



# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Índice</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Prólogo</b>  | <b>9</b>  |
| <b>1. Introducción a la mecánica de fluidos</b>               | <b>13</b> |
| 1.1. El campo fluido  | 17        |
| 1.1.1. Definiciones y magnitudes cinemáticas                  | 17        |
| 1.1.2. Sistemas coordenados ortogonales                       | 20        |
| 1.1.3. Relaciones de Frenet y coordenadas naturales           | 23        |
| 1.1.4. La derivada sustancial                                 | 27        |
| 1.1.5. Teoremas fluidos                                       | 28        |
| 1.1.6. Integrales extendidas a volúmenes fluidos              | 29        |
| 1.2. Fuerzas, tensiones y corrimientos                        | 31        |
| 1.2.1. Fuerzas másicas y volumétricas                         | 31        |
| 1.2.2. Fuerzas y tensiones superficiales                      | 31        |
| 1.2.3. Descripción del movimiento en el continuo              | 33        |
| 1.2.4. Relación entre tensiones y deformaciones               | 35        |
| 1.2.5. Ecuaciones de Cauchy y Navier-Stokes                   | 36        |
| 1.3. Fenómenos, procesos y propiedades                        | 37        |
| 1.3.1. Fenómenos de transporte, difusividades y simultaneidad | 37        |
| 1.3.2. Viscosidad y reología                                  | 41        |
| 1.3.3. Densidad y estado                                      | 45        |
| 1.3.4. Procesos termodinámicos y trabajos                     | 46        |
| 1.3.5. Coeficientes de compresibilidad y otros                | 49        |
| 1.3.6. Fenómenos de interfase y capilares                     | 53        |
| 1.3.7. Presión de vapor                                       | 57        |
| 1.4. Fluidostática  | 59        |
| 1.4.1. Condiciones de estabilidad en el campo gravitatorio    | 61        |
| 1.4.2. Equilibrio relativo                                    | 62        |
| 1.4.3. Fuerzas y empujes sobre superficies                    | 64        |
| 1.4.4. Principio de Arquímedes                                | 66        |
| 1.4.5. Flotación y estabilidad                                | 67        |



|   |            |
|---|------------|
| <b>2. Ecuaciones fundamentales y análisis dimensional</b>     | <b>75</b>  |
| 2.1. Principios integrales de conservación                    | 76         |
| 2.1.1. Conservación de la masa                                | 76         |
| 2.1.2. Conservación de la cantidad de movimiento              | 78         |
| 2.1.3. Conservación de la energía                             | 80         |
| 2.2. Ecuaciones en forma diferencial                          | 83         |
| 2.2.1. Principios de conservación                             | 84         |
| 2.2.2. Generación y transporte de vorticidad                  | 87         |
| 2.2.3. Otras ecuaciones en forma diferencial                  | 90         |
| 2.3. Análisis dimensional y de magnitud                       | 94         |
| 2.3.1. Homogeneidad dimensional y semejanza física            | 94         |
| 2.3.2. Semejanza física en mecánica de fluidos                | 97         |
| 2.3.3. Grupos adimensionales característicos                  | 100        |
| 2.3.4. Análisis por órdenes de magnitud                       | 103        |
| 2.3.5. Condiciones de incompresibilidad                       | 106        |
| 2.3.6. Semejanza física en las turbomáquinas                  | 110        |
| 2.3.7. Leyes de semejanza y teoría de modelos                 | 115        |
| <b>3. Flujos característicos y dinámica de fluidos</b>        | <b>123</b> |
| 3.1. Ecuaciones de Euler y Bernoulli                          | 124        |
| 3.1.1. Ecuaciones de Euler en coordenadas intrínsecas         | 126        |
| 3.1.2. Energía mecánica y potencia de un flujo                | 128        |
| 3.1.3. Difusión de la energía cinética                        | 129        |
| 3.2. Flujo irrotacional o potencial                           | 131        |
| 3.2.1. Dominios de irrotacionalidad                           | 131        |
| 3.2.2. Características del movimiento irrotacional            | 133        |
| 3.2.3. Movimiento bidimensional en torno a un cilindro        | 137        |
| 3.2.4. Generación de sustentación en un perfil alar           | 139        |
| 3.3. Movimiento en medios permeables                          | 142        |
| 3.3.1. Descripción macroscópica del movimiento                | 142        |
| 3.3.2. Condiciones de contorno y ley de la refracción         | 145        |
| 3.3.3. Movimiento de líquidos en capas freáticas              | 147        |
| 3.4. Flujo unidireccional incompresible                       | 149        |
| 3.4.1. Condiciones de unidireccionalidad                      | 149        |
| 3.4.2. Algunas soluciones laminares                           | 151        |
| 3.4.3. Movimiento en conductos de sección lentamente variable | 156        |
| 3.5. Lubricación por película líquida                         | 157        |
| 3.5.1. Movimiento estacionario bidimensional                  | 157        |
| 3.5.2. Generalización tridimensional. Ecuaciones de Reynolds  | 164        |
| 3.5.3. Lubricación fluidostática                              | 168        |
| 3.6. Flujo compresible estacionario                           | 170        |
| 3.6.1. Efecto de una perturbación y número de Mach            | 170        |
| 3.6.2. Flujo homentrópico unidimensional                      | 172        |
| 3.6.3. Movimiento en conductos de sección lentamente variable | 174        |
| 3.6.4. Flujo en una tobera convergente-divergente             | 176        |
| 3.7. Ondas en el seno de un fluido                            | 181        |
| 3.7.1. Ondas sonoras respecto del reposo                      | 181        |
| 3.7.2. Ondas simples no lineales                              | 187        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>4. Turbulencia y capa límite</b>                        | <b>201</b> |
| 4.1. Turbulencia   | 202        |
| 4.1.1. Escalas características                             | 204        |
| 4.1.2. Movimiento turbulento medio                         | 206        |
| 4.1.3. Tensiones y ecuaciones de Reynolds                  | 208        |
| 4.1.4. Energía cinética y vorticidad                       | 210        |
| 4.1.5. Movimientos turbulentos unidireccionales            | 217        |
| 4.1.6. Viscosidad de remolino y longitud de mezcla         | 221        |
| 4.1.7. Distribución de velocidad próxima a una pared       | 223        |
| 4.1.8. Movimientos turbulentos libres                      | 230        |
| 4.2. Capa límite   | 234        |
| 4.2.1. Ecuaciones características y analogía de Reynolds   | 237        |
| 4.2.2. Espesores típicos de la capa límite                 | 241        |
| 4.2.3. Ecuación integral de von Kármán                     | 243        |
| 4.2.4. Capas límite laminar y turbulenta                   | 244        |
| 4.2.5. Desprendimiento de la capa límite                   | 247        |
| <b>5. Complementos y aplicaciones</b>                      | <b>257</b> |
| 5.1. Aplicaciones de las ecuaciones de Euler y Bernoulli   | 257        |
| 5.1.1. Tubos piezométricos y de Pitot, y sonda de Prandtl  | 257        |
| 5.1.2. Medida diferencial del caudal                       | 259        |
| 5.1.3. Introducción a la descarga de un depósito           | 260        |
| 5.1.4. Establecimiento de una corriente desde un depósito  | 261        |
| 5.2. Procesos de descarga                                  | 264        |
| 5.2.1. Descarga de un líquido desde un depósito            | 264        |
| 5.2.2. Descarga del gas contenido a presión en un calderín | 270        |
| 5.3. Balance energético en una máquina                     | 278        |
| 5.3.1. Ecuación de la energía mecánica                     | 280        |
| 5.3.2. Altura manométrica y formas de energía específica   | 281        |
| 5.3.3. Pérdidas y rendimientos característicos             | 282        |
| 5.4. Teoría unidimensional para turbomáquinas              | 284        |
| 5.4.1. Velocidades características en un rotor             | 285        |
| 5.4.2. Conservación del momento cinético                   | 287        |
| 5.4.3. Ecuaciones de Euler                                 | 288        |
| 5.4.4. Grado de reacción y característica real             | 290        |
| 5.5. Flujo incompresible en tuberías                       | 293        |
| 5.5.1. Ecuación de Bernoulli generalizada                  | 293        |
| 5.5.2. Ecuación del sistema y punto de funcionamiento      | 294        |
| 5.5.3. Cálculo de pérdidas                                 | 296        |
| 5.5.4. Sistemas simples unidireccionales                   | 300        |
| 5.6. Lubricación por fluidos                               | 303        |
| 5.6.1. Cojinetes por patín oscilante                       | 304        |
| 5.6.2. Cojinetes cilíndricos                               | 309        |
| 5.7. Flujo de fluidos no newtonianos                       | 313        |
| 5.7.1. Flujo por un tubo capilar                           | 314        |
| 5.7.2. Flujo por un canal plano                            | 317        |
| 5.8. Discontinuidades en el seno de un fluido              | 318        |
| 5.8.1. Condiciones generales de compatibilidad             | 318        |



|  |  |            |
|--|--|------------|
| 5.8.2.   | Expansión isentrópica de Prandtl-Meyer           | 322        |
| 5.8.3.   | Superficies de discontinuidad tangencial         | 324        |
| 5.8.4.   | Ondas de choque normales                         | 327        |
| 5.9.   | Generalización del flujo compresible             | 332        |
| 5.9.1.   | Flujo sin rozamiento con aporte de calor         | 334        |
| 5.9.2.   | Flujo adiabático con rozamiento                  | 338        |
| 5.9.3.   | Flujo isotérmico                                 | 342        |
| 5.9.4.   | Flujo de descarga de un calderín por un conducto | 344        |
| 5.9.5.   | Solución general del flujo compresible           | 353        |
| 5.10.  | Sobre el índice politrópico                      | 355        |
| 5.10.1.  | Límites naturales para el índice politrópico     | 356        |
| 5.10.2.  | Generación de líneas isotrópicas                 | 359        |
| 5.10.3.  | Relación con el número de Mach                   | 360        |
| <b>Anexo. Ecuaciones diferenciales de la mecánica de fluidos</b> |  | <b>373</b> |
| <b>Bibliografía</b>  |  | <b>381</b> |