

# Contenido

<b>1</b>		
<b>INTRODUCCIÓN</b>		<b>19</b>
1.1	Algunas características de los fluidos	20
1.2	Dimensiones, homogeneidad dimensional y unidades	21
1.2.1	Sistemas de unidades	23
1.3	Análisis del comportamiento de fluidos	28
1.4	Medidas de masa y peso de fluidos	29
1.4.1	Densidad	29
1.4.2	Peso específico	29
1.4.3	Densidad relativa	31
1.5	Ley de los gases ideales	31
1.6	Viscosidad	33
1.7	Compresibilidad de fluidos	40
1.7.1	Módulo de elasticidad volumétrico	40
1.7.2	Compresión y expansión de gases	40
1.7.3	Velocidad del sonido	41
1.8	Presión de vapor	43
1.9	Tensión superficial	43
1.10	Reseña histórica	46
	Bibliografía	48
	Problemas	49
<b>2</b>		
<b>ESTÁTICA DE FLUIDOS</b>		<b>57</b>
2.1	Presión en un punto	57
2.2	Ecuación básica para campo de presión	58
2.3	Variación de la presión en un fluido en reposo	60
2.3.1	Fluido incompresible	61
2.3.2	Fluido compresible	63
2.4	Atmósfera estándar	65
2.5	Medición de la presión	66
2.6	Manometría	68
2.6.1	Piezómetro	69
2.6.2	Manómetro de tubo en U	69
2.6.3	Manómetro de tubo inclinado	73
2.7	Aparatos mecánicos y electrónicos para medir la presión	74
2.8	Fuerza hidrostática sobre una superficie plana	76
2.9	Prisma de presión	82
2.10	Fuerza hidrostática sobre una superficie curva	86
2.11	Flotabilidad, flotación y estabilidad	88
2.11.1	Principio de Arquímedes	88
2.11.2	Estabilidad	90
2.12	Variación de la presión en un fluido con movimiento de cuerpo rígido	92
2.12.1	Movimiento lineal	92
2.12.2	Rotación de cuerpo rígido	94
	Bibliografía	97
	Problemas	98
<b>3</b>		
<b>DINÁMICA ELEMENTAL DE FLUIDOS.</b>		
<b>ECUACIÓN DE BERNOULLI</b>		<b>113</b>
3.1	Segunda Ley de Newton	113
3.2	$F = ma$ a lo largo de una línea de corriente	116
3.3	$F = ma$ normal a una línea de corriente	121
3.4	Interpretación física	123
3.5	Presión estática, de estancamiento, dinámica y total	127
3.6	Ejemplos de aplicación de la ecuación de Bernoulli	131
3.6.1	Chorros libres	131
3.6.2	Flujos confinados	133
3.6.3	Medición del caudal	141

3.7 La línea de energía y el perfil hidráulico . . . 146

3.8 Restricciones en el uso de la ecuación de Bernoulli . . . . . 149

3.8.1 Efectos de compresibilidad . . . . . 149

3.8.2 Efectos inestables . . . . . 152

3.8.3 Efectos rotacionales . . . . . 155

3.8.4 Otras restricciones . . . . . 157

Bibliografía . . . . . 157

Problemas . . . . . 158

## 4 CINEMÁTICA DE FLUIDOS . . . . . 175

4.1 El campo de velocidad . . . . . 175

4.1.1 Descripciones euleriana y lagrangiana del flujo . . . . . 176

4.1.2 Flujos unidimensional, bidimensional y tridimensional . . . . . 179

4.1.3 Flujos estable e inestable . . . . . 180

4.1.4 Líneas de corriente, estelas y trayectorias . . . . . 181

4.2 El campo de aceleración . . . . . 185

4.2.1 La derivada material . . . . . 186

4.2.2 Efectos inestables . . . . . 189

4.2.3 Efectos convectivos . . . . . 189

4.2.4 Coordenadas de la línea de corriente . . . . . 192

4.3 Representaciones de volumen de control y de sistema . . . . . 194

4.4 El teorema de transporte de Reynolds . . . . . 196

4.4.1 Obtención del teorema de transporte de Reynolds . . . . . 198

4.4.2 Interpretación física . . . . . 203

4.4.3 Relación con la derivada material . . . . . 205

4.4.4 Efectos estables . . . . . 206

4.4.5 Efectos inestables . . . . . 207

4.4.6 Volúmenes de control móviles . . . . . 208

4.4.7 Selección de un volumen de control . . . . . 210

Bibliografía . . . . . 211

Problemas . . . . . 211

## 5 ANÁLISIS DEL VOLUMEN DE CONTROL FINITO . . . . . 219

5.1 Conservación de la masa. La ecuación de continuidad . . . . . 220

5.1.1 Obtención de la ecuación de continuidad . . . . . 220

5.1.2 Volumen de control fijo que no se deforma . . . . . 222

5.1.3 Volumen de control móvil que no se deforma . . . . . 228

5.1.4 Volumen de control que se deforma . . . . . 231

5.2 Segunda ley de Newton. Ecuaciones de la cantidad de movimiento lineal y de momento de la cantidad de movimiento . . . . . 234

5.2.1 Obtención de la ecuación de cantidad de movimiento lineal . . . . . 234

5.2.2 Aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento lineal . . . . . 236

5.2.3 Obtención de la ecuación de momento de la cantidad de movimiento . . . . . 251

5.2.4 Aplicación de la ecuación de momento de la cantidad de movimiento . . . . . 253

5.3 Primera ley de la termodinámica. Ecuación de la energía . . . . . 261

5.3.1 Obtención de la ecuación de la energía . . . . . 261

5.3.2 Aplicación de la ecuación de la energía . . . . . 264

5.3.3 Comparación de la ecuación de la energía con la ecuación de Bernoulli . . . . . 269

5.3.4 Aplicación de la ecuación de la energía a flujos no uniformes . . . . . 276

5.3.5 Combinación de la ecuación de la energía y la ecuación de momento de la cantidad de movimiento . . . . . 280

5.4 Segunda ley de la termodinámica. Flujo irreversible . . . . . 281

5.4.1 Enunciación de la ecuación de la energía con un volumen de control semiinfinitesimal . . . . . 281

5.4.2 Enunciación de la segunda ley de la termodinámica con un volumen de control semiinfinitesimal . . . . . 282

5.4.3 Combinación de las ecuaciones de la primera y segunda leyes de la termodinámica . . . . . 283

5.4.4 Aplicación de la forma de pérdida de la ecuación de la energía . . . . . 284

Bibliografía . . . . . 286

Problemas . . . . . 286

## 6 ANÁLISIS DIFERENCIAL DE FLUJO DE FLUIDOS . . . . . 309

6.1 Cinemática de un elemento de fluido . . . . . 310

6.1.1 Repaso de los campos de velocidad y aceleración . . . . . 310

6.1.2 Movimiento y deformación lineal . . . . . 311

6.1.3 Movimiento y deformación angular . . . . . 313

6.2 Conservación de la masa . . . . . 315

6.2.1 Forma diferencial de la ecuación de continuidad . . . . . 316

6.2.2 Coordenadas polares cilíndricas . . . . . 318

6.2.3 La función corriente . . . . . 319

6.3 Conservación de la cantidad de movimiento lineal . . . . . 322

6.3.1 Descripción de las fuerzas que actúan sobre un elemento diferencial . . 323

6.3.2 Ecuaciones de movimiento . . . . . 325

6.4 Flujo no viscoso . . . . . 326

6.4.1 Ecuaciones de Euler del movimiento . . . 326

6.4.2 La ecuación de Bernoulli . . . . . 327

6.4.3 Flujo irrotacional . . . . . 329

6.4.4 La ecuación de Bernoulli para flujo irrotacional . . . . . 331

6.4.5 El potencial de velocidad . . . . . 331

6.5 Algunos flujos potenciales planos básicos . 335

6.5.1 Flujo uniforme . . . . . 336

6.5.2 Fuente y pozo . . . . . 337

6.5.3 Vórtice . . . . . 339

6.5.4 Doblete . . . . . 342

6.6 Superposición de flujos potenciales planos básicos . . . . . 344

6.6.1 Fuente en una corriente uniforme. Semicuerpo . . . . . 344

6.6.2 Óvalos Rankine . . . . . 348

6.6.3 Flujo en torno a un cilindro circular . . . 349

6.7 Otros aspectos del análisis del flujo potencial . . . . . 355

6.8 Flujo viscoso . . . . . 356

6.8.1 Relaciones esfuerzo-deformación . . . . . 356

6.8.2 Las ecuaciones de Navier-Stokes . . . . . 358

6.9 Algunas soluciones sencillas para fluidos incompresibles viscosos . . . . . 359

6.9.1 Flujo laminar estable entre placas paralelas fijas . . . . . 359

6.9.2 Flujo Couette . . . . . 361

6.9.3 Flujo laminar estable en tubos circulares 364

6.9.4 Flujo laminar axial estable en una corona 366

6.10 Otros aspectos del análisis diferencial . . . 369

6.10.1 Métodos numéricos . . . . . 369

Bibliografía . . . . . 377

Problemas . . . . . 378

## 7

### SIMILITUD, ANÁLISIS DIMENSIONAL Y MODELADO . . . . . 391

7.1 Análisis dimensional . . . . . 391

7.2 Teorema pi de Buckingham . . . . . 394

7.3 Determinación de los términos pi . . . . . 394

7.4 Algunos comentarios adicionales sobre el análisis dimensional . . . . . 400

7.4.1 Selección de variables . . . . . 401

7.4.2 Determinación de las dimensiones de referencia . . . . . 402

7.4.3 Unicidad de los términos pi . . . . . 404

7.5 Determinación por inspección de los términos pi . . . . . 405

7.6 Grupos adimensionales comunes en mecánica de fluidos . . . . . 406

7.7 Correlación de datos experimentales . . . . . 411

7.7.1 Problemas con un término pi . . . . . 411

7.7.2 Problemas con dos o más términos pi . . . 412

7.8 Modelado y similitud . . . . . 415

7.8.1 Teoría de modelos . . . . . 415

7.8.2 Escalas de modelos . . . . . 419

7.8.3 Aspectos prácticos del empleo de modelos 420

7.9 Algunos estudios de modelos representativos . . . . . 421

7.9.1 Flujo a través de conductos cerrados . . . 421

7.9.2 Flujo en torno a cuerpos inmersos . . . . 424

7.9.3 Flujo con una superficie libre . . . . . 428

7.10 Similitud basada en ecuaciones diferenciales rectoras . . . . . 432

Bibliografía . . . . . 434

Problemas . . . . . 435

## 8

### FLUJO VISCOSO EN TUBERÍAS . . . . . 447

8.1 Características generales del flujo en tuberías . . . . . 448

8.1.1 Flujo laminar o turbulento . . . . . 449

8.1.2 Región de entrada y flujo totalmente desarrollado . . . . . 451

8.1.3 Presión y esfuerzo cortante . . . . . 452

8.2 Flujo laminar totalmente desarrollado . . . . 453

8.2.1 A partir de  $F = ma$  aplicada directamente a un elemento de fluido . . 454

8.2.2 A partir de las ecuaciones de Navier-Stokes . . . . . 459

8.2.3 A partir del análisis dimensional . . . . . 460

8.2.4 Consideraciones de energía . . . . . 461

8.3 Flujo turbulento totalmente desarrollado . . 464

8.3.1 Transición de flujo laminar a flujo turbulento . . . . . 464

8.3.2 Esfuerzo cortante turbulento . . . . . 466

8.3.3 Perfil de velocidad turbulento . . . . . 471

8.4 Análisis dimensional del flujo en tuberías . . 475

8.4.1 Diagrama de Moody . . . . . 475

8.4.2 Pérdidas menores . . . . . 482

8.4.3 Conductos no circulares . . . . . 494

8.5 Ejemplos de flujo en tuberías . . . . . 497

8.5.1 Tuberías simples . . . . . 497

8.5.2 Sistemas de varias tuberías . . . . . 509

8.6 Medición del caudal en una tubería . . . . . 514

8.6.1 Medidores del caudal en una tubería . . . 514

8.6.2 Medidores de flujo . . . . .	519
Bibliografía . . . . .	521
Problemas . . . . .	522

## 9

### FLUJO SOBRE CUERPOS INMERSOS . . . . . 535

9.1 Características generales del flujo externo . . . . .	536
9.1.1 Conceptos de elevación y resistencia al avance . . . . .	538
9.1.2 Características del flujo que pasa por un objeto . . . . .	541
9.2 Características de la capa límite . . . . .	546
9.2.1 Estructura y espesor de la capa límite sobre una placa lisa . . . . .	546
9.2.2 Solución de Prandtl y Blasius de la capa límite . . . . .	550
9.2.3 Ecuación integral de la cantidad de movimiento de la capa límite para una placa lisa . . . . .	554
9.2.4 Transición de flujo laminar a turbulento . . . . .	560
9.2.5 Flujo en la capa límite turbulenta . . . . .	562
9.2.6 Efectos del gradiente de presión . . . . .	568
9.2.7 Ecuación integral de la cantidad de movimiento de la capa límite con gradiente de presión diferente de cero . . . . .	572
9.3 Resistencia . . . . .	573
9.3.1 Resistencia por fricción . . . . .	574
9.3.2 Resistencia por presión . . . . .	576
9.3.3 Datos y ejemplos del coeficiente de resistencia . . . . .	578
9.4 Elevación . . . . .	595
9.4.1 Distribución de la presión superficial . . . . .	595
9.4.2 Circulación . . . . .	605
Bibliografía . . . . .	610
Problemas . . . . .	611

## 10

### FLUJO EN UN CANAL ABIERTO . . . . . 623

10.1 Características generales del flujo en un canal abierto . . . . .	624
10.2 Ondas superficiales . . . . .	625
10.2.1 Velocidad de onda . . . . .	625
10.2.2 Efectos del número de Froude . . . . .	628
10.3 Consideraciones de energía . . . . .	629
10.3.1 Energía específica . . . . .	630
10.3.2 Variaciones en la profundidad del canal . . . . .	634
10.4 Flujo en un canal de profundidad uniforme . . . . .	635
10.4.1 Aproximaciones al flujo uniforme . . . . .	636
10.4.2 Las ecuaciones de Chezy y Manning . . . . .	637

10.4.3 Ejemplos de profundidad uniforme . . . . .	640
10.5 Flujo de variación gradual . . . . .	648
10.5.1 Clasificación de las formas superficiales . . . . .	649
10.5.2 Ejemplos de flujos de variación gradual . . . . .	650
10.6 Flujo de variación rápida . . . . .	652
10.6.1 Salto hidráulico . . . . .	652
10.6.2 Vertederos de pared delgada . . . . .	658
10.6.3 Vertederos de pared espesa . . . . .	662
10.6.4 Compuertas de corriente subálvea . . . . .	662
Bibliografía . . . . .	667
Problemas . . . . .	668

## 11

### FLUJO COMPRESIBLE . . . . . 679

11.1 Relaciones de los gases ideales . . . . .	680
11.2 Número de Mach y velocidad del sonido . . . . .	685
11.3 Categorías del flujo incompresible . . . . .	688
11.4 Flujo isentrópico de un gas ideal . . . . .	693
11.4.1 Efecto de las variaciones en el área de la sección transversal del flujo . . . . .	693
11.4.2 Flujo a través de un ducto convergente-divergente . . . . .	695
11.4.3 Flujo a través de un ducto de área constante . . . . .	712
11.5 Flujo no isentrópico de un gas ideal . . . . .	714
11.5.1 Flujo adiabático a través de un ducto de área constante con fricción (flujo de Fanno) . . . . .	714
11.5.2 Flujo a través de un ducto de área constante sin fricción con transferencia de calor (flujo de Rayleigh) . . . . .	727
11.5.3 Ondas de choque normal . . . . .	736
11.6 Analogía entre flujos compresible y en un canal abierto . . . . .	748
11.7 Flujo compresible bidimensional . . . . .	750
Bibliografía . . . . .	753
Problemas . . . . .	753

## 12

### TURBOMÁQUINAS . . . . . 759

12.1 Introducción . . . . .	760
12.2 Consideraciones básicas de energía . . . . .	762
12.3 Consideraciones básicas de la cantidad de movimiento angular . . . . .	766
12.4 La bomba centrífuga . . . . .	768
12.4.1 Consideraciones teóricas . . . . .	769
12.4.2 Características de rendimiento de la bomba . . . . .	773
12.4.3 Carga de aspiración neta positiva (CANP) . . . . .	775

12.4.4 Características del sistema y selección de la bomba . . . . . 778

12.5 Parámetros adimensionales y leyes de semejanza . . . . . 781

12.5.1 Leyes especiales de escala para bombas . 784

12.5.2 Velocidad específica . . . . . 785

12.5.3 Velocidad específica de aspiración . . . . 786

12.6 Bombas axiales y mixtas . . . . . 787

12.7 Ventiladores . . . . . 789

12.8 Turbinas . . . . . 790

12.8.1 Turbinas Pelton . . . . . 791

12.8.2 Turbinas de reacción . . . . . 801

12.9 Turbomáquinas de flujo compresible . . . . 805

12.9.1 Compresores . . . . . 806

12.9.2 Turbinas de flujo compresible . . . . . 810

Bibliografía . . . . . 813

Problemas . . . . . 814

## APÉNDICES

**A**  
 TABLAS DE CONVERSIÓN DE UNIDADES . . . . . 824

**B**  
 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS FLUIDOS . . . . . 828

**C**  
 PROPIEDADES DE LA ATMÓSFERA ESTÁNDAR DE ESTADOS UNIDOS DE AMERICA . . . . 834

**D**  
 MÉTODO OPCIONAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS TÉRMINOS  $PI$  . . . . . 836

**E**  
 TABLAS DE FLUJO COMPRESIBLE PARA UN GAS IDEAL ( $K = 1.4$ ) . . . . . 840

RESPUESTAS . . . . . 851

ÍNDICE . . . . . 859