9.6	Flujo rápidamente variado. Resalto hidráulico .....	279
9.7	Control de flujo .....	285
9.7.1	Vertederos.....	285
9.7.2	Canaleta Parshall .....	287
9.8	Flujo gradualmente variado .....	290
9.8.1	Análisis de los perfiles de flujo.....	293
9.9	Los métodos paso a paso. El método de paso directo.....	295
9.10	Flujo permanente, espacialmente variado.....	301
9.10.1	Flujo con incremento de caudal.....	301
9.10.2	Flujo con disminución de caudal.....	308
9.11	Flujo no permanente .....	310
9.11.1	Flujo no permanente, gradualmente variado.....	311
9.12	Problemas .....	314
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>317</b>

# Sistema de Información en Línea



Al final del libro encontrará el código para ingresar al **Sistema de Información en Línea** - SIL - donde podrá encontrar una serie de presentaciones en Power Point (que deben ser vistas en el modo “presentación con diapositivas”) y que complementan de una manera visual lo estudiado en el libro. Adicionalmente, se adjuntan los apéndices mencionados en el contenido del libro.



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Tensiones ejercidas sobre las caras externas de un paralelepípedo rectangular infinitesimal. ....	14
Figura 2.2.	Elemento infinitesimal de un fluido en reposo o en movimiento uniforme. ....	15
Figura 2.3.	Elemento infinitesimal de un fluido que se mueve en la dirección arbitraria $mn$ . ....	16
Figura 2.4.	Presión $p$ que se supone ejercida sobre las caras más cercanas al centro de coordenadas en un volumen infinitesimal de un fluido. ....	18
Figura 2.5.	Dos placas paralelas que contienen en su interior un fluido. La placa inferior permanece inmóvil, y la superior se mueve con una rapidez $U$ . Se asume que en los contornos las partículas de fluido se adhieren a las paredes. ....	21
Figura 2.6.	Fuerzas de cohesión equilibradas en el interior del fluido y desestabilizadas en la superficie de este, lo que genera una tensión superficial. ....	24
Figura 2.7.	a) Gota esférica con fuerzas de cohesión intermolecular en equilibrio y b) Sección transversal de la esfera que ilustra el equilibrio entre las fuerzas de tensión superficial y las de presión generadas en el interior de la gota. ....	25
Figura 2.8.	Fenómeno de capilaridad. El líquido asciende hasta que el peso de la columna ( $g\pi R^2h$ ) equilibra la componente vertical de la tensión superficial ( $2\pi R\sigma \cos \theta$ ). ....	26
Figura 2.9.	Descenso o depresión del líquido en un tubo capilar. Nótese que el líquido no moja la superficie sólida y el ángulo de contacto con esta es mayor de $90^\circ$ . ....	26
Figura 3.1.	Fuerzas sobre un elemento diferencial de fluido en forma de cuña. ....	29
Figura 3.2.	Presión a una profundidad $h$ de un fluido incompresible con superficie libre. ....	32
Figura 3.3.	Líquido confinado lateralmente y en el fondo con fronteras indeformables al cual se aplica en la superficie una presión $p_0$ diferente a la atmosférica. ....	32
Figura 3.4.	Una de las principales aplicaciones del principio de Pascal: la prensa hidráulica. ....	33
Figura 3.5.	Barómetro de Torricelli. ....	35
Figura 3.6.	Sencillo manómetro conocido como piezómetro. ....	36
Figura 3.7.	Manómetro en U. ....	36
Figura 3.8.	Manómetro de líquidos inmiscibles. ....	37
Figura 3.9.	Manómetro diferencial. ....	38
Figura 3.10.	Manómetro diferencial compuesto (con diferentes líquidos). ....	38
Figura E. 3.1.	Manómetro en U colocado entre dos puntos de una tubería que transporta agua. ....	39

Figura E. 3.2.	Instalación de una bomba en una tubería para elevar el nivel de energía en 2 y poder conducir el agua hasta un punto 3. ....	40
Figura 3.11.	Fuerza que actúa en el centro de gravedad del fondo horizontal de un tanque. ....	41
Figura 3.12.	Esquema que ilustra el centroide de aplicación de la fuerza de presión resultante, en una superficie horizontal sumergida.....	42
Figura 3.13.	Determinación de las coordenadas de la línea de acción de la fuerza de presión resultante en una superficie horizontal de forma irregular que se encuentra sumergida. ....	42
Figura 3.14.	Superficie plana sumergida que forma un ángulo $\theta$ con la superficie del fluido. ....	42
Figura 3.15	Coordenadas del centroide y momentos de inercia para algunas áreas comunes. ....	44
Figura 3.16.	Prisma de presiones ( <i>OABC</i> ) desarrollado sobre una placa rectangular de ancho <i>b</i> sumergida verticalmente. ....	45
Figura 3.17.	Fuerzas desarrolladas sobre una superficie curva sumergida. a) Equilibrio de fuerzas en <i>x</i> ; b) Equilibrio de fuerzas en <i>y</i> .....	46
Figura E.3.3.	Compuerta circular de 2 m de diámetro ubicada a 8 m de profundidad de su centro de gravedad en una pared inclinada a 60° en un estanque que contiene agua, equipada con un contrapeso en el extremo superior que le permite permanecer cerrada a esta profundidad o profundidades menores. ....	47
Figura E.3.4.	a) Compuerta circular <i>AB</i> de radio <i>R</i> ; b) Distribución de presiones triangulares ( <i>CDE</i> ) y rectangulares ( <i>CEFG</i> ) sobre la proyección vertical de la compuerta <i>AB</i> ; c) Proyección vertical sobre <i>AB</i> , correspondiente al peso del agua sobre la compuerta pero en sentido contrario. ....	48
Figura 3.18	Tubería que transporta un líquido cuya superficie existente en el estanque que la alimenta está muy por encima del eje de esta. a) Perspectiva; b) Sección longitudinal; c) Corte longitudinal en la sección transversal. ....	49
Figura 3.19.	a) Se representa un cuerpo de forma arbitraria sumergido y encerrado imaginariamente en un paralelepípedo cuyas caras paralelas al plano <i>x-y</i> se representan por el rectángulo <i>ABCD</i> y las caras (superior e inferior) paralelas al plano <i>x-z</i> tienen un área de magnitud <i>A</i> ; b) Diagrama de cuerpo libre del paralelepípedo sin el cuerpo. ....	51
Figura 3.20.	Cuerpo completamente sumergido en equilibrio estable. a) Punto de aplicación de la fuerza boyante por encima de su centro de gravedad; b) Par de respuesta contrario al giro de volcamiento. ....	53
Figura 3.21.	Cuerpo completamente sumergido en equilibrio inestable. a) Punto de aplicación de la fuerza boyante por debajo de su centro de gravedad; b) Par de respuesta en el mismo sentido del giro de volcamiento. ....	53
Figura 3.22.	a) Cuerpo parcialmente sumergido con el centro de gravedad por encima del centro de boyamiento; b) El giro del volcamiento es restituido por un par en sentido contrario a dicho giro.....	53
Figura 3.23.	a) Cuerpo parcialmente sumergido con el centro de gravedad por encima del centro de boyamiento; b) El giro de volcamiento es reforzado por un par en el mismo sentido a dicho giro.....	54

Figura 3.24.	Esquema que representa un recipiente abierto que se traslada a lo largo de una trayectoria recta con una aceleración $a$ .....	55
Figura 3.25.	Masa líquida que gira con el recipiente que la contiene, de manera que la superficie del líquido adquiere el comportamiento de un paraboloide de rotación.....	56
Figura E.3.5.	Cilindro de 0.60 m de diámetro y 1.50 m de alto que al girar a una velocidad $w$ queda una distancia desde el punto más bajo de la superficie del agua al fondo y un borde libre de 0.25 m.....	57
Figura 4.1.	Descripciones de flujo. a) Lagrangiano: seguimiento de la variación de la temperatura de las partículas de fluido a medida que estas se mueven o b) Euleriano: a través del seguimiento de la variación de las propiedades de las partículas en el instante en que pasan por un punto determinado.....	64
Figura 4.2.	Ubicación de una partícula fluida en función de su vector posición y del tiempo.....	65
Figura 4.3.	Fluido a) Ideal y b) Real, que se mueve dentro de un conducto circular recto.....	67
Figura 4.4.	Línea de corriente.....	68
Figura 4.5.	Tubo de corriente .....	68
Figura 4.6.	Esquema que ilustra la relación entre las relaciones $v/u$ y $dy/dx$ .....	69
Figura 4.7.	Líneas de flujo. Red de flujo conformada entre líneas de flujo paralelas a la coordenada $s$ ( $n = 0$ ) y líneas ortogonales paralelas a la coordenada $n$ ( $s = 0$ ).....	70
Figura 4.8.	Cambio de posición del vector unitario $S$ a lo largo de una línea de corriente. ....	71
Figura 4.9.	a) Volumen de control fijo y de fronteras indeformables, dentro del cual circula un sistema a través de las fronteras A en 1, y B en 2; b) Volumen de control fijo pero de fronteras deformables: cilindro que confina un gas entre sus paredes y el émbolo; pese a que el cilindro está fijo y es indeformable, al desplazarse el émbolo el volumen de control se expande o contrae deformándose; c) Volumen de control móvil de paredes deformables: globo repleto de gas al cual se le ha desatado el nudo de su abertura y se ha soltado, moviéndose de manera errática a medida que el gas escapa de su interior, reduciéndose el volumen del globo a medida que esto sucede; d) Volumen de control cuyas fronteras están constituidas por la superficie de la esfera y un volumen imaginario que encierra la esfera y el flujo del sistema que se establece alrededor de esta (el objeto puede estar fijo o en movimiento y el volumen de control puede ser igualmente fijo o estar en movimiento).....	73
Figura 4.10.	Volumen de control fijo e indeformable a través del cual transita un fluido unidimensional: a) Un instante antes de $t$ ; b) En el instante $t$ , en el cual el sistema coincide con el volumen de control; y c) Un instante $t + \Delta t$ .....	75
Figura 4.11.	Esquema para generalizar el Teorema de Transporte de Reynolds a partir de un volumen de control arbitrario.....	77
Figura 4.12.	Esquema que representa una ampliación de los elementos diferenciales de área y volumen conformada a la entrada y salida del volumen de control en 1 y 2.....	77

Figura E. 4.2.	Volumen de control delimitado por las fronteras internas de un tanque cilíndrico.....	81
Figura E.4.3.	Boquilla en forma de cono truncado, que reduce la sección transversal de un área $A_0$ en su conexión con el extremo de un conducto circular a un área $A_1$ en la salida a la atmósfera.....	82
Figura E.4.4.	Tubería de sección transversal constante $A$ , que transporta un líquido que sufre un proceso de enfriamiento entre una sección 1 y una sección 2. ....	84
Figura E.4.5.	Tubería que transporta gas metano .....	85
Figura E.4.6.	Cálculo de la fuerza de fricción necesaria para que la tubería no sea arrastrada.....	86
Figura E.4.7.	Boquilla de salida de un sistema industrial que suministra de una manera constante un caudal de 18.24 L/s de aceite .....	88
Figura 4.13.	Posición de un conjunto de partículas contenidas en un volumen infinitesimal $dV$ ; .....	90
Figura 4.14.	Esquema que representa las velocidades afluentes y efluentes a un volumen de control.....	91
Figura E.4.8.	Pequeña turbina con rotor de aspas de 0.80 m de diámetro exterior y 0.60 de diámetro interior.....	94
Figura E. 4.9.	Rociador giratorio que recibe por su base un caudal de 2 L/s a régimen estable.....	96
Figura 4.15.	Esquema utilizado para deducir el término “energía de presión” dentro de la característica energía total y la correspondiente energía de presión por unidad de masa ( $b = e$ ), en un fluido que se mueve dentro de un conducto cerrado a presión. ....	98
Figura 4.16.	Esquema que representa un conducto de sección transversal circular variable, utilizado para graficar la ecuación de Bernoulli.....	102
Figura E. 4.10a.	Esquema que representa la distribución parabólica de velocidades de una tubería recta de sección transversal circular constante, que transporta un caudal estable de un fluido incompresible y viscoso .....	104
Figura E.4.10b.	Esquema que ubica las líneas piezométrica y de energía .....	107
Figura E.4.11a.	Esquema que representa el transporte de un tanque de almacenamiento en A hasta un tanque de almacenamiento situado en una parte más alta en B mediante una bomba. ....	108
Figura E.4.11b.	Esquema que ilustra la línea de presión y la línea de energía.....	111
Figura 4.17.	Movimiento de traslación, rotación, deformación lineal y deformación angular. ....	112
Figura 4.18.	Deformación lineal: expansión del volumen a lo largo de los ejes $x$ , $y$ y $z$ .....	112
Figura 4.19.	Elemento diferencial de fluido estirándose en el sentido de las $x$ a causa del gradiente $-u/x$ . ....	112
Figura 4.20.	Deformación angular de un elemento diferencial de fluido en el plano $xy$ . ....	113
Figura 4.21.	Volumen de control infinitesimal para deducir la ecuación de continuidad .....	116
Figura 4.22.	Fuerzas normales al área infinitesimal $dy dz$ .....	119

Figura 4.23.	Longitud diferencial y vector velocidad a lo largo de una línea de corriente. ....	121
Figura 6.1.	Esquema de una sección transversal de un ducto que transporta un líquido y que ilustra la diferencia entre a) tubería y b) canal. ....	135
Figura 6.2.	Diagrama de flujo para calcular el factor de fricción $f$ por el método de Newton Raphson.....	139
Figura 6.3.	Diagrama de flujo para calcular el factor de fricción $f$ por el método de la iteración en un punto .....	140
Figura 6.4.	Diagrama de flujo para el cálculo del diámetro de una tubería, dados el caudal, las pérdidas disponibles y el tipo de material de la tubería.....	141
Figura E.6.1a.	Esquema del problema planteado .....	141
Figura E.6.1b.	Evaluación del valor inicial de $f$ arbitrario (0.015) mediante la diferencia entre el cálculo del miembro izquierdo y del derecho de la fórmula de Colebrook-White (columna 12).....	147
Figura E.6.1b.	Uso de la herramienta Solver. Continuación de la ilustración del proceso de cálculo. ....	148
Figura E.6.1c.	Operación ya realizada mediante la herramienta Solver. Se oprime la tecla aceptar pues el error ( $4.14882 \cdot 10^{-7}$ ) es menor que el dado ( $1 \cdot 10206$ ).....	148
Figura 6.5.	Esquema utilizado para el cálculo del diámetro de una tubería, dados el caudal, las pérdidas disponibles y el tipo de material de la tubería.....	150
Figura 6.6.	Diagrama de flujo para el cálculo del diámetro de una tubería mediante la ecuación de velocidad obtenida de la combinación de las expresiones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White (primera parte).....	152
Figura 6.7.	Diagrama de flujo para el cálculo del diámetro de una tubería mediante la ecuación de velocidad obtenida de la combinación de las expresiones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White (segunda parte).....	153
Figura 6.8.	Tuberías en serie que conducen un caudal al final de la serie ( $Q_3$ ) y diferentes caudales laterales al final de cada tubo ( $Q_{e1}$ , $Q_{e2}$ , $Q_{e3}$ ), teniendo en cuenta la línea de gradiente hidráulico que une las cargas totales entre el punto A y el punto B.....	162
Figura 6.9.	Flujograma para el cálculo de dos o más tuberías colocadas en serie (una a continuación de la otra), con la posibilidad de tener salidas en sus uniones.....	163
Figura 6.10.	Continuación del flujograma para el cálculo de dos o más tuberías colocadas en serie (una a continuación de la otra), con la posibilidad de tener salidas en sus uniones. Parte correspondiente al cálculo de los diámetros y las pérdidas menores.....	164
Figura 6.11.	Continuación del flujograma para el cálculo de dos o más tuberías colocadas en serie (una a continuación de la otra), con la posibilidad de tener salidas en sus uniones. Parte correspondiente al cálculo de las pérdidas en la válvula y posibilidad de optimización (reducción de estas), reduciendo el diámetro de las tuberías.....	165
Figura E.6.4.a	Esquema de apoyo al problema 6.4.....	166
Figura 6.12.	Esquema que representa las líneas de gradiente hidráulico a lo largo de dos tuberías en paralelo.....	173

Figura 6.13.	Selección del diámetro de una tubería para transportar un caudal excedente necesario cuando se tiene ya una tubería en funcionamiento y se piensa ampliar su capacidad mediante dos tuberías en serie.....	177
Figura E.6.5.	Esquema que representa una tubería simple de PVC que transporta un caudal de 125 L/s y a la cual se le piensa añadir una tubería de 120 m de tubería en AC para aumentar la capacidad a un caudal total de 260 L/s mediante un sistema de dos tuberías en paralelo.....	178
Figura 6.14.	Esquema que representa una red abierta que conecta un tanque de suministro A con su respectiva carga total HA, que suministra todo el caudal que circula por el sistema QA1 y atiende los respectivos caudales y cargas demandados por los nudos U1 y U2 y los tanques B, C y D (QD1, QD2, QDB, QDC, QDD y HU1, HU2, HB, HC y HD respectivamente). .....	185
Figura 6.15.	Primera parte del flujograma para cálculo de redes abiertas: lectura de número de nudos, de número de estanques, de caudales, niveles, del datum, de rugosidades absolutas, longitudes de tubería y cálculo de cargas dinámicas totales en cada estanque ( $H(i, j)$ ) y caudales requeridos en cada nudo ( $QN(j)$ ) .....	188
Figura 6.16.	Segunda parte del flujograma para cálculo de redes abiertas: inicio del cálculo de los diámetros de las tuberías utilizando la ecuación 6.24 y suponiendo unas pérdidas iniciales iguales a las de fricción.....	189
Figura 6.17.	Tercera parte del flujograma para cálculo de redes abiertas: afinamiento del cálculo de las pérdidas por fricción $hf(i, j)$ , con el diámetro ya calculado.....	190
Figura 6.18.	Tercera parte del flujograma para cálculo de redes abiertas: afinamiento del cálculo de las pérdidas por fricción $hf(i, j)$ , con el diámetro ya calculado.....	191
Figura E.6.6a.	Esquema que representa la red abierta.....	192
Figura E.6.6b.	Esquema que representa los resultados finales para la red abierta.....	205
Figura 6.19.	Red cerrada con efluentes QDi (salidas o demandas de caudal) y afluentes Qei (entradas) en los nudos (i). .....	206
Figura E.6.7a.	Esquema que representa el diseño preliminar que será comprobado mediante el método de Hardy Cross. ....	210
Figura E.6.7b.	Identificación de los ciclos existentes (2) y trazando, a partir del centro de cada uno, el giro con el sentido positivo en sentido de las agujas del reloj. ....	211
Figura E.6.7c.	Numeración de los nudos, tratando en lo posible de que el número uno coincida con una entrada, el número 2 con el sentido del flujo positivo y el número 3 con el sentido negativo; la numeración siguiente se orienta en el mismo sentido. ....	211
Figura E.6.7d.	Distribución del caudal de entrada ( $Qe1 = 80$ L/s) hacia los dos sentidos posibles, con la condición de que cubran, en el sentido asignado, los caudales demandados en los nudos donde existen las salidas ( $QD2 + QD4 + QD6 + QD7 = (18$ L/s + $28$ L/s + $12$ L/s + $22$ L/s), cumpliendo de esta manera con la ecuación 6.54; se debe cuidar también de que ninguna tubería quede sin flujo.....	212
Figura E.6.7e.	Representación gráfica de los resultados finales de la red cerrada .....	220

Figura 7.1.	Esquema de un venturímetro .....	224
Figura 7.2.	Esquema de tubo de Pitot. a) Para un canal; y b) Para una tubería, acompañado de un manómetro en 1 .....	227
Figura 7.3.	Orificio en la pared de un recipiente que tiene una carga constante h, bien porque está entrando un caudal idéntico al que sale o bien porque el volumen de agua acumulada es muy grande.....	228
Figura 7.4.	Orificio en la pared de un recipiente que descarga a otro recipiente con descarga completamente sumergida o ahogada .....	229
Figura 7.5.	Orificio en la pared de un recipiente que descarga a otro recipiente con descarga parcialmente sumergida o ahogada.....	229
Figura 7.6.	Compuerta plana de ancho b.....	231
Figura 8.1.	Esquema que representa el funcionamiento de una bomba de pistón alternativo o émbolo. ....	234
Figura 8.2.	Esquema que representa el funcionamiento de una bomba de diafragma. Adaptado de Castilla y Galvis (1993, p. 121) .....	235
Figura 8.3.	Esquema de una bomba rotativa de engranajes .....	235
Figura 8.4.	Bombas con carcasa y rotor concéntricos. Adaptado de Castilla y Galvis (1993, p. 58).....	236
Figura 8.5.	Bombas cuya carcasa es de forma de voluta y el rotor es excéntrico.....	237
Figura 8.6.	Bomba de eje vertical con el nivel de las aguas que serán elevadas por encima del eje de la tubería (bomba instalada en carga) usada en el bombeo de aguas residuales. Adaptado de Silva (1970, p. 32) .....	238
Figura 8.7.	Bomba de eje vertical (bomba sumergida) usada en el bombeo de aguas residuales. Adaptado de Silva (1970, p. 33).....	238
Figura 8.8.	Esquema que representa el funcionamiento de un ariete hidráulico .....	239
Figura 8.9.	Esquema que representa el funcionamiento de una bomba tipo tornillo de Arquímedes.....	240
Figura 8.10.	Esquema de la instalación de una bomba centrífuga y sus componentes ...	240
Figura 8.11.	Esquema para determinar el aumento de carga ganado por un fluido que circula a través de una bomba. ....	245
Figura 8.12.	Esquema para ilustrar el cálculo de la carga de aspiración neta positiva (CANP).....	247
Figura 8.13.	Selección rápida del tamaño de una bomba (Rivas, 1983, p. 196).....	249
Figura 8.14.	Selección del impulsor: variación del rendimiento de una bomba (carga vs. gasto) con la variación del tamaño del impulsor y la potencia requerida para impulsar la bomba (Rivas, 1983, p. 195).....	249
Figura 8.15.	Curvas específicas proporcionadas por el fabricante para un determinado tamaño de bomba e impulsor seleccionados (Rivas, 1983, p. 194).....	250
Figura E.8.1a.	Esquema de instalación del sistema de bombeo. ....	251
Figura E.8.1b.	Curvas de operación del sistema (carga dinámica máxima y mínima) superpuestas a las curvas características de la bomba adquirida.....	257
Figura E.8.1c.	Comparación de los valores de la carga de aspiración neta positiva disponible (CANPD), la carga de aspiración neta positiva disponible reducida en un 20% (CANPD 2 20%CANPD) y la carga de aspiración neta positiva disponible reducida en 0.50 m, para el rango de caudales de operación de la bomba en estudio, comparados con la carga de aspiración neta positiva requerida por la bomba CANPR. ....	258

Figura 9.1.	Sección transversal de un canal trapezoidal usada para definir los elementos geométricos de la sección de un canal. ....	260
Figura 9.2.	Clasificación del flujo tomando el tiempo como criterio (permanente y no permanente) y el espacio como criterio (uniforme y variado). ....	261
Figura 9.3.	Esquema que ilustra los tipos de flujo tomando el espacio como criterio: flujo uniforme (FU), gradualmente variado (FGV) y rápidamente variado (FRV). ....	261
Figura 9.4.	Esquema que representa las dos suposiciones básicas para la deducción de la ecuación de Chézy. ....	263
Figura E.9.1.	Esquema del perfil longitudinal del terreno en el que se construirá un canal trapezoidal. ....	265
Figura E.9.2.	Esquema de la sección transversal circular de un canal, usado para colocar $u$ en función de $y$ . ....	267
Figura 9.5.	Esquema que ilustra las dos ramas de la curva de energía específica: de profundidad baja $y_1$ y de profundidad alta $y_2$ . ....	270
Figura 9.6.	Curva de energía para un determinado caudal $Q$ (línea continua), un caudal menor de $Q$ (línea a trazos que se desplaza hacia la izquierda) y un caudal mayor que $Q$ (línea a trazos que se desplaza hacia la derecha). ....	271
Figura E.9.5.	Esquema que representa las secciones transversales de flujo en un canal rectangular de pendiente de fondo horizontal que pasa de la profundidad baja ( $y_1$ ) a la profundidad alta ( $y_2$ ) en un tramo muy corto. ....	277
Figura 9.7.	Sección de un canal (izquierda) con la curva de fuerza específica respectiva (derecha). ....	278
Figura 9.8.	Esquema que ilustra el uso conjunto de la ecuación de energía (izquierda) y fuerza específica (derecha) para hallar las pérdidas $\Delta E$ . ....	280
Figura E.9.7.	Esquema que representa el desarrollo de un resalto hidráulico debido a la transición de paredes rectas que comunica un canal rectangular de 1.5 m de ancho y 0.40 m de profundidad con otro ubicado aguas abajo de 4 m de ancho y 2.5 m de profundidad. ....	282
Figura 9.9.	Perfil de un vertedero de cresta aguda que ilustra las condiciones básicas que debe cumplir este tipo de aforador. ....	285
Figura 9.10.	Esquema que representa las condiciones que debe cumplir un vertedero rectangular de cresta aguda. ....	286
Figura 9.11.	Esquema que representa las condiciones que debe cumplir un vertedero trapezoidal (Cipolletti) de cresta aguda. ....	287
Figura 9.12.	Esquema que representa las condiciones que debe cumplir un vertedero triangular de cresta aguda. El ángulo $u$ puede ser cualquiera, pero el más común es el de $90^\circ$ . ....	287
Figura 9.13.	Planta y perfil de la canaleta Parshall que ilustra las dimensiones de este dispositivo de aforo cuyas magnitudes se presentan en la tabla 9.2 según los rangos de caudal que se va a aforar. ....	288
Figura 9.14.	Esquema representativo de un flujo gradualmente variado. ....	291



Figura 9.15.	Perfiles de flujo con pendiente horizontal, suave y crítica para flujo gradualmente variado .....	295
Figura 9.16.	Perfiles de flujo con pendiente empinada y adversa .....	296
Figura 9.17.	Esquema que ilustra un pequeño tramo de canal de longitud $D_x$ .....	297
Figura E.9.8.	Resultados de los cálculos (perfil de flujo M1) presentados en una gráfica de Excel. ....	301
Figura 9.18.	Flujo espacialmente variado con incremento de caudal en a) canales recolectores de agua sedimentada en una planta de tratamiento y b) un canal instalado a lo largo de un vertedero y que recibe las aguas de este.....	302
Figura 9.19.	Esquema que representa un volumen de control para un flujo espacialmente variado con incremento de caudal, el cual tiene superficies de control permeables no solo entre 1 y 2, sino también a lo largo de toda la superficie libre. ....	303
Figura 9.20.	Esquema que representa las fuerzas de presión en las superficies de entrada (1) y salida (2) en un volumen de control para un flujo espacialmente variado con incremento de caudal. ....	304
Figura 9.21.	Esquema tomado como referencia para el análisis del segundo término del segundo miembro de la ecuación 9.44. ....	304
Figura 9.22.	Componente de la fuerza gravitacional en el sentido del movimiento $W_x$ .....	306
Figura 9.23.	Esquema que ilustra la fuerza de fricción del agua en contacto con la superficie del canal.....	307
Figura 9.24.	Flujo permanente espacialmente variado con disminución de caudal: a) Vertedero lateral de un canal (vertedero de excesos o aliviaderos laterales en canales que conducen aguas lluvias y negras combinadas, o colocados en conducciones después de la captación para desviar caudales de retorno); b) Tomas de fondo de captaciones transversales en corrientes o sumideros de aguas lluvias o combinadas.....	309
Figura 9.25.	Esquema utilizado para derivar la ecuación de flujo permanente espacialmente variado con disminución de caudal. ....	310
Figura 9.26.	Esquema de referencia para ilustrar el desarrollo de la derivada temporal de la ecuación de continuidad o acumulación másica en el tiempo dentro del volumen de control conformado por dos secciones de entrada y salida separadas una distancia $dx$ . ....	312
Figura 9.27.	Esquema que ilustra la aceleración temporal $(-V/-t)$ que se produce entre las dos secciones de entrada y salida separadas una distancia $dx$ dentro del volumen de control comprendido en un tramo corto de un canal. ....	313
Figura P.9.1.	Sección transversal de un canal en concreto con acabado fino pendiente 0.5%. Esquema de referencia para ilustrar el desarrollo de la derivada temporal de la ecuación de continuidad o acumulación másica en el tiempo dentro del volumen de control conformado por dos secciones de entrada y salida separadas una distancia $dx$ . ....	315

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	Diferentes sistemas de unidades.....	7
Tabla 1.2.	Múltiplos y submúltiplos. Prefijos, símbolos y equivalencia decimal.....	8
Tabla 1.3.	Unidades de uso común .....	10
Tabla 2.1.	Tensión superficial del agua (s) a presión atmosférica estándar al nivel del mar. ....	24
Tabla E.5.1.	Determinación de los exponentes contenidos en cada una de las dimensiones básicas comprendidas en las variables propuestas. ....	127
Tabla 6.1.	Ecuaciones más usadas en el flujo de tuberías.....	137
Tabla 6.2.	Algunos valores de CH para la fórmula de Hazen-Williams.....	138
Tabla E.6.1a.	Cálculo de las pérdidas por fricción y menores para una tubería de 2” (0.0508 m) utilizando el método de Newton Raphson. ....	143
Tabla E.6.1b.	Cálculo de las pérdidas por fricción y menores para una tubería de 3” (0.0762 m) utilizando el método de Newton Raphson.....	143
Tabla E.6.1c.	Cálculo de las pérdidas por fricción y menores para una tubería de 4” (0.1016 m) utilizando el método de Newton Raphson. Se observa que dicha tubería puede transportar el caudal requerido de 0.40 m <sup>3</sup> /s holgadamente. ....	144
Tabla E.6.1d.	Cálculo de las pérdidas por fricción y menores para una tubería de 2” (0.0508 m) utilizando el método de la iteración en un punto. ....	145
Tabla E.6.1e.	Cálculo de las pérdidas por fricción y menores para una tubería de 3” (0.0762 m) utilizando el método de la iteración en un punto. ....	145
Tabla E.6.1f.	Cálculo de las pérdidas por fricción y menores para una tubería de 4” (0.1016 m) utilizando el método de la iteración en un punto. ....	146
Tabla E.6.1g.	Resultados finales del cálculo del diámetro más adecuado para trasportar un caudal de 40 L/s con unas pérdidas totales iguales o menores a 60 m mediante la herramienta Solver de Excel. ....	149
Tabla E.6.2.	Resultados finales del cálculo del diámetro más adecuado para trasportar un caudal de 40 L/s con unas pérdidas totales iguales o menores a 50 m mediante la herramienta Solver de Excel. ....	155
Tabla E.6.3a.	Variables obtenidas para las tuberías de 3” y 4” en el ejemplo 6.1.....	157
Tabla E.6.3b.	Secuencia de cálculos para determinar la longitud L1 de la tubería de 4” por el método de la bisección. Parte 1. ....	160
Tabla E.6.4a.	Cálculo de las pérdidas recomendables para cada tubería de la serie, con unas pérdidas disponibles totales de 70 m.....	166
Tabla E.6.4b.	Cálculo de los diámetros que produzcan unas pérdidas iguales o menores a las recomendadas, utilizando la herramienta Solver.....	167
Tabla E.6.4c.	Síntesis del proceso de cálculo de las pérdidas por reducción en el paso de la tubería 2 a la 3 (0.30 m a 0.25 m). ....	169
Tabla E.6.4d.	Primera iteración, donde se prueba reducir el segundo diámetro a 0.25 m, pero las pérdidas se hacen mayores a las disponibles (hmv = 27.03 m).....	170
Tabla E.6.4e.	Segunda iteración, donde se reduce el diámetro de la última tubería a 0.20 m y se obtienen unas pérdidas ejercidas por la válvula de hmv = 5.59 m.....	171

Tabla E.6.5a.	Cálculo del diámetro para transportar un caudal igual o mayor de 0.15344 m <sup>3</sup> /s (153.44 L/s).....	179
Tabla E.6.5b.	Cálculo del coeficiente de fricción $f_1$ , de la velocidad de flujo $V_1$ y de las pérdidas totales (HT) para la segunda tubería de 300 mm de diámetro utilizando la herramienta Solver de Excel.....	179
Tabla E.6.5c.	Cálculo del nuevo caudal para la tubería existente de diámetro $d_2 = 0.25$ m y del nuevo caudal total QT.....	180
Tabla E.6.5d.	Cálculo del coeficiente de fricción $f_1$ , de la velocidad de flujo $V_1$ y de las pérdidas totales (HT) para la segunda tubería de 300 mm de diámetro y para la segunda iteración, utilizando la herramienta Solver de Excel.....	180
Tabla E.6.5e.	Cálculo del nuevo caudal para la tubería existente de diámetro $d_2 = 0.25$ m y del nuevo caudal total QT, en la segunda iteración.....	181
Tabla E.6.5f.	Cálculo del coeficiente de fricción $f_1$ , de la velocidad de flujo $V_1$ y de las pérdidas totales (HT) para la segunda tubería de 300 mm de diámetro y para la tercera iteración, utilizando la herramienta Solver de Excel.....	182
Tabla E.6.5g.	Cálculo del nuevo caudal para la tubería existente de diámetro $d_2 = 0.25$ m y del nuevo caudal total QT, en la tercera iteración.....	183
Tabla E.6.6a.	Cálculo del diámetro más adecuado para transportar un caudal de 0.680 m <sup>3</sup> /s (o mayor) en la tubería 1 2 U1 y de las respectivas pérdidas, con un error admitido para las pérdidas por fricción de $1 \times 1024$ m, en la red abierta.....	194
Tabla E.6.6b.	Cálculo del diámetro más adecuado para las restantes tuberías que confluyen en el nudo 1 y de las respectivas pérdidas, con un error admitido para las pérdidas por fricción de $1 \times 1024$ m, en la red abierta.....	196
Tabla E.6.6c.	Cálculo del diámetro más adecuado para las tuberías que confluyen en el nudo 2 y de las respectivas pérdidas, con un error admitido para las pérdidas por fricción de $1 \times 1024$ m, en la red abierta.....	197
Tabla E.6.6d.	Iteración 2 para el nudo 1 con un error admitido para las pérdidas por fricción de $1 \times 1024$ m, en la red abierta.....	199
Tabla E.6.6e.	Iteración 2 para el nudo 2 con un error admitido para las pérdidas por fricción de $1 \times 1024$ m, en la red abierta.....	200
Tabla E.6.6f.	Iteración 6 (última) para el nudo 1 con un error admitido para las pérdidas por fricción de $1 \times 1024$ m, en la red abierta.....	202
Tabla E.6.6g.	Iteración 6 (última) para el nudo 2 con un error admitido para las pérdidas por fricción de $1 \times 1024$ m, en la red abierta.....	203
Tabla E.6.6h.	Resultados finales para la red abierta.....	205
Tabla E.6.7a.	Datos y cálculos preliminares en una hoja de cálculo Excel para el método de Hardy Cross.....	213
Tabla E.6.7b.	Cálculo del coeficiente de fricción utilizando la ecuación 6.16 junto con la herramienta Solver de Excel, y cálculo inicial de pérdidas para cada tramo de cada circuito, y DQ para cada circuito, según el método de Hardy Cross.....	214
Tabla E.6.7c.	Primera iteración del método de Hardy Cross. Las columnas 1 a 5 han desaparecido, pues son las mismas y se repiten en todo el proceso de cálculo.....	216
Tabla E.6.7d.	Primera iteración del método de Hardy Cross, corregida para el coeficiente de fricción $f$ .....	218

Tabla E.6.7e.	Última iteración (décima) para el método de Hardy Cross, en la cual se logra el valor especificado de DQ ( $\# 1 * 1026 \text{ m}^3/\text{s}$ ). .....	219
Tabla E.6.7f.	Resultados finales para caudales Q (L/s) y pérdidas totales hT (m) para los diferentes tramos de los dos circuitos de la red cerrada. ....	220
Tabla 7.1.	Coefficientes de descarga (Cd) para venturímetros normales. ....	225
Tabla 8.1.	Longitudes equivalentes a pérdidas por accesorios. Fuente (Silva, 1970, p. 109). ....	243
Tabla E.8.1a.	Cálculo del coeficiente de fricción $f$ para la tubería de succión utilizando la herramienta Solver. ....	253
Tabla E.8.1b.	Cálculo del coeficiente de fricción $f$ para la tubería de impulsión, utilizando la herramienta Solver. ....	254
Tabla E.8.1c.	Valores del factor de fricción $f$ , calculados para los diferentes caudales y diámetros en la succión e impulsión. ....	256
Tabla E.8.1d.	Cálculos preparados para elaborar y superponer la curva de operación del sistema a las curvas características de la bomba ofrecida por el fabricante. ....	256
Tabla E.8.1e.	Valores de la carga de aspiración neta positiva disponible (CANPD), la carga de aspiración neta positiva disponible reducida en un 20% (CANPD)-20%CANPD) y la carga de aspiración neta positiva disponible reducida en 0.50 m, para el rango de caudales de operación de la bomba en estudio. ....	258
Tabla 9.1.	Elementos geométricos de algunas secciones transversales. Parte 1 .....	262
Tabla E.9.2a.	Solución del ejemplo mediante aproximaciones sucesivas. ....	268
Tabla E.9.2b.	Solución del ejemplo mediante el ordenamiento adecuado de los datos y de las ecuaciones en una hoja de cálculo Excel y la utilización de la herramienta Solver .....	268
Tabla E.9.7a.	Cálculo del punto de inflexión del resalto a partir de la observación del rango donde coinciden las fuerzas específicas. Nótese que, entre un ancho de 1.50 y 2 m, las fuerzas específicas bajas y altas se cruzan. ....	283
Tabla E.9.7b.	Ampliación del rango entre los anchos donde las fuerzas específicas altas y bajas se cruzan. Nótese que entre 1.8 y 1.9 las fuerzas específicas altas y bajas se cruzan .....	283
Tabla E.9.7c.	Promedio del rango de valores extremos (ancho de 1.85 m, correspondiente a los anchos de 1.8 y 1.9 m) que permite una buena aproximación de la fuerza específica crítica .....	284
Tabla 9.2.	Dimensiones y capacidad de las canaletas Parshall para varios anchos de garganta W, correspondientes a la figura 9.13. Parte 1 .....	289
Tabla E.9.8.	Resultados de los cálculos elaborados en una tabla Excel. ....	300

## PRESENTACIÓN

Con inmensa gratitud, acepté la solicitud del ingeniero Vitelio Peñaranda para presentar su libro *Mecánica de fluidos*, haciendo la salvedad de la dificultad que para un ingeniero forestal, como en mi caso, significa entender la profundidad y el rigor que esta rama de la física requiere, y que con propiedad y didáctica presenta el ingeniero Peñaranda para optimizar el proceso de enseñanza-aprendizaje dentro de su quehacer docente en el programa de Ingeniería Sanitaria de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

A lo largo de sus páginas, queda claro que el texto presenta de una manera breve, pero no por ello poco profunda, los conceptos básicos de la mecánica de fluidos, sin pretender constituir un aporte científico en esta rama de la física; sin embargo, mediante una lectura acuciosa, los elementos que empiezan a destacar y que terminan constituyendo la esencia de la obra pueden enmarcarse dentro de dos propósitos principales, de igual o mayor relevancia y complementarios entre sí: convertirse en libro de texto y enfocarse hacia la formación del Ingeniero. Ambos propósitos son intencionales y coinciden con los fines declarados, en su calidad de docente del autor, de aportar a la formación de los futuros profesionales.

Al advertir al ingeniero Peñaranda sobre el primer aspecto identificado en su manuscrito (convertirse en un libro de texto), coincidimos en que de las tres funciones del profesor universitario (docencia, investigación y extensión), la docencia ha sido sistemáticamente relegada. Al respecto, el ingeniero puso en mis manos la presentación de otra obra de similares características (la presentación de Santiago Vera Izquierdo del libro *Mecánica de fluidos* de Juan José Bolinaga), en el que el presentador hace hincapié en la forma como: “el énfasis puesto en la investigación ha dejado de lado la docencia, la cual ha llegado a ser mirada como accesoria y como un molesto requisito que debe cumplirse, pero cuyo valor es insignificante ante la investigación. Ante un mundo conectado y globalizado, los resultados de las investigaciones llevadas a cabo a través de los años por equipos de investigadores son presentados o percibidos como el producto aislado e inmediato de mentes brillantes,

por lo que la agobiante carrera por producir investigación a toda costa ha ido ganando una abismal ascendencia sobre la enseñanza, la cual ha sido continuamente trivializada”. Con plena conciencia del riesgo que entraña salir de la zona de confort del paradigma de la investigación en la educación superior, el ingeniero Peñaranda incursiona en la docencia y su libro constituye una valiosa herramienta para los estudiantes de Ingeniería Sanitaria, Ambiental y Civil, producto de la evaluación y síntesis de una gran cantidad de textos especializados consultados y de su experiencia profesional, académica y docente. De este modo, pone al servicio del futuro profesional una herramienta que lo libera de repetir el mismo camino ya recorrido por el docente, de manera que pueda adquirir los elementos de mecánica de fluidos y pueda así ingresar a niveles superiores en esta área de la ingeniería.

Con respecto al segundo propósito (enfocarse hacia la formación del ingeniero), también implica salir de paradigmas reduccionistas que han ido haciendo carrera, según los cuales formar en estas disciplinas es irrelevante ya que cualquier persona con una formación mínima en las ciencias básicas puede crear cualquier obra solo con la consulta diligente en el ciberespacio. Esta especie de insensato sincretismo se ve peligrosamente reforzado por algunos teóricos del conocimiento que opacan la importancia de estas carreras y proponen inclusive que dichas disciplinas deberían desaparecer de las universidades. La influencia de estas escuelas en la formación académica ha producido el fenómeno que puede observarse en la actualidad: la drástica disminución de profesionales competentes en el área de la ingeniería y el aumento de graduados en las ciencias especulativas que nos aleja cada vez más del desarrollo económico y social que necesita el país. Este factor es abordado por el autor, en contravía de las peligrosas tendencias anotadas, por la secuencia que articula el contenido así: la hidrostática, la mecánica de fluidos integral, (que transforma las ecuaciones de la mecánica clásica a la mecánica de fluidos mediante el Teorema de Transporte de Reynolds la necesidad de la perspectiva diferencial dentro de esta área, la articulación de la física de los fluidos con la hidráulica mediante el análisis dimensional y la similitud hidráulica, y el uso de estos conceptos fundamentales en la práctica ingenieril (tuberías, dispositivos de aforo, bombas y canales).

Finalmente, es preciso destacar que el libro del ingeniero Peñaranda constituye un reto al arquetipo actual del profesor universitario y es un ejemplo para quienes consideran la labor de la docencia como una función de igual valor que el de la investigación, así como para quienes conciben la profesión del ingeniero con orgullo y responsabilidad.

**Yesid Navas Peñaranda**



## PREFACIO

La presente obra fue escrita con el propósito esencial de proporcionar al estudiante un texto sencillo que lo introduzca en los principios básicos de mecánica de fluidos. El estudiante que se inicia en el estudio de los fluidos encuentra en esta área del conocimiento un fascinante, útil y apasionante campo, pero pasa a descubrir rápidamente que los tiempos disponibles para su estudio son demasiado limitados, y los libros existentes, demasiado extensos y profundos. La bibliografía existente para el estudio de la mecánica de fluidos es abundante y de buena calidad: los clásicos libros de Streeter y Vennard Street, casi los únicos utilizados en la década del setenta, comparten hoy espacio con las posteriores obras de Claudio Mataix, Shames, Munson, Young y Okiishi, Mott, White y, más recientemente, Cengel y Cimbala; sin embargo, la diversidad de los campos en los cuales se aplica esta ciencia hace que estos tratadistas busquen presentar la mayoría de los temas con profundidad, pero en este propósito alejan a los estudiantes de áreas específicas, de la posibilidad de aprender los conceptos fundamentales en los tiempos previstos de manera que, además de permitir al estudiante aplicar en su vida profesional lo aprendido, le sirva de base para profundizar en cursos posteriores de posgrado.

En el propósito de orientar a los estudiantes de Ingeniería Sanitaria, Ambiental y Civil en sus primeros pasos en el aprendizaje de esta rama, se han organizado los temas atendiendo la necesidad de desarrollar la estructura mental del lector en torno al fundamento físico matemático de los principios requeridos en estas disciplinas.

La estrategia es tomar las dos ramas más importantes (estática y flujo de fluidos) para desarrollar, a partir de los principios que las gobiernan, los contenidos que las fundamentan, excluyendo los componentes que no se identifiquen como esenciales en la formación de los mencionados ingenieros. Se excluyen también algunos temas que, aun siendo pertinentes, por su extensión por lo regular se abordan en cursos de posgrado. Tal es el caso de los

flujos externos, que, siendo de vital importancia en el campo del transporte de sedimentos y consecuentemente en el estudio de las crecientes y de la hidráulica torrencial, áreas de especial interés para Ingenieros civiles y ambientales, se ofrecen regularmente en los posgrados en los espacios académicos “Mecánica del transporte de sedimentos” e “Hidráulica de sedimentos”.

Con base en los anteriores preceptos, este libro se ha dividido en nueve capítulos que se presentan a continuación:

**Capítulo 1. Nociones generales:** en este capítulo se hace una breve reseña histórica, se identifican y clasifican algunas obras de recursos hídricos y se tratan los sistemas de unidades utilizados en la mecánica de fluidos.

**Capítulo 2. Propiedades de los fluidos:** la definición de fluido introduce al estudiante en lo que son los esfuerzos o fuerzas de superficie, los cuales consecutivamente llevan a la definición de tensores. También se clasifican los diferentes tipos de fluidos y se definen finalmente sus propiedades (densidad, peso específico, viscosidad dinámica, cinemática, presión de vapor, etc.).

**Capítulo 3. Estática de los fluidos:** se estudia la estática de los fluidos, se determina la variación de la presión en un punto y se deducen las propiedades de los fluidos. Asimismo, a partir de la ecuación fundamental de la hidrostática se estudian las fuerzas de presión desarrolladas sobre diferentes superficies sumergidas.

**Capítulo 4. Flujo de fluidos:** se diferencia entre el enfoque euleriano y el enfoque lagrangiano en el flujo de fluidos. Se estudian principios básicos como el operador gradiente, la derivada material, el concepto de sistema y volumen de control, se deduce la ecuación del transporte de Reynolds y se aplica este concepto a las principales ecuaciones de la mecánica newtoniana (constancia de la masa, fuerza, momento y energía), para transformarlas a las respectivas expresiones en la mecánica de fluidos (ecuación de continuidad, de *momentum*, momento de *momentum* y de energía, llegando hasta la ecuación de Bernoulli). Finalmente, se hace una introducción al análisis diferencial del flujo de fluidos, ilustrando la deducción de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento para un volumen infinitesimal, las ecuaciones diferenciales generales para el movimiento de un fluido la ecuación de Euler y las ecuaciones de Navier-Stokes.

**Capítulo 5. Análisis dimensional:** se hace una introducción al análisis dimensional y la similitud dinámica, métodos que articulan los principios fundamentales de la mecánica de los fluidos a la experimentación práctica de los modelos físicos.

**Capítulo 6. Tuberías:** se presentan las ecuaciones básicas para el flujo en conductos cerrados (Hazen Williams, Poiseuille, Darcy-Weisbach y Colebrook-White) y, a partir de las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, que cobran importancia por su uso extendido en el cálculo de tuberías, se ilustran los métodos de diseño.

**Capítulo 7. Dispositivos de aforo, orificios y compuertas:** se presentan algunos dispositivos de aforo como los venturímetros y el tubo de Pitot y otros que cumplen con los propósitos adicionales de regular y/o distribuir dichos caudales como los orificios y compuertas.

**Capítulo 8. Bombas:** se presentan los diferentes tipos de bombas y se describen los requisitos de un sistema de bombeo cuando se proyecta la elevación de un caudal; también se dan los elementos para la selección de una bomba centrífuga.



**Capítulo 9. Canales:** se presentan los diferentes tipos de flujo en canales (permanente y no permanente, uniforme y variado). Se desarrollan los diseños con flujo uniforme para diferentes tipos de secciones transversales, se estudia la ecuación de energía específica, así como los conceptos de flujo crítico, subcrítico y supercrítico, el resalto hidráulico, el concepto de control de flujo y su uso como estación de aforo. Se presenta el método del paso directo para flujo variado y, finalmente, se estudia brevemente el concepto de flujo permanente espacialmente variado y el flujo no permanente.

**Apéndices:** el apéndice A contiene las propiedades físicas de algunos gases a 1 atmósfera de presión y 20 °C, la variación de las propiedades físicas del aire con la temperatura a 1 atmósfera de presión y la variación de las propiedades físicas del agua con la temperatura a 1 atmósfera de presión en el Sistema Internacional (SI). El apéndice B contiene el desarrollo matemático de la forma diferencial de la ecuación de continuidad utilizando coordenadas polares cilíndricas. En el apéndice D se desarrolla la deducción del vector identidad. En el apéndice E se pueden encontrar las rugosidades absolutas para diferentes materiales y los coeficientes de pérdidas menores para algunos accesorios y dispositivos, y en el apéndice F se ilustra el método iterativo de la bisección.